

УДК 624.012.4:628.147.22

Е.Е. ШАЛЫЙ¹, инженер (john_shamali@mail.ru);
С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{2, 3}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);
Н.А. БУДРЕВИЧ², инженер

¹ Дальневосточный федеральный университет (690091, г. Владивосток, пос. Аякс, корп. 12, каб. Е920)

² Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

³ Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Влияние эксплуатационных нагрузок на деградацию железобетона морских сооружений

Коррозия арматуры морских и прибрежных гидротехнических сооружений вследствие хлоридной агрессии и карбонизации бетона ведет к резкому снижению безопасности сооружения. Арматура подвергается процессу депассивации, как только содержание хлорида на ее поверхности превысит пороговую концентрацию либо значение pH в защитном слое бетона уменьшится до порогового значения в результате карбонизации. При проникновении кислорода до поверхности арматуры реализуются электрохимические реакции с образованием продуктов коррозии. Это приводит к растрескиванию защитного слоя бетона, уменьшению площади сечения арматуры. В работе предложен метод прогнозирования комплексной деградации железобетонных конструкций прибрежных сооружений с учетом различных механизмов коррозионного износа, что позволяет разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтпригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, бетон, карбонизация, хлоридная агрессия.

Для цитирования: Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Влияние эксплуатационных нагрузок на деградацию железобетона морских сооружений // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 8–13.

Е.Е. SHALYI¹, Engineer (john_shamali@mail.ru);
S.N. LEONOVICH^{2, 3}, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academic of RAACS (sleonovich@mail.ru); N.A. BUDREVICH², Engineer
¹ Far Eastern Federal University (E920, 12, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690091, Russian Federation)
² Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220013, Belarus)
³ Qingdao University of Technology (11, Fushun Rd, Qingdao, 266033, China)

Influence of Operational Loads on the Degradation of Reinforced Concrete of Offshore Structures

Corrosion of reinforcement of marine and coastal hydrotechnical structures due to chloride aggression and carbonation of concrete leads to a sharp decrease in the safety of the structure. The reinforcement is subjected to a depassivation process as soon as the chloride content on its surface exceeds the threshold concentration, or the pH value in the protective layer of concrete decreases to the threshold value as a result of carbonation. When oxygen penetrates to the surface of the reinforcement, electrochemical reactions are realized with the formation of corrosion products. This leads to cracking the protective layer of concrete, reducing the cross-sectional area of the reinforcement. The paper proposes a method for predicting the complex degradation of reinforced concrete structures of coastal structures, taking into account various mechanisms of corrosion wear, which makes it possible to develop effective ways to increase the durability and maintainability of structures operated in the marine environment.

Keywords: hydrotechnical structure, concrete, carbonation, chloride aggression.

For citation: Shalyi E.E., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Influence of operational loads on the degradation of reinforced concrete of offshore structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 4–13. (In Russian).

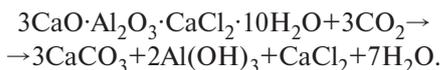
Влияние морской среды на интенсивность коррозии требует дополнительных исследований, так как хлоридная агрессия и карбонизация бетона значительно ускоряют процесс деградации [1]. Коррозия арматуры, вызванная исключительно хлоридом, достаточно хорошо изучена, и для моделирования этого процесса доступен ряд моделей. Одни модели изучают транспортный механизм ионов хлорида с поверхности железобетонных элементов, другие [2–7] изучают влияние начальных трещин в бетоне [8–10] и влияние нагрузки на транспортный механизм хлоридов [11, 12].

В [13] было предложено численное моделирование процесса коррозионного повреждения бетона, в котором физическая и электрохимическая модели

связаны с механической моделью образования трещины. Известны работы по изучению совместных факторов среды: хлоридной агрессии и карбонизации [14–16]. Отмечено, что влияние карбонизации на коэффициент диффузии ионов хлорида зависит от типов и пропорций смеси бетонов. В [15, 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 [17, 18]. До карбонизации бетон обычно со-

держит соль Фриделя из-за хлоридного иона, связанного внутри бетона. Когда соль Фриделя реагирует с двуокисью углерода, ионы хлорида высвобождаются в поровую воду [19]:



Высвобожденные ионы увеличивают концентрацию свободного хлорида, значительно превышающую концентрацию хлоридных ионов, которые транспортируются с поверхности во внутреннюю среду. Поэтому для анализа и прогнозирования комбинированного действия карбонизации и проникновения хлоридов необходимо моделировать, как карбонизация взаимодействует с хлоридным переносом без карбонизации. Авторами предложена комплексная модель комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, которая сравнивается с хлоридным переносом без карбонизации и проверяется экспериментально.

Модель карбонизации

Эффект карбонизации заключается в уменьшении щелочности пористой среды в бетоне, что позволяет разрушать пассивную пленку на арматуре и тем самым инициировать коррозию, приводя к сколам защитного слоя бетона и снижению прочности. Таким образом, карбонизация бетона представляет собой сложный физико-химический процесс. В основе описания этого процесса лежит дифференциальное уравнение первого закона Фика [2]:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \tag{1}$$

Если рассматривать карбонизацию как устойчивый постоянный процесс, описанный этим законом, то детерминистическая модель глубины прохождения фронта карбонизации для сооружения записывается следующим образом [2]:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D(t)}{a} \int_1^t f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot k \cdot C_{CO_2}(t) dt \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n}, \tag{2}$$

где t – время эксплуатации в годах; t_0 – 1 г.; n – возрастной фактор; k – коэффициент, учитывающий повышенное содержание углекислого газа в больших городах; $f_T(t)$ и $f_W(t)$ – функции изменения температуры и влажности во времени соответственно; $C_{CO_2}(t)$ – функция изменения концентрации CO_2 во времени; $D(t)$ – коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне как функция времени; a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации, определяется по формуле [20, 21]:

$$a = 0,75 \cdot CaO \cdot b \cdot a_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}, \tag{3}$$

где CaO – содержание оксида кальция в цементе; b – количество цемента; M_{CO_2} – молярная масса угле-

**Исходные данные
Initial data**

Параметр	Значение
Средняя температура наиболее теплого месяца T_{max}	17,7°C
Средняя температура наиболее холодного месяца T_{min}	2,4°C
Средняя влажность наиболее влажного месяца W_{max}	0,85
Средняя влажность наиболее сухого месяца W_{min}	0,71
Водовяжущее отношение B/B	0,4
Расход цемента b	350 кг/м ³

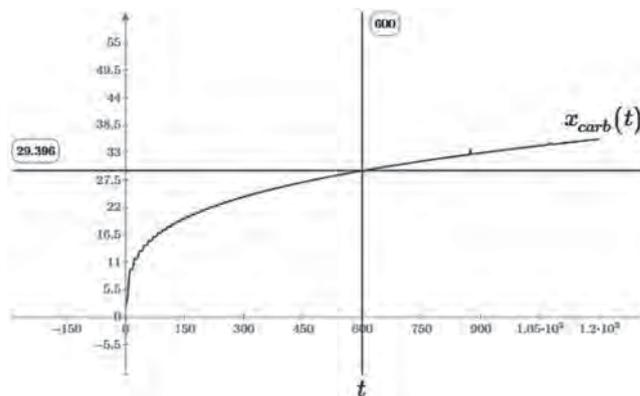


Рис. 1. График изменения глубины карбонизации бетона защитного слоя во времени: t – время, мес; $x_{carb}(t)$ – глубина карбонизации
Fig. 1. Graph of changes in the depth of carbonization of concrete cover over time: t – time, in months; $x_{carb}(t)$ – carbonation depth

кислого газа; M_{CaO} – молярная масса оксида кальция; a_H – степень гидратации цемента.

По предложенной модели проведены расчеты глубины карбонизации защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м и затопляемого только в период штормов. Конструкция эксплуатируется на юге острова Сахалин, выполнена из железобетона. Класс бетона В22,5 с расходом цемента 350 кг/м³ и водовяжущим отношением 0,4. Проектный срок эксплуатации конструкции – 50 лет. Исходные данные модели приведены в таблице.

Модель (2) рассчитывалась в программе Mathcad. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

Из графика (рис. 1) видно, что за 50 лет (600 мес) эксплуатации глубина карбонизации бетона составит 30 мм, или 60%. Степень карбонизации в данном случае $a_c=0,6$.

Модель диффузии хлоридов

В основе описания процесса диффузии хлоридов в защитный слой бетона лежит уравнение второго закона Фика [2]:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \tag{4}$$

При учете связывающей способности уравнение диффузии (4) принимает вид [2]:

$$\frac{dCf}{dt} = \frac{D_{Cl}}{1 + \left(\frac{1}{w_e}\right) \cdot \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)} \frac{d^2 C_f}{dx^2}, \tag{5}$$

где C_f – концентрация свободных хлоридов в бетоне; C_b – концентрация связанных хлоридов в бетоне; D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне; w_e – свободная поровая влага; $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ – связывающая способность бетона.

Связывающая способность негасируемого бетона часто определяется наклоном связывающей изотермы. В данном исследовании используется модель изотермы Ленгмюра [2]:

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

Эффективный коэффициент диффузии хлоридов рассчитывается как [19]:

$$D_{Cl} = D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t), \quad (7)$$

где $f_T(t)$, $f_W(t)$, $f_t(t)$ – соответственно функции влияния температуры, влажности и времени на коэффициент диффузии; $D_{Cl,0}$ – начальный коэффициент диффузии хлоридов.

При подставлении уравнения (6) и (7) в уравнение (5) определяющее уравнение диффузии модифицируется следующим образом [2]:

$$\frac{d}{dt} C_{Cl} = \frac{D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t)}{1 + (\frac{1}{w_e}) \cdot (\frac{\alpha_L}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_{Cl}}{b})^2})} \frac{d^2}{dx^2} C_{Cl}. \quad (8)$$

По предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона железобетонного шельфового ранее описанного сооружения (таблица).

Модель (8) также рассчитывалась в программе Mathcad (рис. 2)

Из графика на рис. 2 видно, что уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 504 мес эксплуатации, или примерно 42 года.

Модель комбинированного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии

Предполагается, что уравнение переноса ионов хлорида после карбонизации по-прежнему соответствует второму закону диффузии Фика (5). Общее количество хлорида в единице объема бетона состоит из свободного хлорида в поровом растворе и связанного хлорида (соль Фриделя) [19]:

$$C_{Cl,carb} = w_e C_{fc} + C_{bc}, \quad (9)$$

где $C_{Cl,carb}$ – общая концентрация хлорида с учетом карбонизации; C_{fc} – содержание свободных хлоридов в бетоне; C_{bc} – содержание связанных хлоридов в бетоне; w_e – поровая влага.

Так как в конкретном случае взаимодействие бетона с окружающей средой сопровождается не

только проникновением ионов хлорида, но и карбонизацией, то остаточная связывающая способность бетона после карбонизации снижается.

На основе экспериментальных исследований [19] количество связанного хлорида зависит не только от концентрации свободного хлорида в поровом растворе, но и от степени карбонизации, как показано на рис. 3, поэтому предлагается заменить α_L на α_{Lc} для бетона после полной карбонизации [19]:

$$\alpha_{Lc} = \alpha_L (1 - d \cdot a_c), \quad (10)$$

где d – коэффициент уменьшения связывающей способности ионов хлорида за счет карбонизации, принимаемый равным 0,88 на основании исследований [19].

Принимая во внимание уравнение (10), закон Ленгмюра (6) с учетом карбонизации выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_L (1 - d \cdot a_c)}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_f}{b})^2} \quad (11)$$

Тогда определяющее уравнение диффузии модифицируется следующим образом:

$$\frac{d}{dt} C_{Cl} = \frac{D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t)}{1 + (\frac{1}{w_e}) \cdot (\frac{\alpha_L (1 - d \cdot a_c)}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_{Cl}}{b})^2})} \frac{d^2}{dx^2} C_{Cl}. \quad (12)$$

Как и в предыдущем случае, с помощью программы Mathcad по предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м (см. таблицу). Результаты моделирования приведены на рис. 4.

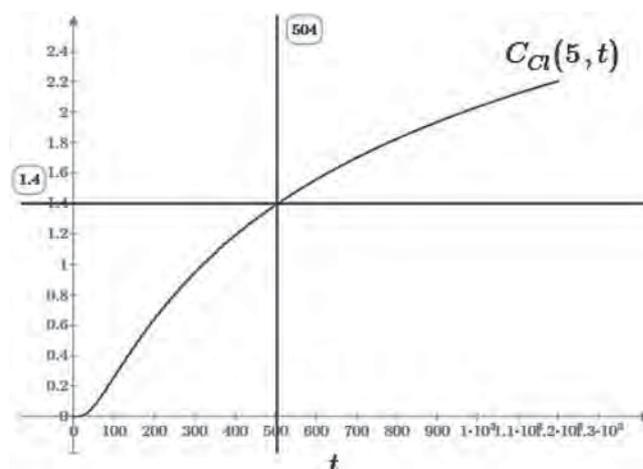


Рис. 2. График изменения хлоридов во времени (мес) без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: $C_{Cl}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t , kg/m^3 ; критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 kg/m^3 по массе вяжущего

Fig. 2. Graph of chloride changes over time (months) without taking into account carbonation at a depth of the protective layer of 5 cm: $C_{Cl}(x;t)$ – concentration of chloride ions at a depth of the protective layer X cm depending on time t , kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or 1.4 kg/m^3 by weight of the binder

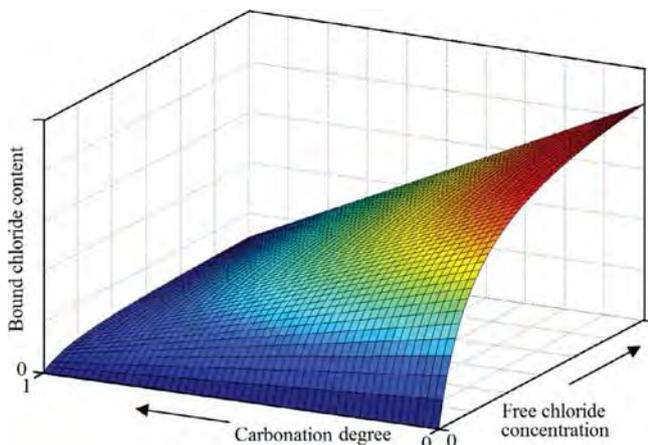


Рис. 3. Изменение содержания связанного хлорида в зависимости от концентрации свободного хлорида и степени карбонизации [19]
 Fig. 3. Change in the content of bound chloride depending on the concentration of free chloride and the degree of carbonation [19]

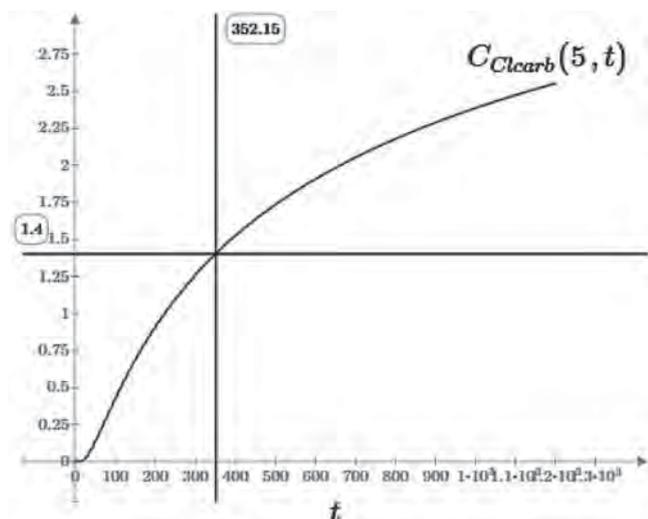


Рис. 4. График изменения хлоридов во времени (мес) с учетом карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Ccarb}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t , kg/m^3 ; критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или $1,4 kg/m^3$ по массе вяжущего
 Fig. 4. Graph of chloride changes over time (months), taking into account carbonization at a depth of the protective layer of 5 cm: t – time, in months; $C_{Ccarb}(x;t)$ – concentration of chloride ions at the depth of the protective layer X cm depending on the time t , kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or $1.4 kg/m^3$ by weight of the binder

Как видно из графика на рис. 4, уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 352 мес эксплуатации, или примерно через 29 лет, что разительно отличается от случая без учета карбонизации, где критическая концентрация достигалась через 42 года.

Верификация модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии

Для оценки результатов модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии в 2016 г. проведено натурное обследование портовых сооружений на юге о. Сахалин. Комбинированное действие

хлоридов и углекислого газа наиболее хорошо прослеживалось в конструкции пешеходного моста Холмского морского торгового порта (рис. 5). По данным паспорта сооружения, пешеходный мост был введен в эксплуатацию в 1984 г., т. е. в момент обследования срок его эксплуатации составлял 32 года. Конструкция располагается в 10 м от береговой черты, находится в зоне брызг и периодически затапливается во время штормов.

Результаты замера глубины карбонизации путем фенолфталеиновой пробы показали, что она составляет примерно 25 мм. Уровень концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона в данном случае составил $1,57 kg/m^3$ по массе вяжущего.

На рис. 6 показано сравнение результатов моделирования изменения хлоридов во времени с учетом и без учета карбонизации с натурными испытаниями. Как видно из графика, для конструкции пешеходного моста со сроком эксплуатации 384 мес (или 32 года.) наиболее близка кривая совместного действия, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Влияние эксплуатационной нагрузки на деградацию сооружений при совместном действии карбонизации и хлоридной агрессии

Начиная с 2011 г. компания RILEM TC 246-TDC (в которую входит пять лабораторий из различных частей мира) разрабатывала метод определения прочности бетона, подверженного комбинированному воздействию проникновения хлоридов и механической нагрузки.

В ходе этой работы учеными был сделан вывод, что коэффициенты диффузии имеют тенденцию уменьшаться со временем воздействия, в то время как расчетные поверхностные концентрации увеличиваются. Таким образом, данные, которые они получили, частично согласуются с литературными данными, где говорится, что диффузия хлоридов при



Рис. 5. Пролет пешеходного моста Холмского морского торгового порта
 Fig. 5. Span of the pedestrian bridge of the Kholmnsk sea trade port

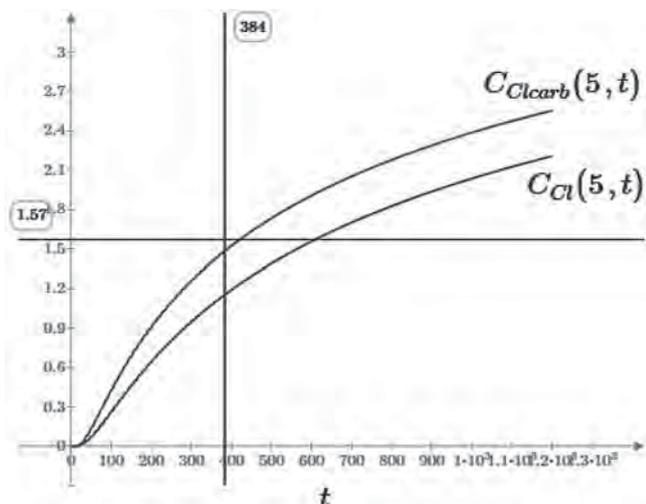


Рис. 6. График сравнения изменения хлоридов во времени (мес) с учетом и без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Cl}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t без учета карбонизации, kg/m^3 ; $C_{Clcarb}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t для бетона вследствие комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, kg/m^3 . Критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или $1,4 kg/m^3$ по массе вяжущего

Fig. 6. Graph of comparison of changes in chlorides over time (months) with and without taking into account carbonization at a depth of the protective layer of 5 cm: t – time, in months; $C_{Cl}(x;t)$ is the concentration of chloride ions at the depth of the protective layer X cm depending on the time t without carbonization, kg/m^3 ; $C_{Clcarb}(x;t)$ is the concentration of chloride ions at a depth of the protective layer X cm depending on the time t for concrete due to the combined effect of carbonization and chloride aggression, kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or $1.4 kg/m^3$ by weight of the binder

умеренной сжимающей нагрузке происходит медленнее, но увеличивается, если приложенная нагрузка превышает половину предельной нагрузки. Содержание хлоридов на глубине защитного слоя значительно увеличивается при приложении растягивающего напряжения. Такой результат был ожидаемым, поскольку поровое пространство или микротрещины расширяются под действием растягивающего напряжения. Коэффициент диффузии рассчитывается следующим образом:

$$D_{cl}(t) = k_e k_l D_{cl.0} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{ncl},$$

где k_l – коэффициент, который учитывает фактическое напряженное состояние конструктивного элемента.

Для различных условий нагружения были рассчитаны коэффициенты напряжения k_l , где $k_l=1$ для эталона; $k_l=0,8$ для загрузки (сжатие) 30% от предельной разрушающей нагрузки; $k_l=1,17$ для загрузки (сжатие) 60%; $k_l=1,25$ для загрузки (сжатие/растяжение) 50% и $k_l=1,53$ для загрузки (растяжение) 80%.

Срок службы элементов, нагруженных на 60% прочности при сжатии, сократился в среднем в 0,82 раза по сравнению с ненагруженными элементами. Следует отметить, что при коэффициенте

сжимающего напряжения 60% только две из пяти лабораторий обнаружили заметное увеличение коэффициента диффузии (что связано с сокращением срока службы), другие обнаружили небольшое снижение коэффициента диффузии. Из представленных данных можно сделать вывод, что потребуются дальнейшие испытания для получения более точной информации о влиянии эксплуатационных нагрузок на срок службы железобетонных элементов. Также необходимы дополнительные исследования для изучения влияния эксплуатационных нагрузок на скорость карбонизации, однако некоторые выводы и корректировки в модели совместного действия можно сделать сейчас.

Выводы

1. Выполнен анализ механизма коррозионного разрушения шельфовых конструкций, сформулировано предельное состояние для химической реакции хлорида в защитном слое бетона шельфовых конструкций.
2. Предложена модель деградации защитного слоя бетона прибрежных сооружений от совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии.
3. Проведена верификация модели на портовых сооружениях о. Сахалин. Выполненные полевые измерения проникновения хлоридов в бетон показали, что при глубине 50 мм, в зоне брызг, концентрация хлоридов превышает 0,4% веса цемента (порог коррозии) при возрасте конструкции порядка 30 лет.
4. Обследование в порту Холмск подтвердило, что локально в определенных случаях в защитном слое бетона возникают области, где наблюдается одновременное действие и карбонизации и хлоридной агрессии. В этих локальных областях достигается максимальная концентрация хлоридов и возникает коррозия арматуры. Срок службы обследуемых сооружений не достигал проектного срока службы.
5. Моделирование концентрации ионов хлора в бетоне защитного слоя в соответствии с принятыми моделями в зависимости от срока службы, климатических условий и глубины армирования позволило сравнить содержание хлорида на некоторой глубине при расчете с учетом и без учета совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии.
6. Результаты моделирования хорошо соотносятся с натурными исследованиями, что в дальнейшем позволит разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтпригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.
7. Проведен анализ влияния эксплуатационной нагрузки на деградацию сооружений при совместном действии карбонизации и хлоридной агрессии, даны рекомендации по изменению коэффициента диффузии хлоридов.

Список литературы / References

1. Huang T. The experimental research on the interaction between concrete carbonation and chloride ingress under loading: MSc thesis, Zhejiang University, 2013.
2. Zdeněk P. Bažant Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory. *Journal of the Structural Division*. 1979. Vol. 105. Iss. 6, pp. 1137–1153. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005168>
3. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 39, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012
4. Apostolopoulos C., Papadakis V. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 12, pp. 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006>
5. Yuan C., Niu D., Luo D. Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete. *Disaster Advances*. 2012. No. 5 (4), pp. 433–436.
6. Cairns J., State of the art report on bond of corroded reinforcement. *Tech. report ceb-tg-2/5*, 1998.
7. Cao C., Cheung M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 51, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>
8. Ho D.W.S., Lewis R.K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*. 1987. Vol. 17. Iss. 3, pp. 489–504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
9. Glass G., Buenfeld N. The influence of chloride binding on the chloride induced. *Corrosion Science*. 2000. Vol. 42. Iss. 2, pp. 329–344. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
10. Hans B. Corrosion in Reinforced Concrete Structures. Woodhead Publishing Limited, England, 2005.
11. Chindaprasit P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22 (8), pp. 1701–1707. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.06.002
12. Rahman M., Al-Kutti W., Shazali M., Baluch M., Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24. Iss. 7, pp. 789–796. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000458)
13. Ozbolt J., Balabanic G., Kuster M. 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Iss. 12, pp. 4166–4177. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.026>
14. Yoon I. Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study. *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 348–349, pp. 729–732. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.729>
15. Yoon I. Simple approach to calculate chloride diffusivity of concrete considering carbonation. *Computers and Concrete*. 2009. Vol. 6. Iss. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.12989/cac.2009.6.1.001>
16. Backus J., Mcpolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. 2013. Vol. 25 (1), pp. 3–11. DOI: 10.1680/adcr.12.00029
17. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Дegradaция железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
17. Shalyi E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Degradation of reinforced concrete structures of marine works from the combined impact of carbonation and chloride aggression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
18. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В., Румянцева В.Е., Будревич Н.А. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 3 (68). С. 123–131. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131
18. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V., Rummyantseva V.E., Budrevich N.A. Joint action of carbonization and chloride aggression on structural concrete: a probabilistic model. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 3 (68), pp. 123–131. (In Russian). DOI: 10.23968 / 1999-5571-2018-15-3-123-131
19. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 110, pp. 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034>
20. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
20. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl P. [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 320 p.
21. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
21. Alekseev S.N., Rozental N.K. Korrozionnaya stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy v agressivnoy proizvodstvennoy srede [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 205 p.