
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.059.1

Ф. В. ЯЦКО*

* Каф. «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, Київ, Україна, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, ел. пошта fedor.yatsko@gmail.com

ПРАКТИЧНА ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ В ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ

Мета. Науковий пошук моделі прогнозу життєвого циклу елементів автодорожніх мостів. **Методика.** Теоретичне вишукування. **Результати.** Доведена принципова можливість використання розробленої моделі прогнозу ресурсу при проектуванні залізобетонних згинаних елементів на заданий термін служби. **Наукова новизна.** Вперше пропонується модель, призначена для прогнозування ресурсу елемента на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. **Практична значимість.** Запропоновано практичну інженерну методіку оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування.

Ключові слова: деградація захисного шару; корозія арматури; ресурс; життєвий цикл; характеристика безпеки

Вступ

Стаття присвячена дослідженню в рамках нової парадигми теорії споруд – отриманню фундаментальних рівнянь напружено-деформованого стану елементів в функції часу. Необхідність нових підходів в проектуванні транспортних споруд очевидна і назріла давно.

Для автодорожніх мостів України проблема повстала особливо гостро в останні 10-15 років. За статистичними даними Укравтодору [4] сьогодні середній термін служби залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів складає 45-50 років тоді як, згідно чинних вимог на проектування [5], цей термін має бути мінімум 80-100 років. За останнє десятиріччя з'явилися публікації, в яких висловлюється теза про те, що зниження довговічності, в значній мірі, складається ще на стадії вишукування і проектування споруди.

Дійсно, в сучасному апараті проектування залізобетонних елементів (і не тільки мостів) немає ніяких явних важелів управління довговічністю. Термін життєвого циклу залізобетонних мостів призначається директивно [5], розрахункові залежності не мають змінної часу, проблема довговічності знаходиться цілком в площині досвіду і інтуїції проектувальника.

Очевидно, що існуючі моделі проектування не є адекватними нашому досвіду будівництва і

експлуатації транспортних споруд. Тому назріла необхідність звернення до нового інструментарію, нових моделей, які б відображали еволюцію напружено-деформованого стану в функції часу. Саме такі моделі, що описують деградацію елемента з плином часу, мають відкрити шлях до проектування елементів споруд на заданий термін служби, прогнозувати ресурс елемента в експлуатації.

З початком нового століття проблема довговічності залізобетонних елементів стає предметом уважного вивчення українських науковців. Науковий базис марковської феноменологічної стохастичної моделі накопичення пошкоджень елементів мостів [9, 10, 17] послужив основою першого, на терені пострадянських країн, нормативного документу з прогнозу ресурсу транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації [7]. Сьогодні доведена адекватність марковської стохастичної моделі нормативного документу [6], вона стала центральним методичним ядром системи експлуатації автодорожніх мостів України. На жаль марковська ймовірнісна модель має тільки один керуючий параметр – швидкість деградації (інтенсивність відмов), який визначається в роботі [7] на основі історичних даних експлуатації і не може бути застосованою для прогнозування ресурсу споруди на етапі проектування. Ця обставина була по-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

штовхом до розробки в останні роки нових моделей життєвого циклу залізобетонних елементів, які могли би стати інструментарієм керування довговічністю ще на етапі проектування.

Теоретичні моделі цього напрямку базуються на новітніх уявленнях механофізики бетону і арматури, містять параметри прийняті в проектуванні споруд та в оцінці впливу навколишнього середовища [1, 2, 12, 14]. Саме такого плану є дослідження, основні положення якого, викладені в цій статті.

Мета

Центральна мета дослідження полягає у науковому пошуку моделі прогнозу життєвого циклу елементів автодорожніх мостів, що дасть можливість оцінити довговічність елементів мостів в функції часу, а відтак прогнозувати їх ресурс за проектними параметрами та характеристиками навколишнього середовища. Основним завданням роботи є теоретичний пошук закономірностей деградації залізобетонних елементів мостів з плином часу та розробка методології оцінки ресурсу споруди протягом всього життєвого циклу залізобетонного елемента.

Формулювання задачі дослідження

Задача дослідження полягає в пошуку функції якою моделюється зниження функціональних характеристик елемента протягом часу життєвого циклу експлуатації. В загальному вигляді функція моделі представляється так:

$$T_{cr} = f_1(t_p, p_i, K_{RB}) + f_2(t_{cor1}, p_j, K_{RA}) + f_3(t_{cor2}, p_j, K_{RA}),$$

$$i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де f_1 – модель деградації захисного шару бетону елемента; f_2 – модель деградації арматури елемента; t_p – час деградації захисного шару бетону елемента; t_{cor} – час деградації арматури елемента; p_i – параметри, що характеризують початкові фізичні, хімічні, механічні властивості бетону та вплив оточуючого середовища; p_j – параметри, що характеризують початкові механічні характеристики арматури, рівень напружень в арматурі та вплив оточуючого сере-

довища; K_{RB} – критерій досягнення критичного стану захисного шару бетону елемента; K_{RA} – критерій досягнення граничного стану експлуатації за втратами арматури.

Методика.**Модель життєвого циклу**

Модель базується на таких гіпотезах:

А. Життєвий цикл в експлуатації розглядається як двофазний процес: деградація бетону захисного шару елемента та фаза деградації арматури.

Б. Моделлю деградації бетону описується процес карбонізації та насичення хлоридами захисного шару елемента. Критерієм процесу є карбонізація та насичення хлоридами захисного шару на повну товщину. Карбонізація і насичення захисного шару хлоридами починаються одночасно одразу після розопалубки та проходять незалежно і паралельно.

В. Моделлю деградації арматури описується процес корозії арматури, який починається після повної карбонізації захисного шару зі швидкістю корозії в карбонізованому бетоні. В процесі насичення кількість хлоридів на поверхні робочої арматури досягає критичного рівня (повне насичення хлоридами захисного шару) і швидкість корозії прискорюється до значення. Критерієм процесу деградації арматури є граничне значення надійності залізобетонного елемента за арматурою при експлуатації.

Г. Процеси деградації бетону і арматури проходять послідовно, не корелюють, перехідні фази відсутні.

В графічній інтерпретації процес деградації показаний на рис. 1.

В термінах часу, ресурс елемента, що виражається залежністю (1) будемо записувати в формі:

$$T_{cr} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (2)$$

де перший період життєвого циклу t_1 – період депасивації захисного шару, арматура не кородує ($t_1 = t_c$); другий період життєвого циклу t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону, концентрація хлоридів недостатня для активації хлоридної корозії ($t_2 = t_{c1} - t_c$); третій період t_3 – період активної хлоридної корозії, характеризується активним зниженням несучої здатності в часі.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

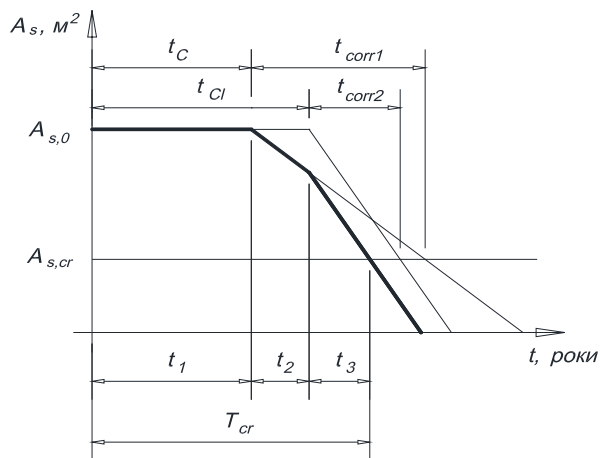


Рис. 1. Схема деградації залізобетону:

$A_{s,0}$ – проектна площа поперечного перерізу робочої арматури; $A_{s,cr}$ – площа поперечного перерізу робочої арматури за граничних умов; t_c – час карбонізації захисного шару; t_{cl} – час насичення захисного шару хлоридами; t_{corr1} – період корозії арматури в карбонізованому бетоні; t_{corr2} – період корозії арматури в бетоні насиченому хлоридами; t_1, t_2, t_3 – періоди життєвого циклу; T_{cr} – ресурс

Модель деградації бетону захисного шару

Теоретичним базисом моделі деградації бетону є другий закон аналітичної теорії дифузії Адольфа Фіка:

$$\frac{\partial C(h, \tau)}{\partial \tau} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C(h, \tau)}{\partial h^2}, \quad (3)$$

де $C(h, \tau)$ – концентрація іонів речовини на глибині h в час τ ; $D_{\text{эф}}$ – ефективний коефіцієнт дифузії; τ – час; h – координата нормальна до поверхні бетону.

Загальноприйнятим розв'язком рівняння (3) у випадку ненапруженого залізобетону є:

$$t_{cl} = \frac{1}{K_{\text{эф}} \cdot D_0} \left[\frac{x}{2 \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_s - C_1} \right)} \right]^2, \quad (4)$$

де t_{cl} – час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині

x – товщина захисного шару; C_s – концентрація хлорид-іонів на поверхні елемента; C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону; C_{CR} концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури; $\text{erfc}(\cdot)$ – додаткова функція помилок; $K_{\text{эф}}$ – коефіцієнт ефективності; D_0 – початковий коефіцієнт дифузії з урахуванням впливу складу бетону λ і вмісту летючої золи (ξ , %) [11]:

$$K_{\text{эф}} = \left[1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4} \right]^{-1} \cdot e^{q \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2, \quad (5)$$

де H – відносна вологість; H_c – критична вологість; q – константа активації дифузії; K_0 – нормальна температура; K – температура; A – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (при стисканні $-0,0236$; розтягу $+0,0496$); σ – напруження в бетоні; f – гранична міцність бетону.

$$D_0 = 10^{(12,06 + 2,4B/C)} \lambda \xi, \quad (6)$$

де B/C – водоцементне відношення.

Модель деградації бетону захисного шару та аналіз чутливості вхідних параметрів детально викладено в нашій роботі [13]. В цій же роботі представлена модель деградації арматури та її аналіз.

Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_c = \frac{m \cdot x^2}{4D_e}, \quad (7)$$

де x – товщина захисного шару, м; D_e – ефективний коефіцієнт дифузії (табл. 1 згідно СНиП 2.03.11-85 [1111]); m – коефіцієнт умов роботи, має значення $1 - 0,85$, зменшується лінійно з підвищенням температури від 20 до 40 °С при відносній вологості повітря 75 %.

Модель деградації арматури

Модель представимо як втрату несучої здатності елемента за моментом, викликану корозією арматури:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\Delta M_t = M_k - M_\beta, \quad (8)$$

де ΔM_t – втрата несучої здатності елемента викликана корозією арматури; M_k – характе-

ристична проектна несуча здатність; M_β – реальна характеристична несуча здатність на час t .

Таблиця 1

Показники проникності бетону [11]

Умовні позначення показника проникності бетону	Марка бетону по водоне-проникності	Коефіцієнт фільтрації, см/с (за рівноважної вологості), K_f	Ефективний коефіцієнт дифузії, $D \cdot 10^4$, см ² /с	Водоцементне співвідношення В/Ц, не більше
Н – бетон нормальної проникності	W4	Більше $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	Св. 0,2 до 1	0,6
П – бетон пониженої проникності	W6	$> 6 \cdot 10^{-10} > 2 \cdot 10^{-9}$	$> 0,04$ до 0,2	0,55
О – бетон особливо низької проникності	W8	$> 1 \cdot 10^{-10} > 6 \cdot 10^{-10}$	до 0,04	0,45

Для того, щоб в модель деградації арматури (8) внести критерій граничного стану експлуатації – граничне значення характеристики безпеки β , скористаємося класичним визначенням часткового коефіцієнта надійності:

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d}, \quad (9)$$

де R_k – характеристична несуча здатність елемента; R_d – проектна несуча здатність елемента.

Характеристичну несучу здатність M_k і M_β – на час досягнення граничного значення в експлуатації виразимо через проектну несучу здатність M_d та ймовірнісні параметри: початкову характеристику безпеки β_0 , критерій закінчення процесу деградації арматури (вичерпання ресурсу елемента) β_t і коефіцієнти варіації V_R , V_s . Для цього скористаємося відомими залежностями логнормального розподілу [16]:

$$M_k = \mu_R \cdot \exp(-1,645 \cdot V_s), \quad (10)$$

$$M_d = \mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta_0 \cdot V_R), \quad (11)$$

де V_s – коефіцієнт варіації арматури; V_R – коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента; μ_R – математичне очікування узагальненого

опору елемента; α_R – коефіцієнт чутливості функції розподілу.

Внесемо (10), (11) в (9) і отримаємо:

$$\gamma_R = \frac{M_k}{M_d} = \exp(\alpha_R \cdot \beta_0 \cdot V_R - 1,645 V_s). \quad (12)$$

Праву частину моделі деградації арматури (8) запишемо в формі добутоків $\gamma_R \cdot R_d$ застосувавши вираз (11):

$$\Delta M_t = \exp(\alpha_R \cdot \beta_0 \cdot V_R - 1,645 V_s) M_d - \exp(\alpha_R \cdot \beta_t \cdot V_R - 1,645 V_s) M_d. \quad (13)$$

Внесемо позначення $\gamma_0 = \exp(\alpha_R \cdot \beta_0 \cdot V_R - 1,645 V_s)$ – проектний частковий коефіцієнт надійності та $\gamma_t = \exp(\alpha_R \cdot \beta_t \cdot V_R - 1,645 V_s)$ – частковий коефіцієнт надійності на момент часу в експлуатації t і запишемо модель (13) в компактній формі:

$$\Delta M_t = (\gamma_0 - \gamma_t) M_d. \quad (14)$$

Далі запишемо вираз несучої здатності елемента прямокутного перерізу за арматурою M_0 та M_d в моделі (14) в параметрах поперечного перерізу:

$$M_d = R_s A_s \left(h_0 - \frac{0,5 R_s A_s}{b R_b} \right) = R_s A_s z, \quad (15)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

де R_s – розрахунковий опір арматури на розтяг; R_b – характеристичний опір бетону на стиск; h_0 – робоча висота шару арматури, що контактує із захисним шаром бетону; b – ширина перерізу; z – плече внутрішньої пари.

Зауважимо, що плече внутрішньої пари z в (14) приймається постійним, незалежним від корозійних втрат арматури.

В позначеннях (15) модель деградації арматури (14) записується так:

$$R_s A_{scor} z = (\gamma_0 - \gamma_t) R_s A_s z. \quad (16)$$

Із співвідношення (16) отримаємо кількість арматури втраченої від корозії за час експлуатації:

$$A_{scor} = (\gamma_0 - \gamma_t) A_s. \quad (17)$$

Функцію деградації арматури прийемо згідно [3]:

$$A(t) = \pi \cdot n \cdot (d \cdot v \cdot t_3 - v^2 t_3^2), \quad (18)$$

де n – кількість робочих стрижнів, що розташовані на глибині захисного шару; d – діаметр стрижнів робочої арматури; v – швидкість корозії арматури; t_{cor} – час досягнення граничного стану арматури в експлуатації.

Швидкість корозії арматури з урахуванням впливу напружень, температури та вологості [3]:

$$v = \frac{\partial \delta}{\partial t} = v_0 \exp\left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T}\right), \quad (19)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури (м); v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень (згідно з [15]); V – мольний об'єм кородуючого металу; σ – напруження в арматурі; R – універсальна газова стала; T – температура.

Внесемо в функцію деградації арматури (18) значення кількості арматури втраченої від корозії за час експлуатації (17) і отримаємо модель деградації арматури як її втрати до критичного значення:

$$(\gamma_0 - \gamma_t) A_s = \pi \cdot n \cdot (d \cdot v \cdot t_3 - v^2 \cdot t_3^2). \quad (20)$$

Введемо в рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_c :

$$\Delta d_c = 2v_0 \exp\left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T}\right) t^2 = 2 \cdot v_c \cdot t_2, \quad (21)$$

де, v_c – швидкість корозії арматури в умовах карбонізованого бетону.

Розв'язок рівняння моделі (20) відносно змінної часу корозії t_3 та з урахуванням (21) дає час прогнозу ресурсу за арматурою в умовах хлоридної корозії:

$$t_3 = \frac{d - \Delta d_c}{2v} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\gamma A_s}{\pi n (d - \Delta d_c)^2}} \right), \quad (22)$$

де $\gamma = (\gamma_0 - \gamma_t)$.

Швидкість корозії за відсутності напружень показана в табл. 2.

Алгоритм моделі

1-й крок. Ввід даних; обчислення часу карбонізації t_c за (7), отримуємо t_1 .

2-й крок. Обчислення часу насичення захисного шару хлоридами: обчислення початкового коефіцієнта дифузії D_0 за (6), обчислення коефіцієнта ефективності K_{ef} за (5); обчислення часу насичення захисного шару хлоридами t_{c1} за (4); отримуємо $t_2 = t_{c1} - t_c$.

3-й крок. Обчислення втрати діаметру робочої арматури, що розташована на глибині захисного шару від корозії в умовах карбонізованого бетону Δd_c за (21).

4-й крок. Обчислення γ_0 – проектний частковий коефіцієнт надійності та γ_t – частковий коефіцієнт надійності, що відповідає обраному граничному значенню характеристики безпеки β_t за (13). Отримуємо $\gamma = (\gamma_0 - \gamma_t)$.

5-й крок. Обчислення часу прогнозу ресурсу за арматурою в умовах хлоридної корозії t_3 за (22).

6-й крок. Обчислення ресурсу T_{CR} за (2), підставивши t_1 , t_2 , t_3 , отримані в кроках 1,2,5 відповідно.

Швидкість корозії v_0 в залежності від класу середовища експлуатації [15]

Позначення класу середовища	Характеристика середовища	Характеристика елементів прогонової будови мостів та умов їх експлуатації (приклад)	v_0 , мм/рік
Корозія арматури, викликана карбонізацією			
XC3	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові будови)	0,002
XC4	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,005
Корозія арматури, викликана хлоридизацією			
XD1	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові будови)	0,030
XD3	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,030

Аналіз моделі

Отримана модель деградації арматури є дискретною. Очевидно, що час прогнозу ресурсу елемента за арматурою отримується для фіксованих значень часткового коефіцієнта надійності (які залежать від фіксованих значень характеристики безпеки) проектного та на час експлуатації. Згідно гіпотезі В. критерієм процесу деградації арматури є граничне значення надійності залізобетонного елемента за арматурою при експлуатації. Формат запропонованої моделі деградації арматури (ф. 13) прийнято таким, що граничним значенням характеристики безпеки може бути довільне, яке відповідає граничним станам життєвого циклу експлуатації [6].

Що ж стосується граничного значення характеристики безпеки (вичерпання ресурсу елемента) то сьогодні відомо невелику кількість робіт. Це окрема проблема яка ще очікує свого детального вивчення. В нашому дослідженні ми користуємося значенням $\beta_t = 1,74$, що відповідає п'ятому експлуатаційному стану в нормативному документі ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 [6]. В роботі [8] рекомендується приймати більш обережні значення характеристики безпеки граничного зносу – $\beta_t = 2,26 - 2,09$.

Виконані в рамках дослідження тестові приклади дають досить реалістичний прогноз ре-

сурсу за моментом згинаних залізобетонних елементів мостів. Один з прикладів наводиться нижче. Ймовірнісні параметри проекту: проектна характеристика безпеки $\beta_0 = 4,04$; критерій закінчення процесу деградації арматури (вичерпання ресурсу елемента за арматурою) $\beta_t = 1,74$; V_s – коефіцієнт варіації арматури; V_R – коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента; α_R – коефіцієнт чутливості функції розподілу. Результати обчислень наведені в табл. 3. Обчислення виконані для випадків досягнення 2-5 експлуатаційних станів [15].

Приклад

Елемент залізобетонної балки моста прямокутного перерізу. Переріз показано на рис. 2. Геометричні характеристики перерізу: $h = 1,5$ м; $b = 1,4$ м; $a_s = 30$ мм, $d = 32$ мм, $n = 6$.

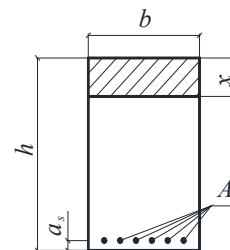


Рис. 2. Переріз залізобетонної балки

Результати обчислень

Характеристика безпеки β_t	Втрати площі перерізу арматури, %	Періоди життєвого циклу			Ресурс елемента T_{CR} , роки
		1, t_1 , роки	2, t_2 , роки	3, t_3 , роки	
2,95	16	20	15	11	46
2,43	25			13	48
2,05	32			22	57
1,74	38			30	65

Арматуру згідно [5] прийнято класу AIV $R_{sn} = 590$ МПа, бетон В35 $R_{bn} = 25,5$ МПа. Характеристичний момент від постійних і тимчасових навантажень у перерізі $M_k = 2600$ кНм. Площа перерізу арматури $A_s = 48,25$ см². Район будівництва – м. Київ.

Початкові дані цього прикладу є досить типовими для залізобетонних елементів мостів. При значенні критерію вичерпання ресурсу елемента за арматурою $\beta_t = 1,74$ (досягнення п'ятого експлуатаційного стану) отримуємо ресурс $T_{CR} = 65$ років. Очевидно, що такий проект не може забезпечити довговічність декларовану нормами проектування [5].

Висновки

1. Вперше ставиться наукова проблема розробки моделей прогнозу ресурсу елементів транспортних споруд протягом всього життєвого циклу, починаючи з етапу проектування. Наукове формулювання проблеми виконано на основі нових уявлень про закономірності деградації залізобетону в елементах конструкцій транспортних споруд отриманих в процесі досліджень та сформульованих теоретичних положень про залежність терміну служби залізобетонних елементів автодорожніх мостів від конструкційних характеристик матеріалів і умов впливу оточуючого середовища.

2. Цим дослідженням доведена принципова можливість використання розробленої моделі прогнозу ресурсу при проектуванні залізобетонних згинаних елементів на заданий термін служби та відкриває шлях до планування довгострокової стратегії експлуатації мостів.

3. Дискретна структура запропонованого алгоритму реалізації моделі дозволяє його ефек-

тивне використання для прогнозу залишкового ресурсу в системі експлуатації залізобетонних елементів мостів як апарат уточнення нормативної моделі [6].

4. Модель прогнозу ресурсу, що пропонується, має вихідні дані усталені в проектуванні елементів мостів і може служити зручним апаратом оцінки ресурсу в проектуванні залізобетонних елементів на заданий термін служби.

Ця робота виконана під керівництвом професора А. І. Лантуха-Лященка, за що висловлюю йому мою щирю вдячність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бородай, Д. И. Модель прогноза долговечности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов [Текст] / Д. И. Бородай // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 33. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 43-48.
2. Бородай, Д. И. Прогноз долговечности типовых железобетонных пролетных строений автодорожных мостов [Текст] / Д. И. Бородай // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. – Вип. 1 (87). – 2011. – С. 169-176.
3. Гутман, Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии [Текст] / Э. М. Гутман. – Москва : Металлургия, 1981. – 281 с.
4. Давиденко, О. О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону». – Київ, 2013. – № 78. – том 2. – С. 225-235.
5. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Чинні від 2009-11-11. – К. : Мін регіон буд. України, 2009. – 73 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

6. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України 2009. – 50 с.
7. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
8. Лантух-Лященко, А. І. К вопросу определения граничного износа сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста [Текст] / А. І. Лантух-Лященко, К. В. Медведев // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков : изд. ХНАДУ, 2012. – Вып. 58. – С. 90-95.
9. Лантух-Лященко, А. І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Вісник Транспортної Академії України. – Київ, 1999. – № 3 – С. 59-63.
10. Лантух-Лященко, А. І. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела». – Москва : МИИТ, 2006. – с. 259-265.
11. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии, Госстрой СССР [Текст]. – Москва : ЦИТП, 1985.
12. Янчук, Л. Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу [Текст] / Л. Л. Янчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 664. – С. 365-371.
13. Яцко, Ф. В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів [Текст] / Ф. В. Яцко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вид-во ДНУЗТ, 2010. – Вип. 33. – С. 190-196.
14. Яцко, Ф. В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід. [Текст] / Ф. В. Яцко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 664. – С. 371-378.
15. DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document BE95-1347/R0, The European Union – Brite EuRam III [Text], Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.
16. ISO 2394, 1998. General principles on reliability for structures. 2nd edn. Geneva, Switzerland: ISO [Text].
17. Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures [Text] // Proceeding EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment, Kielce, 16-17 May 2006/WARSZAWA 2006. – p. 255-261.
18. Takewaka, K. Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments [Текст] / K. Takewaka, S. Mastumoto // ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. – pp. 381-400.

Ф. В. ЯЦКО*

* Каф. «Мости и тоннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова 1, Киев, Украина, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, эл. почта fedor.yatsko@gmail.com

ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Цель. Научный поиск модели прогноза жизненного цикла элементов автодорожных мостов. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Доказана принципиальная возможность использования разработанной модели прогнозирования ресурса при проектировании железобетонных изгибаемых элементов на указанный срок службы. **Научная новизна.** Впервые предложена модель, предназначенная для прогнозирования ресурса элементов на всех этапах жизненного цикла, начиная от проектирования. **Практическое значение.** Предложена практическая инженерная методика оценки ресурса железобетонных элементов мостов в процессе проектирования.

Ключевые слова: деградация защитного слоя; коррозия арматуры; ресурс; характеристика безопасности

F. V. YATSKO*

* Dept. of Bridges and Tunnels, National Transport University, 1 Suvorova str., Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 471 33 99, e-mail fedor.yatsko@gmail.com

PRACTICAL ENGINEERING METHODOLOGY RESOURCE ASSESSMENT CONCRETE BRIDGE ELEMENTS IN THE DESIGN PROCESS

Purpose. Scientific research of life cycle prediction model of road bridges. **Methodology.** Theoretical study. **Findings.** The principal possibility of using the lifetime prediction model for reinforced concrete elements when designing for the specified service life. **Originality.** The lifetime prediction model for reinforced concrete elements for the specified service life at all stages of the life cycle, starting from the design is proposed. **Practical value.** A practical engineering service life evaluation technique for reinforced concrete bridge elements in the design process.

Keywords: degradation of the protective layer; corrosion of reinforcement; service life; reliability factor

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Й. Й. Лучко (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Надійшла до редколегії 24.08.2014.

Прийнята до друку 28.09.2014.