

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С КОРРОДИРОВАННОЙ АРМАТУРОЙ

Аннотация. На надежность расчетных характеристик любой конструкции влияет как эксплуатационная нагрузка, так и износ самого материала из-за воздействия окружающей среды. В данной статье проведена вероятностная оценка железобетонных элементов, подверженных проникновению хлора. Для исследования была использована свободно опертая железобетонная плита. В математической модели потери несущей способности арматуры под коррозией были включены известные методики, разработанные многими авторами.

Неопределенность прочности и приложенной нагрузки были полностью учтены с помощью вероятностного метода. Функция предельного состояния несущей способности железобетонной изгибаемой плиты была разработана и оценена с использованием метода надежности первых моментов.

Весь процесс был реализован с помощью разработанной программы MATLAB.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозия, скорость коррозии, проникновение хлора, потеря несущей способности, конструктивная надежность, коэффициент вариации, неопределенность.

A.G. TAMRAZYAN¹, T.A. MATSEEVICH¹¹Moscow National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SLABS WITH CORRODED REINFORCEMENTS

Abstract. The reliability of the design characteristics of any design is influenced by both the operating load and the wear of the material itself due to environmental influences. This article provides a probabilistic assessment of reinforced concrete elements exposed to chlorine penetration. A freely supported reinforced concrete slab was used for the study. Well-known techniques developed by many authors were included in the mathematical model of the loss of the bearing capacity of reinforcement under corrosion.

Uncertainties in strength and applied load were fully accounted for using the probabilistic method. The limit state function of the bearing capacity of a reinforced concrete bending slab was developed and evaluated using the first moment's reliability method.

The whole process was implemented using the developed MATLAB program.

Keywords: reinforced concrete structures, corrosion, corrosion rate, chlorine penetration, loss of bearing capacity, structural reliability, coefficient of variation, uncertainty.

1 Введение

Железобетон является одним из важнейших конструкционных материалов, используемых в строительстве. Он обладает отличными конструкционными характеристиками, долговечностью и несущей способностью. Однако, при их нахождении в морских прибрежных условиях проявляются признаки раннего ухудшения этих качеств. Наиболее частой причиной ухудшения является коррозия арматуры при воздействии хлора [1-3]. Коррозия это химическая или электрохимическая реакция между материалом (обычно

металлом), и окружающей его средой, которая ухудшает материал и его свойства [4]. В железобетоне, когда арматура подвержена коррозии, образование ржавчины приводит к уменьшению площади поперечного сечения арматурной стали с последующим снижением несущей способности элемента.

При нормальных условиях окружающей среды, арматура в железобетонных конструкциях не подвержена коррозии. Как правило, на поверхности арматурного стержня, когда она находится в бетоне, присутствует тонкая пленка оксида железа. Среда с высоким значением pH (около 13,5), связанная с гидратацией портландцемента, как правило, достаточна для того, чтобы стабильно защитить эту пленку. Однако, достаточная концентрация хлорид-ионов может привести к снижению pH, и если присутствуют влага и кислород, арматура может начать корродировать.

Проникновение хлора является обычным явлением для железобетонных конструкций, зданий, расположенных вблизи морской среды. Бетоны подвергаются воздействию хлорида от морской воды. Значительные повреждения были зарегистрированы в бетонных конструкциях, подверженных хлоридно-индуцированной коррозии [5,6].

2. Материалы и методы

2.1 Потеря несущей способности железобетона, подверженной коррозии

Математическая модель потери несущей способности железобетонных конструкций в зависимости от потери площади поперечного сечения арматуры хорошо представлена в работах [7-14]. Прочность корродированных железобетонных элементов при изгибе зависит в основном от доступной для коррозии площади арматурных стержней в растянутой зоне.

В данной статье использованы модели повреждения арматуры, основанные на работах [15-17].

При равномерной коррозии общая площадь арматуры изгибаемого элемента определяется как функция времени t :

$$A_t(t) = \frac{n\pi D^2}{4} \quad (\text{при } t \leq T_i). \quad (1)$$

$$A_t(t) = \frac{n\pi [D - 2v(t - T_i)]^2}{4} \quad (\text{при } t > T_i), \quad (2)$$

где D - диаметр арматурного стержня; n - количество стержней; T_i - время начала коррозии; v - скорость коррозии.

В уравнении (2) учитывается равномерный процесс распространения коррозии со всех сторон на уровне арматурного стержня.

Типичные скорости коррозии арматурной стали v в различных средах сообщалось в последние годы. По [18] обычно скорость коррозии, v является фактором времени случайной переменной и описываются логарифмически нормальным законом распределения со средним значением, $\mu_v = 0,05$ мм/год, и коэффициентом вариации, $V_v = 50\%$. Поскольку скорость коррозии меняется с окружающей средой, нет точных данных для предсказания реальной скорости коррозии. Исходя из средней скорости коррозии, указанных в [18], для охвата большинства случаев, в данном исследовании использованы семь скоростей коррозии 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,10 и 0,12 мм /год.

2.2 Численный эксперимент

Действующие положения норм для проектирования железобетонных конструкций детерминированы, и для учета неопределенности используют частные коэффициенты безопасности. Тем не менее, лучшим способом учета неопределенности в анализе и проектировании конструкции является использование метода оценки надежности [19].

Анализ и проектирование на основе надежности, моделей, расчётных схем рассматривается как вероятностный процесс, где нагрузка и прочность материалов и сечений, представленных в известных или постулируемых распределениях, определены в терминах типа распределения, среднего значения и стандартного отклонения [20,21,22]. Анализ надежности используется для изучения влияния неопределенности при проектировании конструкции.

В этом исследовании рассмотрена потеря несущей способности свободно опертой железобетонной плиты по растянутой зоне [23]. Для оценки функции предельного состояния, использован полувариантный метод надежности первого порядка или метод первых моментов [21].

Точность этого метода можно повысить за счет усреднения по множеству выборок.

Метод анализа зависит от «наиболее вероятной точки» по предельному состоянию

$$G(x) = \phi_r A_t(t) R_{sy} \left[h - a - A_t(t) \frac{R_{sy}}{R_b} \right] - \left[0,125 \phi_e Q_k (\gamma_g a + \gamma_q) L^2 \right], \quad (3)$$

где ϕ_r и ϕ_e являются неопределенностями модели сопротивления и действия нагрузки, соответственно; R_{sy} - характеристическая прочность арматуры; R_b - характеристическая прочность бетона; Q_k - действующая нагрузка; a - отношение постоянной нагрузки к временной, (коэффициент нагрузки); L - пролет балки; h - высота балки; a - защитный слой бетона балки.

Метод надежности первых моментов требует статистику параметров каждого из основных переменных расчета. Статистические параметры включают средние значения, коэффициент вариации и теоретическую модель распределения. Статистические параметры рассматриваемой задачи представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Статистические модели основных расчетных переменных

№	Расчетный параметр	Ед. измерения	Модель распределения	Среднее значение	Коэффициент вариации
1	Модель неопределенности сопротивления	-	Нормальный	1,0	0,05
2	Модель неопределенности нагрузки	-	Нормальный	1,0	0,05
3	Прочность стали	Н/мм ²	Логарифмический	500	0,01
4	Прочность бетона на сжатие	Н/ мм ²	Логарифмический	30	0,05
5	Толщина плиты	мм	Нормальный	150	0,05
6	Рабочая высота плиты	мм	Нормальный	C + D/2	0,05
7	Приложенная нагрузка	кН/м ²	Гумбель	2,0	0,40

Вероятность отказа (разрушения) плиты определяется следующим интегралом свертки [19, 24]

$$P\{\prec 0\} = \iint_{r \prec s} f_R(r) f_s(s) dr ds = \Phi(-\beta), \quad (4)$$

где $\Phi(-\beta)$ - стандартное нормальное распределение для переменной β ; β - индекс надежности, который является мерой стандартного отклонения от среднего расстояния $\mu(Z)$ границы области безопасности до отказа [19,24], заданный значением:

$$\beta = \frac{\mu(Z)}{\sigma(Z)} \quad (5)$$

В этом исследовании, расчет показателей безопасности (индекса надежности) был произведен с помощью разработанного на основе MATLAB компьютерной программы.

3. Результаты и обсуждение

Для железобетонной конструкции, подвергнутой коррозии, инициированной попаданием хлора, использован метод надежности по первым моментам. Показатели надежности были получены с использованием дискретизации по времени. Результаты представлены на рисунках (1 – 5).

На рисунке 1 показана зависимость между индексом надежности и временем действия коррозии для различных скоростей коррозии. Исследуемая плита сначала была спроектирована так, чтобы соответствовать заданному расчетному индексу надежности 3,8 в соответствии с требованиями [25, 26]. При такой расчетной надежности для всех рассмотренных значений скоростей коррозии время воздействия коррозии на железобетон равно нулю. Это показатель надежности при отсутствии коррозии.

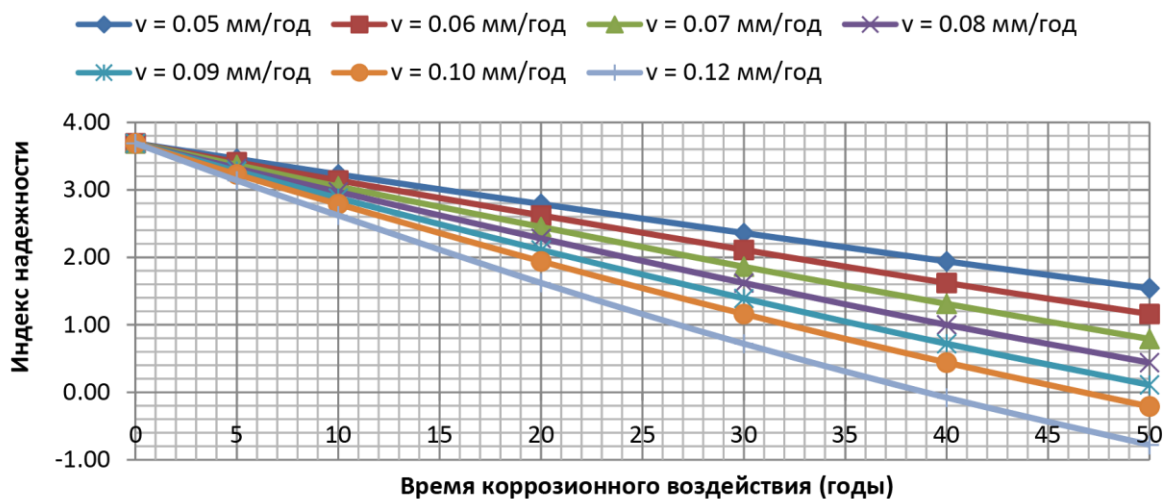


Рисунок 1 - Индекс надежности в зависимости от времени действия коррозии для различных скоростей

Когда начинается коррозия (то есть когда время начала коррозии T_i в годах больше нуля), также устанавливается время воздействия коррозии ($t - T_i$). t - это возраст бетона в годах после заливки. Увеличение времени воздействия коррозии приводит к снижению способности плиты противостоять приложенной нагрузке.

Степень потери несущей способности зависит от скорости коррозии v . Как видно из графика (рисунок 1), потеря несущей способности железобетонного элемента, подверженного коррозии, уменьшается линейно со временем воздействия коррозии. Через 20 лет от начала коррозии индекс надежности (вероятностный показатель несущей способности (прочности) конструкции) падает от расчетного значения 3,8 (при времени воздействия коррозии равном нулю) до 2,7; 2,6; 2,4; 2,3; 2,2; 2,0 и 1,6 при соответствующих скоростях коррозии 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10 и 0,12 мм/год. Соответствующие потери несущей способности составили 29%, 32%, 37%, 40%, 43%, 47% и 58%.

Индекс расчетной надежности 3,8 соответствует 50 -летнему расчетному сроку службы. Когда бетонный элемент (железобетонная плита) 50 лет подвергается эксплуатационной нагрузке то, как и ожидается, сохраняет свою полную несущую способность. Однако, если элемент подвергается воздействию коррозии, зависящей от времени, то показатель надежности постепенно снижается со временем от проектного

значения 3,8 до 1,5; 1,15; 0,7; 0,1; -0,2 и -0,7 при соответствующих скоростях коррозии 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10 и 0,12 мм/год. Это означает, что конструктивный элемент разрушается после 50 лет воздействия коррозии, если скорость коррозии превышает 0,1 мм/год. Поэтому после 50 лет воздействия коррозии при соответствующих скоростях 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10 и 0,12 мм/год, потери несущей способности составляют 60%, 70%, 82%, 97%, 99%, 100% и 100%.

На рисунке 2 представлено изменение надежности железобетонной плиты в зависимости от коэффициента вариации действия нагрузки. График построен для скорости коррозии 0,05 мм/год.

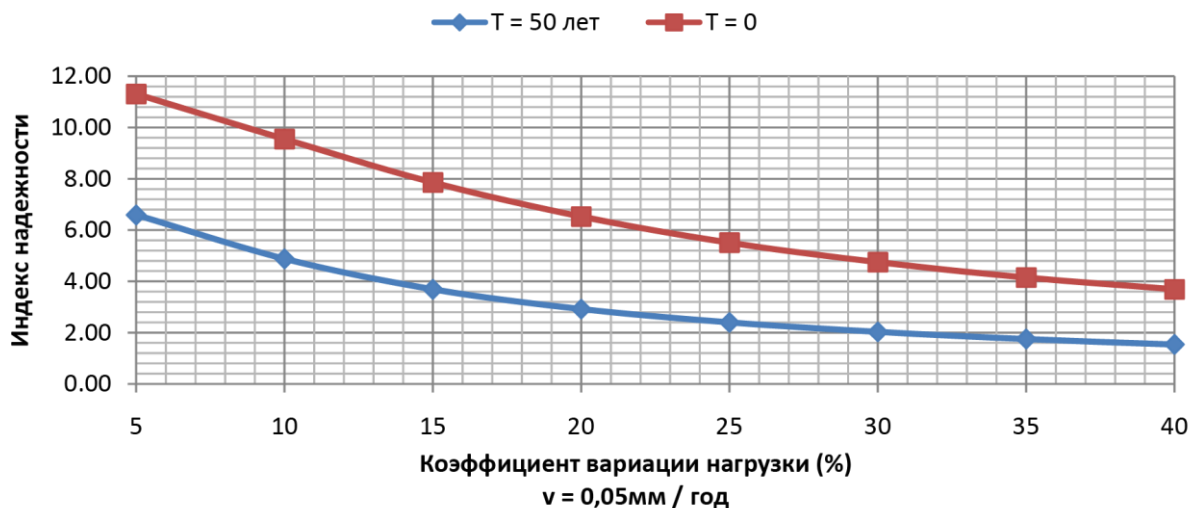


Рисунок 2 - Индекс надежности в зависимости от коэффициента вариации нагрузки

Несущая способность плиты была проверена, когда время воздействия коррозии было равным нулю ($T = 0$), и когда время коррозии было 50 лет ($T = 50$ лет). При вариации нагрузки 5%, значение индекса надежности плиты составляет 6,8 и 11,4 при $T = 0$ и $T = 50$ лет, соответственно. Для всех случаев, индекс надежности отображал нелинейное изменение действия нагрузки. При высоком коэффициенте вариации действия нагрузки (например, 25%), индекс надежности плиты снизился с 11,4 (когда вариация действия нагрузки была 5%) до 5,4 при $T = 50$ лет. Точно так же, при $T = 0$, индекс надежности снизился с 6,8 (при вариации действия нагрузки 5%) до 2,4. Из графика ясно, что помимо коррозии, коэффициент вариации действия нагрузки также оказывает существенное влияние на безопасность железобетонных элементов. Влияние неопределенностей в виде коэффициента вариации может быть зафиксирован только тогда, когда в анализе и расчете используется метод надежности.

Поэтому текущее положение норм, которое является детерминированным, всегда является неизменяемым.

На рисунке 3 показано изменение показателя надежности от коэффициента вариации прочности плиты.

Когда время начала коррозии ноль, показатель несущей способности плиты по надежности составляет 3,8 при вариации прочности 5%. По мере увеличения вариации прочности до 10%, показатель надежности постепенно снижается до 3,3 (при вариации прочности 10%). При 50-летнем времени воздействия коррозии, изменение вариации прочности оказывает незначительное влияние на безопасность плиты.

Однако, большое снижение безопасности плиты наблюдается при 5%-ной вариации прочности при изменении времени воздействия коррозии от нуля (индекс надежности 3,8) до 50 лет (индекс надежности 1,55).

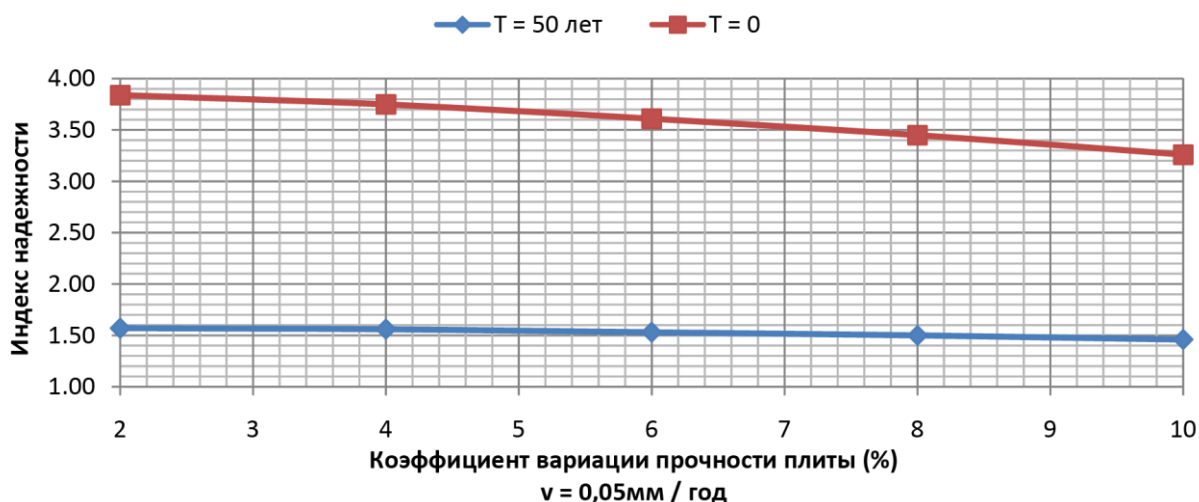


Рисунок 3 - Индекс надежности в зависимости от коэффициента вариации прочности плиты

Это явно указывает на зависящее от времени влияние коррозионного воздействия на железобетонные конструкции. Поэтому к проблеме коррозии железобетона следует отнестись со всей серьезностью, особенно, если конструкция расположена в морской прибрежной среде, где хлор в избытке.

На рисунке 4 показана взаимосвязь между индексом надежности и характеристической прочностью стальной арматуры при нуле и через 50 лет после начала коррозии. Из графиков видно, что показатель надежности линейно возрастает с увеличением характеристической прочности стали. При характеристической прочности стали 500 Н/мм^2 , индекс надежности до начала коррозии составляет 3,8. Однако, после 50 лет коррозии, индекс надежности снизился до 1,5, что указывает на потерю несущей способности более чем на 50%.

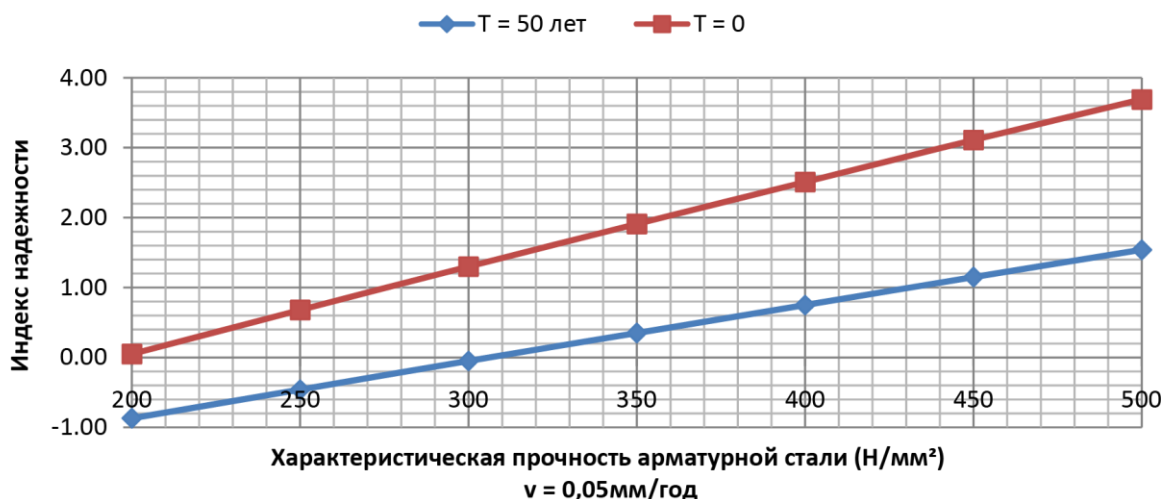


Рисунок 4 - Зависимость индекса надежности от характеристической прочности стали

Кроме того, можно заметить, что через 50 лет после начала коррозии, индекс надежности изменяется от 0 (при характеристической прочности 250 Н/мм^2) до 1,5 (при характеристической прочности 500 Н/мм^2). Это означает, что высокопрочная сталь увеличивает коэффициент надежности железобетонных конструкций, подверженных коррозии.

Рисунок 5 представляет собой график зависимости индекса надежности от отношения постоянной и временной нагрузки до начала и через 50 лет после начала коррозии. При соотношении нагрузки 0,5, показатели надежности перед началом коррозии ($T = 0$) и через 50 лет после начала коррозии 7,0 и 4,0, соответственно.

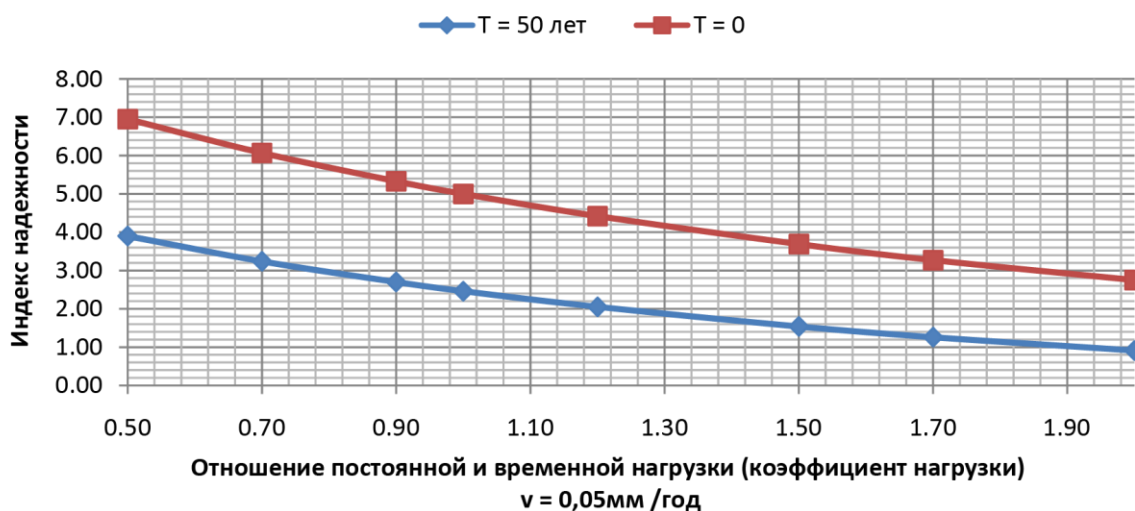


Рисунок 5- Индекс надежности в зависимости от коэффициента нагрузки

По мере увеличения коэффициента нагрузки, надежность несколько нелинейно снижалась. При коэффициенте нагрузки 2,0, соответствующие показатели надежности равны 2,8 и 0,9, соответственно. Следовательно, потеря несущей способности железобетонных конструкций, подверженных коррозии, также зависят от величины соотношения постоянной и временной нагрузок.

Потери несущей способности меньше при низком коэффициенте нагрузки и больше при высоком коэффициенте нагрузки. Поэтому сильно нагруженные железобетонные конструкции подвержены большему риску обрушения из-за коррозии, чем легко нагруженные конструкции.

4 Выводы и рекомендации

В данной работе для оценки железобетонных элементов, подвергнутых коррозии из-за попадания хлора, был использован вероятностный метод.

Чтобы при анализе надежности конструкции учесть влияние коррозии, зависящей от времени, в математической модели потери прочности использовалась функция предельного состояния изгибаемой железобетонной плиты.

Разработанный алгоритм был написан на языке программирования MATLAB.

В работе была проверена надежность железобетонной плиты до и после начала коррозии. Исследование включало проверку последствий изменений во время воздействия коррозии, коэффициент вариации действия нагрузки и сопротивления, характеристическая прочность арматурной стали и соотношение постоянной и временной нагрузок. В заключении, было установлено, что коррозия железобетонных элементов, подвергнутых проникновению хлора, является серьезной проблемой долговечности, которую нельзя игнорировать. Проблема усугубляется наличием неопределенностей из-за случайного характера конструктивных параметров, которые определяют эксплуатационную нагрузку, а также сопротивление конструкции.

Методы расчета железобетонных конструкций, подверженных коррозии, основанные на надежности, также как и метод предельных состояний, должны быть интегрированы в нормативные документы с тем, чтобы полностью учесть неопределенности при проектировании.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта # FSWG-2020-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torres-Acosta, A., and Sagues, A. A. (2004). "Concrete cracking by localized steel corrosion-geometric effects". *ACI Materials Journal*, 101, 501.
2. Tamrazyan A.G., Mineev M.S., Zhukova L.I. Influence of chloride corrosion on probabilistic assessment of bearing capacity of beamless slabs overlap. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XXVIII R-P-S Seminar 2019. 2019. С. 012052.
3. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 4 (80). С. 128-137.
4. Neville A. M., and Brooks J.J. (1994). "Concrete technology". Longman Scientific and Technical, England, 1994.
5. Bordallo-Ruiz A., McNally C., Caprani C.C., and O'Brien E.J. (2007). "The structural reliability of bridges subject to time-dependent deterioration". *Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*.
6. Liu Y., and Weyers, R.E. (1998). "Modelling the time-to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures". *ACI Materials Journal*, 95, 675-681.
7. Frangopol D. M., and Moses F. (1994). "Reliability-based structural optimization. Advances in design optimization". H. Adeli, ed., Chapman and Hall, Ltd., London, England, 492-570.
8. Frangopol D. M., and Hendawi, S. (1994). "Incorporation of corrosion effects in reliability-based optimization of composite hybrid plate girders". *Struct. Safety*, 16 (1,2), 145-169.
9. Thoft-Christensen, P. (2002). "Deterioration of concrete structures". *First International Conference on Bridge Safety and Management*. Barcelona 14-15 July, 1-8.
10. Li C. Q. (2005). "Life cycle modeling of corrosion affected concrete structures-initiation". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (6), 594-601.
11. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 2. С. 19-26.
12. Тамразян А.Г. К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение // *Бетон и железобетон*. 2001. №5. С.8-10.
13. Смоляго Г.А. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций / Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2014. №2. С.22-24.
14. Меркулов С.И. Исследование работоспособности изгибаемых железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений /С.И. Меркулов, Е.Г. Пахомова, А.В. Гордеев, А.С. Маяков // *Известия Курского государственного технического университета*. 2009. № 4. С. 74-78.
15. Lin K.Y., and Frangopol D.M. (1996). "Reliability based optimum design of reinforced concrete girders". *Struct. Safety*, 18 (213), 239-258.
16. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения. *Научное обозрение*. 2015. № 8. С. 87-92.
17. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов /А.И. Васильев // *Бетон и железобетон*. 2000. №2. С. 20-23.
18. Mori Y., and Ellingwood, B.R. (1994). "Maintaining reliability of concrete structures I: Role of inspection/repair". *J. Struct. Engr.*, ASCE, 120 (3), 824-845.
19. Melchers R. E. (2001). "Assessment of existing structures – approaches and research needs". *Journal of Structural Engineering*, 127 (4), 406-411.
20. Дудина И.В., Тамразян А.Г. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления. *Жилищное строительство*. 2001. № 3. С. 8-10.
21. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности. *Вестник МГСУ*. 2012. № 10. С. 109-115.
22. Аскадский А.А., Мацевич Т.А. Новейшие разработки моделей и расчётных схем для количественного анализа физических свойств полимеров // *Успехи физической науки* 190 179–210 (2020).
23. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforce-concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. В сборнике: *MATEC Web of Conferences*. 2017. С. 00162.

24. Ditlevsen, O., and Madsen, H.O. (2005). "Structural Reliability Methods". Internet Edition.
25. Eurocode 2. (2008). "Design of reinforced concrete structures, part 1-1, general rules and rules for buildings". CEN, Brussels.
26. СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85

REFERENCES

1. Torres-Acosta A., and Sagues A. A. (2004). "Concrete cracking by localized steel corrosion-geometric effects". *ACI Materials Journal*, 101, 501.
2. Tamrazyan A.G., Mineev M.S., Zhukova L.I. Influence of chloride corrosion on probabilistic assessment of bearing capacity of beamless slabs overlap. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XXVIII R-P-S Seminar 2019. 2019. С. 012052.
3. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 4 (80). С. 128-137.
4. Neville A. M., and Brooks, J.J. (1994). "Concrete technology". Longman Scientific and Technical, England, 1994.
5. Bordallo-Ruiz A., McNally C., Caprani C. C., and O'Brien, E. J. (2007). "The structural reliability of bridges subject to time-dependent deterioration". *Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*.
6. Liu Y., and Weyers R.E. (1998). "Modelling the time-to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures". *ACI Materials Journal*, 95, 675-681.
7. Frangopol D. M., and Moses F. (1994). "Reliability-based structural optimization. Advances in design optimization". H. Adeli, ed., Chapman and Hall, Ltd., London, England, 492-570.
8. Frangopol D. M., and Hendawi S. (1994). "Incorporation of corrosion effects in reliability-based optimization of composite hybrid plate girders". *Struct. Safety*, 16 (1,2), 145-169.
9. Thoft-Christensen P. (2002). "Deterioration of concrete structures". *First International Conference on Bridge Safety and Management*. Barcelona 14-15 July, 1-8.
10. Li C. Q. (2005). "Life cycle modeling of corrosion affected concrete structures-initiation". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (6), 594-601.
11. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhении. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. № 2. S. 19-26.
12. Tamrazyan A.G. K otsenke riska chrezvychaynykh situatsiy po osnovnym priznakam yego proyavleniya na sooruzheniye // *Beton i zhelezobeton*. 2001. №5. S.8-10.
13. Smolyago G.A. Issledovaniye aspektov khloridnoy korrozii zhelezobetonnykh konstruksiy / Smolyago G.A., Kryuchkov A.A., Drokin S.V., Dronov A.V. // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2014. №2. S.22-24.
14. Merkulov S.I. Issledovaniye rabotosposobnosti izgibayemykh zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom korrozionnykh povrezhdeniy / S.I. Merkulov, Ye.G. Pakhomova, A.V. Gordeyev, A.S. Mayakov // *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. № 4 .S.74-78.
15. Lin K.Y., and Frangopol, D.M. (1996). "Reliability based optimum design of reinforced concrete girders". *Struct. Safety*, 18 (213), 239-258.
16. Tamrazyan A.G., Manayenkov I.K. K raschetu ploskikh zhelezobetonnykh perekrytiy s uchetom fakticheskoy zhestkosti secheniya. *Nauchnoye obozreniye*. 2015. № 8. S. 87-92.
17. Vasil'yev A.I. Otsenka korrozionnogo iznosa rabochey armatury v balkakh proletnykh stroyeniy avtodorozhnykh mostov / A.I. Vasil'yev // *Beton i zhelezobeton*. 2000. №2. S.20-23.
18. Mori Y., and Ellingwood B. R. (1994). "Maintaining reliability of concrete structures I: Role of inspection/repair". *J. Struct. Engr., ASCE*, 120 (3), 824-845.
19. Melchers R. E. (2001). "Assessment of existing structures – approaches and research needs". *Journal of Structural Engineering*, 127 (4), 406-411.
20. Dudina I.V., Tamrazyan A.G. Obespecheniye kachestva sbornykh zhelezobetonnykh konstruksiy na stadii izgotovleniya. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2001. № 3. S. 8-10.
21. Tamrazyan A.G. Raschet elementov konstruksiy pri zadannoy nadezhnosti i normal'nom raspredelenii nagruzki i nesushchey sposobnosti. *Vestnik MGSU*. 2012. № 10. S. 109-115.
22. Askadskiy A.A., Matseyevich T.A. Noveyskiye razrabotki modeley i raschetnykh skhem dlya kolichestvennogo analiza fizicheskikh svoystv polimerov // *Uspekhi fizicheskoy nauki* 190 179–210 (2020).
23. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. В сборнике: МАТЕС Web of Conferences. 2017. С. 00162.
24. Ditlevsen O., and Madsen H. O. (2005). "Structural Reliability Methods". Internet Edition.

25. Eurocode 2. (2008). "Design of reinforced concrete structures, part 1-1, general rules and rules for buildings". CEN, Brussels.
26. SP 28.13330.2017 Zashchita stroitel'nykh konstruksiy ot korrozii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.11-85.

Информация об авторах:

Тамразян Ашот Георгиевич

Национальный исследовательский «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Мацевич Татьяна Анатольевна

Национальный исследовательский «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доктор физико-математических наук, заведующая кафедрой Высшей математики.
E-mail: matseevichita@mgsu.ru

Information about the authors:

Tamrazyan Ashot G.

Moscow National Research "Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor, Head of the department of Reinforced concrete and masonry structures.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Matseevich Tatiana An.

National Research "Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia,
doctor of physics and mathematics Sciences, Head of the department of Higher Mathematics.
E-mail: matseevichita@mgsu.ru