

УДК 624.21

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Р. Ю. ДОЛОМАНЮК, аспирант, С. В. ДАШКЕВИЧ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Сформулирована общая проблема долговечности железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) мостовых сооружений. Поставлена задача исследований. Предложен алгоритм оценки долговечности ЖБЭ и ЖБК мостов на стадии проектирования. Он позволяет прогнозировать их ресурс в зависимости от физико-механических свойств бетона и стальной арматуры, условий эксплуатации.

Введение. Для Республики Беларусь, входящей в Единую транспортную систему Европы и имеющей на своей территории около 6,5 тыс. мостов, обеспечение их бесперебойной работы является важнейшей государственной задачей.

Согласно отечественным нормам [1], срок службы железобетонных мостов и путепроводов должен составлять 100 лет. Однако практика эксплуатации мостовых сооружений в Республике Беларусь показывает, что наибольшее коррозионное воздействие на железобетон оказывают хлориды щелочных и щелочноземельных металлов, широко используемые в реагентах на дорогах в зимний период (более 250 тыс. тонн ежегодно). Традиционные конструкции, материалы и технологии устройства мостового полотна не обеспечивают требуемой гидроизоляции и восприятия динамического воздействия транспорта, в результате этого несущие конструкции мостов и путепроводов приходят в аварийное состояние или выходят из строя уже после 30–35 лет эксплуатации, а в некоторых случаях и раньше [2].

Считается, что обеспечить заданный срок службы можно путем соблюдения определенных нормативных конструктивных требований (минимально допустимое значение защитного слоя бетона, водоцементного отношения, расхода цемента, минимальной открытой пористости, максимальной плотности, и т.д.). Однако срок службы не закладывается в расчеты на этапе проектирования, т.е. не существует нормативного алгоритма, позволяющего четко определить долговечность мостового сооружения при его проектировании. Таким образом, существующие нормы обеспечивают только мгновенную надежность конструкций мостовых сооружений в момент их возведения, а происходящие в дальнейшем изменения несущей способности под воздействием внешних факторов, а также изменяющийся характер временной подвижной нагрузки не учитываются.

В последние десятилетия в зарубежной инженерной практике, наряду с конструкционным проектированием строительных железобетонных конструкций, все чаще используются термины «durability design» или «service life design» [3–5], что можно перевести как проектирование долговечности или срока службы.

Данный подход направлен на определение времени наступления предельного состояния железобетонной конструкции при помощи специальных алгоритмов, позволяющих прогнозировать процесс деградации конструкции с определенной степенью точности и при необходимости корректировать проектные решения для достижения требуемого срока службы.

В мировой мостостроительной практике можно выделить два основных подхода к прогнозированию долговечности мостов. Первый основывается на введении функции деградации конструкций мостов. Данная функция описывает изменение функциональных характеристик сооружения во времени при определенных исходных данных (геометрические размеры конструкции, физико-механические свойства бетона и стальной арматуры). Для использования такого подхода необходимо большое число опытных данных – в данном случае результатов обследования мостовых сооружений специальной службой инспекции.

Второй подход базируется на прогнозировании изменения состояния стальной арматуры в бетоне с точки зрения физико-химических процессов, протекающих в конструкции под воздействием меняющихся факторов окружающей среды с учетом влияния транспортных нагрузок.

Большинство прогнозов основываются на известной модели коррозии стальной арматуры в бетоне, предложенной К. Tuutti [6]. В этой работе автор рассматривает длительность процесса повреждения арматуры в бетоне как сумму двух этапов: периода иницирования коррозии t_{in} (initiation period) и периода развития коррозии арматуры t_{prop} (propagation period). Под периодом иницирования коррозии понимается срок, в течение которого защитный слой бетона выполняет пассивирующие функции по отношению к стальной арматуре. Этот период сопровождается проникновением и накоплением хлоридов в бетоне, а также диффузией углекислого газа в бетон, обуславливающей его карбонизацию и уменьшение показателя рН поровой влаги. Конец периода иницирования связан с достижением фронта карбонизации поверхности арматуры или накоплением у ее поверхности критического содержания хлоридов или раскрытием трещины критической ширины, вызывающих начало коррозии стальной арматуры.

Период развития коррозии – срок от начала депассивации защитного слоя арматуры, в течение которого происходит ее интенсивное корродирование вследствие изменения температурно-влажностного режима, воздействия кислорода воздуха и растворов агрессивных веществ (хлоридов) с накоплением продуктов коррозии, до наступления предельного состояния, выбор которого зависит от типа конструкции и условий ее эксплуатации.

Основная часть. Целью работы является разработка алгоритма, позволяющего прогнозировать срок службы железобетонных пролетных строений мостов и путепроводов на стадии проектирования.

Предлагаемая модель деградации пролетных строений основывается на прогнозе коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне согласно [6] с выделением двух временных фаз: инициирования (t_{in}) и развития коррозии стальной арматуры (t_{prop}).

Модель рассматривает следующие виды граничных состояний:

- начало коррозии стальной арматуры;
- появление и раскрытие продольных трещин на предельно допустимую ширину;
- уменьшение площади сечения стальной арматуры на предельно допустимую величину.

Она основывается на известной модели состояния арматуры в бетоне К. Tuutti. Срок службы конструкций мостовых сооружений предлагается оценивать следующим уравнением [2]:

$$T = t_0 + t_{corr}, \quad (1)$$

где T – срок службы элемента (конструкции), лет; t_0 – время депассивации стальной арматуры (фаза инициирования коррозии), лет; t_{corr} – время активной коррозии стальной арматуры (фаза развития коррозии), лет.

Период инициирования коррозии стальной арматуры. Процессы диффузии углекислого газа и хлоридов в бетоне математически описываются классическими уравнениями аналитической теории диффузии (уравнения первого и второго законов Фика). Решая эти дифференциальные уравнения при определенных начальных условиях, получены выражения для определения времени инициирования стальной арматуры в результате карбонизации защитного слоя бетона t_{carb} , и накопления критической концентрации хлоридов у поверхности стальной арматуры t_{Cl} , лет:

$$t_{carb} = \frac{X_c^2}{2k_w^2 k_F^2 D_{CO_2} a^{-1} (c_1 - c_2)}, \quad (2)$$

где X_c – толщина защитного слоя бетона, м; k_w – коэффициент, учитывающий влияние погодных условий,

$$k_w = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w, \quad (3)$$

t_0 – время определения начальных физико-механических свойств бетона (28 дней), лет; t – время карбонизации, лет; w – показатель степени,

$$w = 0,5 \left(\frac{N_w}{365} \right)^{0,446}; \quad (4)$$

N_w – число дней в году с осадками более 2,5 мм.

k_F – коэффициент влияния морозной деструкции,

$$k_F = \frac{1}{\left(1 - \frac{0,1}{F} \right)^{N_{Ft}}}, \quad (5)$$

N_F – число циклов "замораживания – оттаивания" в год; t – время, лет; F – марка бетона по морозостойкости; D_{CO_2} – коэффициент диффузии CO_2 в бетоне, m^2/c ; C_1, C_2 – соответственно, содержание диоксида углерода на внешней поверхности бетона и на границе карбонизации (бесконечно малая величина), kg/m^3 ; a – реакционная емкость бетона (количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации цемента), kg/m^3 .

$$t_{Cl} = \frac{X_c^2}{4D_{Cl} \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{crit}}{C_s} \right) \right)^2}, \quad (6)$$

где D_{Cl} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, m^2/c ; $\operatorname{erf}()$ – функция ошибок Гаусса; C_s и C_{crit} – соответственно концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного слоя и критическая концентрация хлоридов на поверхности арматуры, % по массе цемента.

Коэффициент диффузии хлоридов в бетоне

$$D_{Cl} = D_{Cl_0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^a, \quad (7)$$

где D_{Cl_0} – начальный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне в возрасте $t_0 = 28$ суток, m^2/c ; a – показатель степени.

$$D_{Cl_0} = 10^{(-12,06 + 2,4w/c)}; \quad (8)$$

$$a = 3w/c - 0,6, \quad (9)$$

где w/c – водоцементное отношение.

Период активной коррозии стальной арматуры. Выход из строя железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) пролетных строений возможен при различных граничных состояниях стальной арматуры. Поэтому период активной коррозии стальной арматуры необходимо определять исходя из назначенных видов ее граничных состояний.

1-й случай – коррозия стальной арматуры не допускается. Тогда $t_{corr} = 0$. Срок службы ЖБЭ (ЖБК) определяется значением периода депассивации стальной арматуры $T = t_{corr}$.

2-й случай – появление и развитие продольных трещин до предельных значений:

$$t_{corr} = t_{crit}.$$

Для случая образования трещин шириной раскрытия до 1 мм

$$a_{cr} = 0,05 + 0,0125 (X_{corr} - X_{corr,0}), \quad (10)$$

где a_{cr} – ширина раскрытия трещины, мм; X_{corr} – глубина коррозионного повреждения стальной арматуры, мм

$$X_{corr} = v_{corr} \alpha_{pit} t, \quad (11)$$

где v_{corr} – скорость коррозии стальной арматуры, мм/год; α_{pit} – питтинговый фактор, учитывающий характер коррозии; при поверхностной коррозии вследствие карбонизации $\alpha_{pit} = 2$; t – время, лет.

$$v_{corr} = v_{corr,a} \cdot \frac{N_w}{365}, \quad (12)$$

где $v_{corr,a}$ – средняя скорость коррозии стальной арматуры, мм/год, определяемая условиями эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Средняя скорость коррозии стальной арматуры в железобетоне $v_{corr,a}$ в различных условиях эксплуатации

Коррозионное состояние	Условия эксплуатации	$v_{corr,a}$, мм/год
Общая коррозия при карбонизации	На открытом воздухе	0,005
	В помещении	0,002
Питтинговая коррозия	Сухие	0,004
	Переменная влажность	0,03
	В воздухе над морской водой	0,03
	Зона периодического смачивания	0,07

Глубина коррозионного повреждения стальной арматуры, соответствующая началу образования трещин, $X_{corr,0}$, мм. Определяется эмпирическим выражением:

$$X_{corr,0} = 83 + 7,4 \frac{d_{cover}}{D} - 22,6R_{b,sh}, \quad (13)$$

где d_{cover} – толщина защитного слоя бетона, мм; D – диаметр арматуры, мм; $R_{b,sh}$ – прочность бетона на скалывание при изгибе, МПа.

Срок службы ЖБЭ (ЖБК) определяется значением периода депассивации стальной арматуры и раскрытия трещин до граничных значений $T = t_{cor} + t_{crit}$.

3-й случай – уменьшение площади сечения стальной арматуры до критических значений:

$$t_{corr} = t_{prop}$$

В процессе коррозии стали в железобетоне происходит уменьшение диаметра (площади сечения) стальной арматуры и снижение ее механических характеристик (предела прочности при растяжении, деформативности). Таким образом, задавшись величиной критического уменьшения площади поперечного сечения стальной арматуры, используя формулу (11), можно определить время наступления критического повреждения коррозией стальной арматуры.

Срок службы ЖБЭ (ЖБК) определяется значением периода депассивации стальной арматуры и ее коррозии до граничных значений уменьшения площади поперечного сечения $T = t_{cor} + t_{prop}$.

Заключение. Модель прогноза долговечности железобетонных элементов мостовых сооружений на стадии проектирования позволяет прогнозировать их сроки службы в виде функции времени в зависимости от физико-механических свойств бетона и стальной арматуры, условий эксплуатации.

Получено 26.04.2018

A. A. Vasilyev, R. Yu. Dolomanjuk, S. V. Dashkevich. Model of prediction of longevity of reinforce-concrete flight structures of bridges and overpasses.

The general issue of longevity of reinforce-concrete elements and constructions of bridge building is set. The problem of researches is set. The algorithm of estimation of longevity of reinforce-concrete elements and constructions of bridges and overpasses on the stage of planning is offered. It allows to predict their resource depending on physical and mechanical properties of concrete and gagers and operation conditions.

Она учитывает различные граничные состояния стальной арматуры, что дает возможность рассматривать различные стратегии эксплуатации мостовых сооружений.

Список литературы

1 Мосты и трубы. Строительные нормы проектирования = Мосты і трубы Будаўнічыя нормы праектавання : ТКП 45-3.03-232-2011 (02250). – Введ. впервые (с отменой на территории Республики Беларусь СНиП 2.05.03-84). – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2011. – 162 с.

2 **Доломанюк, Р. Ю.** Детерминированный анализ и оценка проблем аварийности мостов как фактор увеличения надежности и долговечности мостовых конструкций / Р. Ю. Доломанюк, К. В. Махаев // Вестник современных исследований : электронное научно-практическое периодическое издание. – 2017. – № 11-1 (14). – С. 25–33.

3 DuraCrete 7: General guidelines for durability design and redesign / The European Union – Brite EuRam III. – Project No. BE95-1347 ; Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures. – Report No. T7-01-1. – 1999.

4 **Lay, S.** Service Life Models / S. Lay, P. Schießl, J. Cairns // Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability: LIFECON // Technical Research Centre of Finland. – 2003. – 169 p.

5 **Edvardsen, C.** DuraCrete – A Guideline for Durability-Based Design of Concrete Structures / C. Edvardsen, L. Mohr // Symposium, Structural concrete: the bridge between people. – Prague, 1999. – P. 425–432.

6 **Tuutti, K.** Corrosion of steel in concrete: dissertation / K. Tuutti ; Stockholm University. – Stockholm, 1982. – 468 p.