

DOI.org/10.5281/zenodo.1286036

УДК 666.792

Е.Е. Шалый, Л.В. Ким

ШАЛЫЙ ЕВГЕНИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант, e-mail: john_shamali@mail.ru

КИМ ЛЕВ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: kim_lv1@dvfu.ru

Кафедра гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Хлоридная коррозия морского бетона

Аннотация: Хлоридная агрессия – одна из главных причин коррозии арматуры бетонных конструкций, в основном шельфовых и прибрежных сооружений. Проникновение хлорид-ионов вследствие капиллярного всасывания и диффузии разрушает пассивирующую защитную пленку на арматуре, вследствие чего происходит быстрое разрушение защитного слоя бетона. В данном исследовании усовершенствована модель диффузии хлорид-ионов и разработано программное обеспечение для анализа долговечности. Выполнено моделирование концентрации ионов хлора по глубине защитного слоя бетона железобетонной конструкции в зависимости условий ее эксплуатации. Выполнена верификация модели для решения задачи определения концентрации хлора в защитном слое бетона гидротехнических сооружений. Хлорид-ионы имеют наибольшую активизирующую способность из всех видов анионов. Они разрушают пассивирующую пленку на поверхности арматуры в местах, где концентрация достигает критического значения (как правило, 0,4% от массы цемента (EN 206-1)). Анализ экспериментальных данных показал, что содержание хлорид-ионов в исследуемых образцах превышает критическую величину. Получена хорошая сходимость экспериментальных данных с результатами расчетов по конечноразностной модели. Разработанное программное обеспечение позволило оценить влияние параметров внешней среды на процессы коррозии. Модель верифицирована с характеристиками коррозии, полученными в ходе авторских полевых обследований портовых сооружений на о. Сахалин. Подтверждено, что для указанных сооружений локально достигается предельная концентрация ионов хлора в бетоне приарматурной зоны, подверженной коррозионному разрушению. Дальнейшие исследования направлены на формирование экспериментальной базы – сбор фактического материала в портах Дальнего Востока.

Ключевые слова: карбонизация, хлоридная агрессия, коррозия, коррозия бетона на Сахалине, гидротехнические сооружения, обследование, агрессивное действие воды.

Введение

Бетон – наиболее пригодный материал для строительства сооружений (портовых, береговых, шельфовых) в условиях северных морей. Как показывает опыт их эксплуатации, дефекты бетона, обусловленные химической агрессией морской воды и циклами замораживания и оттаивания, дополняются дефектами ледовой абразии от дрейфующих ледяных образований. Оголение арматуры и ускорение коррозии ведут к снижению долговечности сооружения, когда под воздействием меняющихся условий эксплуатации оно может разрушиться в эксплуатационный период [1–3].

Основное разрушающее воздействие на структуру бетона оказывает химическая коррозия (сульфатная, магниезиальная, сульфатно-магниезиальная и пр.). При действии растворённых в воде

магнезиальных солей происходит взаимодействие с гидроксидом кальция и вымывание его из бетона, ведущее к трещинообразованию.

Основные негативные факторы: хлоридная агрессия, транспорт воды, химическая деградация, циклы замораживания–оттаивания, низкие температуры и т.п. Обеспечение долговечности с точки зрения диффузионного транспорта в пористых цементных материалах и деградации механических свойств считается критическим при проектировании.

Проницаемость в значительной степени определяет стойкость бетона к внешним воздействиям, поэтому долговечный бетон должен быть относительно непроницаемым. Основную роль в разрушении цементного камня при действии низких температур играют пористость и вид капиллярно-пористой структуры бетона [1, 3]. Бетонные конструкции в зоне переменного уровня получают наибольшие повреждения в результате замерзания поровой воды (рис. 1).

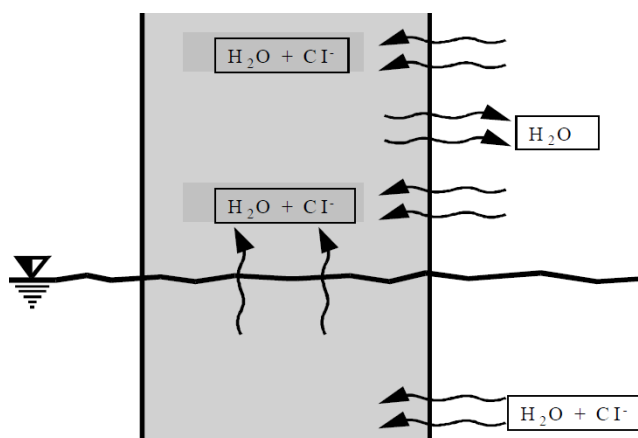


Рис. 1. Транспорт хлорид-ионов в зоне переменного уровня сооружения.

Есть два традиционных описания механизма разрушения: теория гидравлического давления и теория капилляров. Теория гидравлического давления учитывает, что вода в больших порах бетона замерзает в первую очередь. Незамерзшая вода в мелких порах/капиллярах образует поток, который создает гидравлическое давление, приводящее к трещинообразованию. Давление увеличивается с уменьшением размера капилляров и с повышением скорости замораживания. В свою очередь объем льда в больших порах растет и оказывает давление на стенки пор.

По ряду агрессивных воздействий всё ещё существует неполная картина механизма коррозионных процессов, поэтому, на первый взгляд, хорошо изученная коррозия бетона ставит перед исследователями ряд нерешённых вопросов [3], некоторые из них мы и рассмотрим.

Цель данной статьи: разработать модель оценки хлоридной агрессии для морских сооружений и провести ее верификацию.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) усовершенствовать расчетную модель хлоридной агрессии;
- 2) провести натурные обследования состояния морских бетонных конструкций;
- 3) проанализировать результаты исследований, построить хлоридные профили.

Теоретическое обоснование модели

Влияние морской среды на интенсивность коррозии требует дополнительных исследований, так как хлоридная агрессия и карбонизация бетона значительно ускоряют процесс деградации [5]. Коррозия арматуры, вызванная исключительно хлоридом, достаточно хорошо изучена, и для моделирования этого процесса доступен ряд моделей [1–15]. Одни модели изучают транспортный механизм ионов хлорида с поверхности железобетонных элементов, другие [1–3] – влияние начальных трещин в бетоне [10–13] и влияние нагрузки на транспортный механизм хлоридов [14, 15]. В работе [9] было предложено численное моделирование процесса коррозионного повреждения бетона, в котором физическая и электрохимическая модели связаны с механической моделью образования тре-

щины. Известны работы по изучению действия совместных факторов среды: хлоридной агрессии и карбонизации. Отмечено, что влияние карбонизации на коэффициент диффузии ионов хлорида зависит от типов и пропорций смеси бетонов. В [16] описан переменный тест с хлоридным воздействием и карбонизацией, где концентрация ионов хлорида была максимальной вблизи фронта карбонизации.

Несмотря на то что в условиях морской среды одновременно происходят карбонизация и хлоридная агрессия, следует отметить, что диффузия ионов хлорида идет намного быстрее, чем процесс карбонизации. До карбонизации бетон обычно содержит соль Фриделя из-за хлоридного иона, связанного внутри бетона. Когда соль Фриделя реагирует с двуокисью углерода, ионы хлорида высвобождаются в поровую воду [16]:



Высвобожденные ионы увеличивают концентрацию свободных хлоридов, которые транспортируются с поверхности во внутреннюю среду. Поэтому для анализа и прогнозирования комбинированного действия углекислоты и проникновения хлоридов необходимо построить модель массопереноса. Авторами предложена математическая модель комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, которая сравнивается с показателями хлоридного переноса, полученными в ходе проведения эксперимента.

Расчетная модель хлоридной агрессии

Известно, что критический уровень концентрации хлоридов возникает при равных скоростях процессов пассивации и депассивации арматуры и зависит от pH, влажности бетона и содержания хлоридов во внешней среде [1]. При его определении надо учитывать тип и количество вяжущего, водоцементное отношение, качество изготовления бетона, возраста конструкции, температуру и влажность среды, pH поровой жидкости, состав добавок в бетон и др.

На практике определяют:

- общее содержание хлоридов по массе бетона;
- общее содержание хлоридов по массе цемента;
- концентрацию свободных (водорастворимых хлоридов) в поровой жидкости;
- отношение между хлорид-ионами и свободными гидроксидами в поровой жидкости.

Известны 3 механизма транспорта: 1) диффузия; 2) конвекция; 3) движение ионов под действием электрического поля. Общепринятой базовой моделью является DuraCrete [5], которая заложена в ряде зарубежных норм. Она дает достоверные результаты при толщине защитного слоя более 40 мм, где можно не учитывать конвекцию, однако эта модель плохо применима при совместном действии хлоридной деградации и карбонизации, поэтому в статье предлагается использовать конечно-разностное решение закона диффузии Фика.

Авторами данной статьи также использовалась термодинамическая модель, в которой фундаментальные уравнения выведены на микроскопическом уровне локальных деформаций вокруг пор, затем усреднены на макроскопическом уровне. Последняя состоит из двух механизмов: 1) расширение вследствие внутреннего фазового перехода; 2) образование ледовых линз в порах. Расчет выполняют в 2 этапа: 1) силовое нагружение (начальный период), 2) деформирование с последующим трещинообразованием и разрушением конструктивного элемента [2].

Для выявления долговечности можно использовать метод накопления дефектов, основанный на общности процессов разрушения при повторных температурно-влажностных и механических воздействиях. Применение деградационных моделей и метода накопления дефектов позволяют установить связь между параметрами среды и расчетными геометрическими и физическими параметрами конструкции с учетом комплексного характера воздействий.

Принято уравнение диффузии вида [6]

$$\frac{\partial c_{cl}}{\partial t} = \text{div}(D_{cl} w_e \vec{\nabla}(C_{cl})), \quad (2)$$

где C_{cl} – общее содержание хлорида в бетоне; D_{cl} – эффективный коэффициент диффузии хлоридов; w_e – свободная поровая влажность.

Перенос ионов хлорида после карбонизации принят по второму закону Фика, который описывает транспорт хлоридов за счет диффузии. В действительности процесс диффузии только действует в водонасыщенном бетоне. Когда поры заполнены воздухом, капиллярные силы препятствуют транспорту хлорид-ионов. Также принято допущение, что бетон имеет однородную структуру, а это не соответствует реальности. Однако несмотря на это, данная модель широко используется, так как была множество раз верифицирована и откалибрована.

Примем, что общее количество хлорида в единице объема бетона состоит из свободного хлорида в поровом растворе и связанного хлорида:

$$C_{cl} = w_e C_f + C_b, \quad (3)$$

где C_f – содержание свободного хлорида в бетоне; C_b – содержание связанного хлорида в бетоне.

После преобразований:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{D_{cl}^*}{1 + \left(\frac{1}{w_e}\right) \cdot \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)} \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ – связывающая способность бетона.

Связывающая способность определяется наклоном связывающей изотермы [17]. Нами используется изотерма Лангмюра:

$$C_b = \frac{\alpha_L \cdot C_f}{1 + \beta_L \cdot C_f} \rightarrow \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_L}{(1 + \beta_L \cdot C_f)^2}, \quad (5)$$

где α_L , β_L являются константами связывания, полученными эмпирически из регрессионного анализа.

Предлагается модифицировать уравнение (4) в виде

$$C_b = \frac{\alpha_L(1-d \cdot a_c)C_f}{1 + \beta_L \cdot C_f} \rightarrow \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_L(1-d \cdot a_c)}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_f}{b})^2}, \quad (6)$$

где a_c – степень карбонизации бетона, d – коэффициент понижения связывающей способности хлорида за счет карбонизации, который рассчитывается по формуле:

$$d = 1 - \frac{\alpha_{L,c}}{\alpha_L}. \quad (7)$$

где $\alpha_{L,c}$ – константа связывания карбонизированного бетона [16].

$$\alpha_{L,c} = 0,12 \alpha_L \frac{\alpha_{L,c}}{\alpha_L}. \quad (8)$$

Известно, что эффективный коэффициент диффузии D_{cl}^* зависит от температуры, влажности, возраста бетона, типа цемента, пористости и условий твердения:

$$D_{cl}^* = f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t) \cdot D_{cl.ref}, \quad (9)$$

где $f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t)$ – функции влияния температуры, влажности и возраста бетона на коэффициент диффузии; $D_{cl.ref}$ – начальный коэффициент диффузии.

Влияния температуры и влажности описываются синусоидальным законом, а функции их влияния описываются как

$$f_T(t) = \exp\left(\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(t)}\right)\right), \quad (10)$$

$$f_W(t) = \left(1 + \frac{(1-W(t))^4}{(1-W_{ref})^4}\right)^{-1}, \quad (11)$$

где E – энергия активации для хлоридной диффузии, кДж/моль; R – газовая константа, $8,314 \times 10^{-3}$ кДж/К · моль; T_{ref} – начальная температура, при которой был измерен коэффициент диффузии, К; W_{ref} – влажность, при которой коэффициент диффузии достигает своего среднего значения.

Функция зависимости коэффициента диффузии от времени определяется следующим образом:

$$f_t(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^m, \quad (12)$$

где t_0 – время, при котором был определен коэффициент диффузии; m – фактор возраста.

Из-за переменной кинетики концентрации хлоридов в бетоне, которая зависит от погодных условий, поверхностная концентрация хлоридов определяется расстоянием объекта до моря, L :

$$C_{env}(L) \begin{cases} 2.95 \\ 1.15 - 1.18 \log(L) \\ 0.35 \end{cases} \begin{cases} L < 0.1 \\ 0.1 \leq L < 2.84. \\ L > 2.84 \end{cases} \quad (13)$$

Результаты расчетов хлоридной агрессии

Для моделирования совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии портовых сооружений на о. Сахалине нами приняты исходные данные для расчетов (табл. 1): $w/b = 0,4$; $b = 350$ кг/м³; $E = 41,8$ кДж/моль; $R = 8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/К; $\alpha_L = 0,1185$; $\beta_L = 0,09$; $W_{ref} = 65$ %; $C_{env}(L) = 6,2$ кг/м³; $m = 0,4$; $t_0 = 28$ дн.; $t = 50$ лет.

Таблица 1

Исходные данные для условий о. Сахалина

Параметр	Ед. изм.	Северная часть	Центральная часть	Южная часть
T_{min}	°С	-7,3	-6,2	-2,4
W_{max}	%	86	81	85
W_{min}	%	74	76	71

Так как второй закон диффузии Фика используется в нестационарной диффузии, когда концентрация внутри диффузионного объема изменяется по времени, уравнение (4) можно представить в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right). \quad (14)$$

Уравнение (14) представляет собой двумерную форму закона Фика для анализа диффузионного механизма. С помощью разложения Тейлора его можно записать следующим образом:

$$\text{по оси } X: \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{c_{i-1} + 2c_i + c_{i+1}}{\Delta x^2}, \quad (15)$$

$$\text{по оси } Y: \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = \frac{c_{j-1} + 2c_j + c_{j+1}}{\Delta y^2}. \quad (16)$$

Приняв $\Delta x = \Delta y$, после преобразований получим (индекс i для x – глубина защитного слоя бетона, индекс j для t – время эксплуатации) конечно-разностное решение уравнения диффузии:

$$C_{t+\Delta t} = C_t + D \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left[\{c_{j,i-1} - 2c_{j,i} + c_{j,i+1}\} + \{c_{j-1,i} - 2c_{j,i} + c_{j+1,i}\} \right]. \quad (17)$$

Используя метод конечных разностей (16), в Mathcad реализована программа, с помощью которой можно рассчитать период инициации коррозии до момента критического значения концентрации хлоридов. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Результаты моделирования совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии

Параметр	Ед. изм.	Северная часть	Центральная часть	Южная часть
Фронт карбонизации	мм	30,8	29,6	29,4
Степень карбонизации	–	0,61	0,6	0,6
Концентрация хлоридов на глубине залегания арматуры без учета карбонизации	%	0,55	0,65	0,44
Концентрация хлоридов на глубине залегания арматуры с учетом карбонизации	%	0,65	0,6	0,54
Время инициации хлоридной коррозии без учета карбонизации	лет	29	35	43
Время инициации хлоридной коррозии с учетом карбонизации	лет	20	24	30

Результаты обследования бетонных портовых сооружений

Во время обследований, проведенных авторами в портах Холмск и Корсаков, сравнивалось содержание хлоридов возле арматуры с предельным их значением [1], при котором начинается коррозия арматуры. Первоначально из критических участков этих конструкций, имеющих переменный контакт с морской водой, отбирались образцы для лабораторных испытаний на содержание хлоридов.

Хлоридные профили тестовых зон представлены на рис. 2.

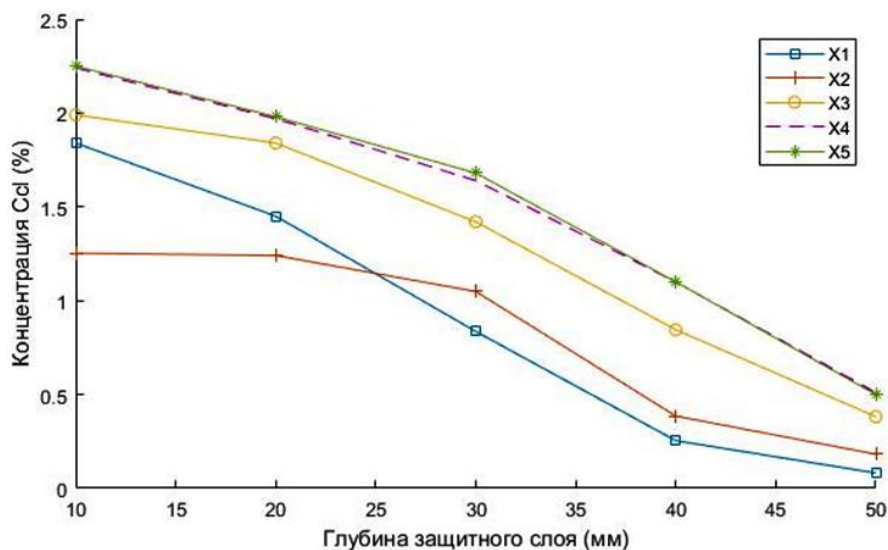


Рис. 2. Хлоридные профили образцов бетона сооружений порта Холмск.

Инструментальные измерения прочности бетона проводились методом пластических деформаций. Пластины для хлоридных профилей отбирались по 6 шт. на каждом участке размером 70x70 мм и минимальной глубины 50 мм.

Образцы разрезались на несколько частей по 10 мм. Каждая часть измельчалась, из измельченного порошка брались навески в 2 г, содержащие куски и крупинки диаметром менее 0,5 мм. Отмеренную навеску засыпали во флакон с 20 мл экстрагирующего раствора, завинчивающийся герметичной крышкой. Экстрагирующий раствор состоял из дистиллированной воды с добавкой буферного регулятора ионной силы. С помощью ионоселективного электрода с точностью $\pm 0,005\%$ определялось и калибровалось значение концентрации хлоридов в растворе для каждого образца.

Обсуждение результатов

Хлорид-ионы имеют наибольшую активирующую способность из всех видов анионов. Они разрушают пассивирующую пленку на поверхности арматуры, в местах, где концентрация достигает критического значения (как правило, 0,4% от массы цемента, EN 206-1).

Анализ экспериментальных данных показал, что содержание хлорид-ионов в исследуемых образцах превышает критическую величину.

Получена хорошая сходимость экспериментальных данных с данными по конечноразностной модели.

Заключение

Итак, в настоящем исследовании сделано следующее.

1. На основе анализа литературы принято, что модель Фика является удобным инструментом для прогноза остаточного ресурса морских сооружений.

2. Выполнено моделирование концентрации ионов хлора в бетонных конструкциях в зависимости от срока эксплуатации и климатических условий.

3. Выполнена верификация модели для решения задачи определения концентрации хлора в защитном слое бетона гидротехнических сооружений.

4. Результаты обследования сооружений порта Холмск подтвердили, что локально достигается предельная концентрация хлоридов. Концентрация ионов хлора в бетоне в зоне арматуры, подверженной коррозионному разрушению, более 0,4% по отношению к массе бетона.

Дальнейшие исследования направлены на сбор фактического материала по железобетонным конструкциям для формирования экспериментальной базы по изучению коррозии в портах Дальнего Востока, преимущественно в портах восточного сектора Арктики. Это позволит учесть региональные особенности процессов деградации морских сооружений, эксплуатируемых в морской среде, уточнить расчетные коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
2. Розенталь Н.К. Проблемы коррозионного повреждения бетона // Бетон и железобетон. 2007. № 6. С. 55–59.
3. Шестовицкий Д.А., Карапетов Э.С. О хлоридизации железобетонных мостовых сооружений // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 3. С. 20–23.
4. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011;39:9–18.
5. Backus J., Mcpolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. February 2013, ICE Publishing. doi: 10.1680/adcr.12.00029
6. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures theory. *J Struct. Div. ASCE* 105 (ST6), 1979:1137–1153.
7. Chindaprasirt P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended portland cement mortar. *Constr. Build. Mater.*, 2008;(7);22:1701–1707.
8. Huang T. The experimental research on the interaction between concrete carbonation and chloride ingress under loading: MSc thesis, Zhejiang University, 2013.
9. Mideiros-Junior R.A., Maryagela G., Mideiros M. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment Dev. Sustainability*. 2015(17);5:1103–1119.
10. Ozbolt J., Balabanic G., Kuster M. 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corros. Sc.* 2011(12);53:4166–4177.
11. Rahman M., Al-Kutti W., Shazali M., Baluch M., Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete. *J. Mater. Civil Eng. ASCE*. 2012(7);24:789–796.

12. Schiessl P., Gehlen C. New approach of service life design for concrete structures. Proc. Int. Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads, Qingdao, China. 2005:3–14.
13. Thomas M.D.A., Bamforth P.B. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. Cement Concrete Res. 1999(4);29:487–495.
14. Yoon I.S. Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study. Key Engineering Materials. 2007(348–349):729–732. URL: <https://www.scientific-net/KEM.348-349.729>. – 2018.03.03.
15. Yoon I. Simple approach to calculate chloride diffusivity of concrete considering carbonation. Comput. Concr. 2009(1);6:1–18.
16. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. Construction and Building Materials. 2016;110:369–380.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

DOI.org/10.5281/zenodo.1286036

Shalyi E., Kim L.

EVGENYI SHALYI, Postgraduate, e-mail: john_shamali@mail.ru

LEV KIM, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: kim_lv1@dvfu.ru

Offshore & Structural Engineering Department, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

The chloride corrosion of marine concrete

Abstract: Chloride aggression is one of the main causes of reinforcement corrosion in concrete structures, especially in offshore and coastal structures. Chloride ion penetration due to capillary absorption and diffusion destroys the passivating protective film on the reinforcement, resulting in rapid destruction of the protective layer of concrete. In the present study, the chloride ion diffusion model has been improved and the durability analysis software has been developed. The chloride ion concentration is modelled depending on the service life and climatic conditions. Model verification was performed to solve the problem of chloride concentration determination in the concrete protective layer of hydraulic structures. Chloride ions have the greatest activation ability of all types of anions. They destroy the passivating film on the surface of the reinforcement in places where the concentration reaches a critical value (typically 0.4% by weight of cement, EN 206-1). The analysis of experimental data has demonstrated that the chloride-ion content in the samples exceeds the critical value. A good convergence of the experimental data with the data on a finite-difference model has been obtained. The results demonstrate that the proposed software enables one to determine the impact of each parameter on the result. The model has been verified with the data of the field surveys carried out by the authors in the port facilities of Sakhalin Island. It has been shown that, as to those facilities locally, evident is the concentration limit for chloride in the zone of reinforcement which is subject to corrosion. Further researches are aimed at collecting factual materials in the ports of the entire Russian Far East.

Key words: carbonization, chloride aggression, corrosion, corrosion of concrete in Sakhalin, hydraulic engineering structures, inspection, aggressive action of water.

REFERENCES

1. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N. et al. Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection. M., Stroiizdat, 1980. 536 p.
2. Rosenthal N.K. Problems of corrosive damage to concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 2007;6:55–59.
3. Shestovitsky D.A., Karapetov E.S. On the Chlorination of Reinforced Concrete Bridge Structures. *The Way and Track Economy*. 2013;3:20–23.
4. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011;39:9–18.
5. Backus J., Mcpolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. February 2013, ICE Publishing. doi: 10.1680/adcr.12.00029
6. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures theory. *J Struct. Div. ASCE* 105 (ST6), 1979:1137–1153.
7. Chindaprasirt P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended portland cement mortar. *Constr. Build. Mater.*, 2008;(7);22:1701–1707.
8. Huang T. The experimental research on the interaction between concrete carbonation and chloride ingress under loading: MSc thesis, Zhejiang University, 2013.

9. Mideiros-Junior R.A., Maryagela G., Mideiros M. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment Dev. Sustainability*. 2015(17);5:1103–1119.
10. Ozbolt J., Balabanic G., Kuster M. 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corros. Sc.* 2011(12);53:4166–4177.
11. Rahman M., Al-Kutti W., Shazali M., Baluch M., Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete. *J. Mater. Civil Eng. ASCE*. 2012(7);24:789–796.
12. Schiessl P., Gehlen C. New approach of service life design for concrete structures. *Proc. Int. Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads, Qingdao, China*. 2005:3–14.
13. Thomas M.D.A., Bamforth P.B. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. *Cement Concrete Res.* 1999(4);29:487–495.
14. Yoon I.S. Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study. *Key Engineering Materials*. 2007(348–349):729–732. URL: <https://www.scientific-net/KEM.348-349.729>. – 2018.03.03.
15. Yoon I. Simple approach to calculate chloride diffusivity of concrete considering carbonation. *Comput. Concr.* 2009(1);6:1–18.
16. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;110:369–380.