

В ПОИСКАХ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

This paper presents an approach to the service life modeling of bridges reinforced concrete elements. Three degradation models are presented. The possibility of the proposed model is discussed.

Keywords: service life, service life prediction, reinforced concrete element, bridge.

В статті представлені теоретичні засади моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів. Показано три моделі життєвого циклу.

Можливості наведених моделей обговорюються.

Ключові слова: життєвий цикл, прогноз життєвого циклу, залізобетонний елемент, міст

В статье представлены теоретические основы моделирования жизненного цикла железобетонных элементов мостов. Показано три модели жизненного цикла. Обсуждаются возможности приведенных моделей.

Ключевые слова: жизненный цикл, прогноз жизненного цикла, железобетонный элемент, мост

Проблема. Статья посвящена проблеме моделирования ресурса железобетонных элементов автодорожных мостов. Проблема оценки ресурса автодорожных мостов стала особенно актуальной для Украины в последние 20 – 25 лет. Приходится констатировать, что сейчас стремительно растет количество физически устаревших сооружений. В этих условиях, для безаварийной эксплуатации и продления ресурса сооружений, нужны новые научные подходы к оценке и прогнозу технического состояния элементов мостов на всех стадиях жизненного цикла. Нужны алгоритмы, которые дали бы количественные критерии уровня надежности и прогноза ресурса элементов.

С этой проблемой сталкиваются все страны, но для Украины сегодня проблема становится особо значимой в силу ряда неблагоприятных причин. Среди них тяжелое экономическое и финансовое состояние страны, угрожающее техническое состояние транспортных сооружений, одно из последних мест в Европе по развитию дорожной сети.

Долгое время проблема долговечности сооружений была уделом академических кругов. В нормах проектирования мостов термин «долговечность» не фигурировал вообще. И только, начиная с 2006 года, с принятием национального нормативного документа проектирования мостов [9] были декларированы сроки службы определяющих несущих элементов – 100 лет. Считается, что такой ресурс должны иметь железобетонные мосты, запроектированные в соответствии с нормативными требованиями [9]. Этот срок службы в 100 лет фигурирует также нормах Европейского Союза [24]. Исследования же, подтверждающие ресурс в 100 лет нам не известны. Поэтому в нормах 2009 года, опираясь на анализ долговечности мостов Украины, проектный срок службы железобетонных мостов принят 70 лет для сборных, 80

– для сборно-монолитных и 100 лет для монолитных [8].

В действительности сегодня мы видим, что средний срок службы железобетонных пролетных строений мостов Украины не превышает 45 – 50 лет. Так на дорогах государственного значения в четвертом эксплуатационном состоянии находится почти 21% железобетонных пролетных строений автодорожных мостов, их средний возраст составляет 45 лет. (Заметим, что 82% автодорожных мостов находится на местных дорогах и их техническое состояние несколько хуже).

Снижение реального среднего срока службы железобетонных пролетных строений мостов до 50 – 60 лет констатируется также во многих странах мира. В работе [26] указывается, что среднее время жизненного цикла железобетонных мостов Японии установлено Министерством финансов – 60 лет.

В чем причина снижения ожидаемого ресурса? Для Украины мы называем, прежде всего, отсутствие системы эксплуатации и низкое качество строительства. Однако этого нельзя сказать о странах Европы или Японии, где действует четкая система эксплуатации мостов. Очевидно, что кроме названных, есть также и другие объективные причины. Мы считаем, что в значительной степени снижение долговечности закладывается еще на стадии изыскания и проектирования сооружения. Действительно, в современном аппарате проектирование железобетонных элементов (и не только мостов!) нет никаких рычагов управления долговечностью. Срок службы железобетонных мостов назначается директивно, расчетные зависимости проверки сечений не имеют переменных времени, проблема долговечности остается полностью в плоскости опыта и интуиции проектировщика.

В то же время проблема долговечности железобетонных элементов является предметом изучения большого количества научных работников, в том числе и украинских [11, 12, 13, 16, 22, 25]. Мы считаем, что сегодня есть насущная необходимость в объединении научного базиса исследований деградации железобетона с требованиями правил проектирования, правил строительства и эксплуатации для того что бы получить теоретические модели оценки ресурса железобетонных элементов мостов. Эти модели должны стать основой в разработке практического аппарата управления жизненным циклом мостов.

Цель работы. Этой работой автор намеревается привлечь внимание научных работников и проектантов к проблеме прогноза ресурса железобетонных элементов мостов на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования, и изложить перспективные, по мнению автора, подходы к решению задачи прогноза долговечности. Модели прогноза, которые приводятся здесь, анализируются и рассматриваются с точки зрения возможности их приложения в практике проектирования железобетонных элементов мостов для оценки ресурса.

Модель классической теории вероятностей. В теории вероятностей понятие долговечности неразрывно связано с определением надежности, как вероятности отказа. Распределение случайной величины T - времени жизненного цикла в эксплуатации (ресурс) выражается через функцию надежности $P(t)$. Если

эксплуатация элемента прекращается после первого отказа, функция распределения долговечности $F(t)$ определяется зависимостью [3]

$$F_T(t) = 1 - P(t)|_{t=T}, \quad (1)$$

Среднее время жизненного цикла определяется интегрированием частоты отказов

$$T = \int_0^{\infty} t p(t) dt, \quad (2)$$

где $p(t)$ - частота отказов,

$$p(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (3)$$

Интегрируя (2) по частям и используя зависимость (3), получим

$$T = -tP(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (4)$$

Первый элемент интеграла (4) равен нулю, т.к. функция надежности $P(t)$ (разность $1 - F_T(t)$) при $t \rightarrow \infty$ убывает быстрее, чем растет t . Окончательно получим

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (5)$$

Функцию надежности получим, как вероятности редких событий [3, 19]

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right], \quad (6)$$

где $\lambda(\tau)$ - случайная функция интенсивности отказов, в терминологии [27] – временная оценка превышения граничного состояния.

Функция надежности в зависимости (6) представляет собой вероятность того, что граничное состояние не будет превышено в течение времени t ни разу. Функция интенсивности отказов $\lambda(\tau)$ находится как вероятность того, что граничное состояние не будет превышено в интервале времени $[t, t + dt]$ при $dt \rightarrow 0$, т.е.

$$\frac{P(t \leq T \leq t + dt)}{1 - P(T \leq t)} \quad (7)$$

или
$$\lambda(t) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)}, \quad (8)$$

где T – время жизненного цикла, проектный ресурс; $f_T(t)$ – плотность распределения времени жизненного цикла T ; $F_T(t)$ – функция распределения времени жизненного цикла T .

Формулой (8) устанавливается соответствие между интенсивностью отказов $\lambda(\tau)$ и заданным законом распределения.

Таким образом, классическая модель оценки ресурса элемента описывается зависимостями (5), (6) и (8). Практическая реализация модели может строиться по таким алгоритмам:

- численное интегрирование (5) с аналитической функцией надежности $P(t)=f(X_i, \lambda(t), t)$, где X_i – вектор параметров, определяющих напряженно деформированное состояние, физико-механические свойства и условия эксплуатации элемента. Это достаточно универсальный подход, но построение функции надежности здесь является весьма сложной задачей;

- численное интегрирование (5) с функцией $\lambda(\tau)$ интенсивности отказов построенной по гистограммам времени выхода из строя элементов в процессе эксплуатации. Построение функции $\lambda(\tau)$ в этом случае не представляет сложности, но значительно сужает аппарат управления ресурсом на стадии проектирования;

- статистическое моделирование (5) с заданием всех функций распределения $F_i(t)$ для параметров, определяющих долговечность элемента.

Феноменологическая стохастическая модель жизненного цикла. Износ элемента сооружения здесь описывается *марковским дискретным процессом с непрерывным временем* [6]. Рассматривается процесс с качественными состояниями. Роль случайной переменной здесь играет случайное дискретное состояние системы.

Будем полагать, что элемент находится последовательно в состояниях S_1, S_2, \dots, S_n , а переходы из одного дискретного состояния в другое осуществляются в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_{n-1} .

В нашей модели определяющие зависимости получены, следуя графу в которых блуждание по дискретным состояниям осуществляется только в одном направлении: от состояния с меньшим, к состоянию большему номером.

В терминах дискретного марковского процесса задача сводится к поиску безусловных вероятностей пребывания системы **S** на произвольном шаге k в состоянии S_i :

$$p_i(k) = \text{Prob}[S(k) = S_i]; k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (9)$$

Искомые вероятности марковской цепи $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ – функции времени являются вероятностями того, что система в момент t находится в состоянии S_i . и определяются из системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными, в общем случае, коэффициентами. Это известные уравнения Колмогорова - Чепмена, описывающие эволюцию дискретного марковского процесса с непрерывным временем.

В матричной форме уравнения имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}(t), \quad (10)$$

где $\mathbf{P}(i, t)$ - матрица вероятностей перехода; $\mathbf{E}(t)$ - матрица интенсивности переходов (интенсивность отказов) $\lambda(t)$

После того, как определены надежности в каждом из дискретных состояний k – модель жизненного цикла элемента описывается как процесс Пуассона с дискретными состояниями и непрерывным временем. Это частный случай марковского процесса, дающий возможность описать модель нелинейным уравнением - экспоненциальной функцией времени.

Интегральная функция распределения $P(t)$ для времени T_n , которое пройдет пока состоятся все n событий процесса, имеет вид:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (11)$$

где $P(t)$ – вероятность того, что элемент перейдет в состояние k в течение времени $t < T_n$; λ - параметр процесса – интенсивность отказов.

Из функции (11) при $k = 5$, модель жизненного цикла элемента описывается уравнением:

$$P(t) = 1 - 0,0083 (\lambda t)^5 \exp(-\lambda t) \quad (12)$$

Таким образом, зависимостью (12), при заданной интенсивности отказов λ , устанавливается связь между надежностью элемента P_i в i -м дискретном состоянии и временем t , которое прошло от начала эксплуатации до состояния $i = 2, 3, 4, 5$.

Заметим, что модель (10), (12) в предположении $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E} = const$ и специфической процедурой определения параметра процесса λ в матрице \mathbf{E} [13] послужила основой для создания нормативного документа по оценке остаточного ресурса элементов мостов находящихся в эксплуатации [10].

В этой модели, единственным параметром управления является постоянная интенсивность отказов λ . Очевидно, что одного параметра недостаточно для управления жизненным циклом железобетонных мостов.

Поэтому здесь для оценки ресурса на стадии проектирования предлагается интегральная функция распределения $P(t)$ времени T_n , включающая дополнительные параметры, характеризующие процесс:

$$P(\lambda, t) = 1 - 0,008333 a^5 \exp(-a) \left[\frac{1}{H_0 \exp(-H_1^2 a^2) + H_2} \right] \quad (13)$$

где $a = \lambda t$ – параметр процесса деградации; H_0, H_1, H_2 - функции, которые зависят от коэффициентов – характеристик элемента и окружающей среды m_i . Коэффициентов принято пять: m_1 - коэффициент водо-цементного отношения бетона; m_2 – коэффициент типа армирования железобетонного элемента; m_3 – коэффициент типа статической схемы элемента в сооружении; m_4 – коэффициент технологии сооружения; m_5 – коэффициент условий окружающей среды.

Предлагаемая модель может быть достаточно эффективной для прогноза ресурса на стадии проектирования, однако потребуется большая исследовательская работа по обоснованию ее коэффициентов.

Детерминистическая модель жизненного цикла. Научная идея на которой базируется детерминистическая модель жизненного цикла, заключается в следующем: прогноз ресурса железобетонного элемента определяется, как сумма времени деградации защитного слоя T_1 и времени коррозии арматуры до критического уровня - T_2

$$T = T_1 + T_2 \quad (14)$$

Другими словами, модель прогноза ресурса состоит из двух моделей: модели деградации бетона защитного слоя и модели коррозии арматуры. При

этом принимается гипотеза, что в течение времени деградации бетона защитного слоя до критического уровня, арматура не корродирует.

Модель деградации защитного слоя бетона представляется общими законами аналитической теории диффузии, известными как уравнение первого и второго законов Адольфа Фика [14]. Первым из них определяется время карбонизации T_c , вторым – время насыщения защитного слоя хлоридами T_{cl} .

Процесс деградации защитного слоя описывается одномерным дифференциальным уравнением первого закона Фика:

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (15)$$

где Q – количество перенесенного в результате диффузии углерода, так называемая, плотность диффузионного потока; $C = C(x, t)$ – концентрация диффундирующего вещества, функция координаты x и времени t ; D – коэффициент диффузии газа в бетоне.

Решение дифференциального уравнения (15) известно [14]. Мы воспользуемся решением при допущениях, что концентрация углерода линейно изменяется по толщине защитного слоя бетона и градиент концентрации является постоянным. Получим глубину карбонизации в функции времени:

$$d_c = \left(\frac{2DCt}{m_0} \right)^{0,5}, \quad (16)$$

где d_c – глубина карбонизации в направлении координаты x , нормальной к поверхности бетона; m_0 – реакционная способность бетона, функция свойств и количества цемента в бетоне.

Модель деградации защитного слоя бетона (15), (16) является феноменологической, ее параметры D , m_0 определяются экспериментально [1], [20].

Время прогноза полной карбонизации защитного слоя определяется из зависимости (13) при $d_c = a$:

$$T_c = \frac{a^2 m_0}{2D(C_S - C_I)} \quad (17)$$

где a – толщина защитного слоя; C_S – концентрация CO_2 на поверхности защитного слоя бетона; C_I – начальное содержание CO_2 в бетоне.

Решение (16) в документе [23] дополнено коэффициентами, которые более полно отображают свойства бетона и условия эксплуатации:

$$d_c = \left(\frac{2k_1 k_2 k_3 D C t}{m_0} \right)^{0,5} \quad (18)$$

где k_1 – параметр среднего содержания влаги в бетоне; k_2 – параметр условий эксплуатации; k_3 – коэффициент, зависящий от водоцементного отношения.

Деградация защитного слоя бетона под воздействием хлоридов характеризуется разрушением пассивирующего слоя арматуры, когда возле ее поверхности накапливается определенное критическое количество хлоридов. Ионы хлоридов, которые всегда присутствуют в окружающей среде, проникают

через защитный слой по капиллярной системе и по микротрещинам. Процесс диффузии хлоридов описывается дифференциальным уравнением второго закона Фика [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (19)$$

где $C = C(x,t)$ - концентрация ионов хлорида на глубине x во время t ; D - коэффициент диффузии хлоридов в бетоне; t - время; x - координата нормальная к поверхности бетона.

Уравнение (6) при граничных и начальных условиях $C(x,t) = C_S$ для $x = 0$, $t > 0$ и $C(x,t) = C_I$ для $x > 0$, $t = 0$ и постоянном коэффициенте диффузии хлоридов в бетоне имеет решение

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right], \quad (20)$$

где $\operatorname{erf}()$ - функция ошибок; C_I - начальное содержание хлоридов в бетоне; C_S - концентрация хлоридов на поверхности защитного слоя бетона.

Решение (20) устанавливает связь глубины проникновения хлоридов со временем

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right) \right)} \right]^2, \quad (21)$$

где $\operatorname{erfc}()$ - дополнительная функция ошибок.

В работе [0] показано, что учет предельных и начальных условий при $x > 0$, $t = 0$ концентрация ионов хлорида $C(x,t) = C_I$ в решении дифференциального уравнения (19) является излишним, в силу малости C_I по сравнению с концентрацией хлоридов на поверхности защитного слоя бетона C_S . В этом случае решение уравнения (19) несколько упрощается и время прогноза насыщения хлоридами защитного слоя бетона до критического значения C_{cr} определяется формулой:

$$T_{cl} = \frac{1}{D} \left[\frac{a}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_S} \right) \right)} \right]^2 \quad (22)$$

Зависимостями (17) и (21-22) определяется время прогноза деградации защитного слоя бетона:

$$T_1 = T_c \text{ при } T_c < T_{cl}; T_1 = T_{cl} \text{ при } T_{cl} < T_c \quad (23)$$

Что касается времени коррозии арматуры T_2 то эта проблема сегодня достаточно изучена. Есть большое количество работ, как например [5,7], что позволяют достаточно достоверно определить времени коррозии арматуры до критического уровня - ее ресурс.

Приведенная детерминистическая модель жизненного цикла имеет ряд недостатков, таких как невозможность учета напряженно деформированного состояния защитного слоя бетона, недостаточно изучен коэффициент диффузии, и др. Главным же недостатком, как и для всякой детерминистической модели есть игнорирование того факта, что процесс деградации защитного слоя бетона в действительности является стохастическим.

Выводы.

1. Сегодня нельзя отдать предпочтение какой либо из приведенных моделей прогноза ресурса.

2. Приведенная детерминистическая модель уже сегодня является достаточно перспективной для проектной практики, как инструмент управления долговечностью железобетонных элементов мостов. Она нуждается в определенном вероятностном совершенствовании и экспериментальном обосновании, после чего ее можно будет внести в нормативные документы проектирования.

3. Стохастическая модель является более универсальной и простой в применении. Однако, сегодня эта модель нуждается еще в значительной работе по обоснованию ее коэффициентов. Она приведена в порядке дискуссии.

Литература

1. Бліхарський З.Я., Сташук М.Г., Малик О.М. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі. Зб. Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. Донецьк: 2003. С. 318 – 324
2. Богданов Дж. Вероятностные модели накопления повреждений. – М.: 1989
3. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971.
4. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982.
5. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов. Бетон и железобетон, №2, -М.: 2000. С. 20-23
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. (). Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высш. шк., 2000
7. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии.- М.: Металлургия, 1981.
8. ДБН В.1.3- 22 - 2009 "Мости і труби. Основні вимоги проектування".- Мінрегіонбуд України, К.: 2009
9. ДБН В.2.3-14:2006 «Мости та труби. Правила проектування ». – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006
10. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». - Мінрегіонбуд України, К.: 2009.
11. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов.// – М.: НИЦ «Инженер», 1999.
12. Карпенко Л.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996.
13. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: 1999.

14. Маринин А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных мостовых пролетных строений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации : диссертация ... кандидата технических наук.- Волгоград, 2007.- 383 с.
15. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991.
16. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пос. в 4-х т. под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988-1990.
17. Пирадов К.А., Гусев Е.А. Механика разрушения железобетона. – М.: 1998.
18. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Зб. наукових статей. Науковий керівник - академік НАН України Б.Є.Патон. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. К.: 2006.
19. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с
20. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20с.
21. СНиП 2.05.03-84 “Мосты и трубы”, Госстрой СССР. – М.: ЦИТП. 1985.
22. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. М.: Транспорт, 1980.
23. “New Approach to Durability Design”, - CEB Bulletin d’Information No.238, 1997
24. EN 1990-2001. Eurocode: Basis of Structural Design. – Brussels: CEN, 2001.- 89 p
25. Frangopol D. et al. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. Journal of computing in Civil Engineering/ January (2001), pp. 27-34
26. Matsumoto T. Beng S. S. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance. Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. - 2005, p. 23 – 36.
27. Melchers, R.E. Structural Reliability Analysis and Prediction/ Second Edition. John Wiley & Sons.- New York: 1999, 437 p.
- Takewaka, K. and Mastumoto, S., “Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments”, ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988, pp. 381-400.