

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

В статті представлена загальна модель деградації залізобетонних елементів мостів, побудована за статистичним методом з урахуванням впливу навколишнього середовища та напружено-деформованого стану. Наведений алгоритм визначення довговічності залізобетонного елемента.

Ключові слова: довговічність, стохастичний процес, метод Монте-Карло, рівняння дифузії, хлоридизація, корозія арматури, статистичний метод

Вступ

Одним з найважливіших елементів транспортної системи держави є мости. З досвіду розвинутих країн Європи відомо, що до 50 відсотків витрат на мостову галузь припадає на утримання споруд, тому природно постає питання про необхідність визначення довговічності мостів.

Регламентований нормами [3] термін служби для мостів складає 70–100 років. При цьому характеристики матеріалів і навантажень, основні вимоги до розрахунків детерміністичні. В дійсності всі процеси і навантаження в реальному житті відбуваються як функції часу.

Сьогодні ми констатуємо, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 45–50 років. Так на дорогах державного значення в четвертому експлуатаційному стані знаходиться майже 21 % залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів (рис. 1), їх середній вік становить 45 років. (Зауважимо, що 82 % автодорожніх мостів знаходиться на місцевих дорогах і їх технічний стан дещо гірший).

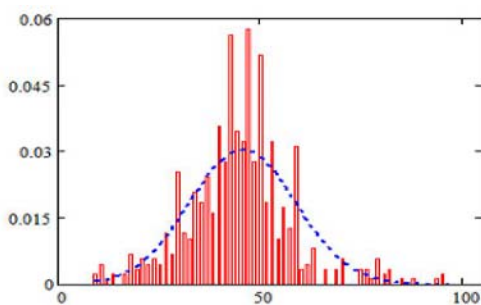


Рис. 1. Вік залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів на дорогах державного значення, що знаходяться в четвертому експлуатаційному стані

Зниження реального середнього терміну служби залізобетонних прогонових будов мостів до 50 – 60 років спостерігається також і в країнах Європи. В роботі [11] вказується, що середній час життєвого циклу залізобетонних

мостів Японії встановлений Міністерством фінансів – 60 років.

Якщо в Україні зниження довговічності мостів можна пояснити проблемами фінансування і відсутності необхідної експлуатації, то щодо країн Європи, США та Японії, такого припущення неможливо.

Складається враження що ще на стадії проектування закладається занижена довговічність залізобетонних елементів.

На сьогодні єдиним інструментом для врахування випадкового характеру характеристик матеріалів і навантажень слугують регламентовані коефіцієнти надійності. В дійсності майже всі процеси і навантаження є змінними, залежними від часу.

Наукові пошуки останніх років із створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [5] склали базу чинних нормативних документів [3].

Складність досліджень довговічності пов'язана в першу чергу з необхідністю одночасного розглядання величезної кількості взаємопов'язаних факторів, які в сукупності формують життєвий цикл мосту. В той же час проблема довговічності залізобетонних елементів є предметом вивчення величезної кількості науковців, в тому числі і українських [1, 2, 8, 9, 10, 12, 13, 14]. Отже сьогодні необхідно об'єднати теоретичний базис і сформулювати модель ефективного управління довговічністю мостів.

Мета роботи

Метою роботи є розробка моделі довговічності залізобетонного елемента з урахуванням не тільки сукупного впливу імовірнісного характеру стану оточуючого середовища і корозійних процесів, а і напружено-деформованого стану.

Формулювання задачі

Термін служби до вичерпання T – це функція часу, якою описується процес погіршення

технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом терміну служби елемента. В загальному випадку така функція має вид:

$$T = R(\tau) \cdot L(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (1)$$

де $R(\tau)$ – фактор моделі деградації; $L(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – випадкова функція; p_1, p_2, \dots, p_n – параметри, якими характеризуються: властивості матеріалів, напружено-деформований стан, тип конструкції, оточуюче середовище, та ін.

Довговічність можливо виразити через надійність, як ймовірність досягнення граничного стану за час τ [15, 16]. Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(X, \tau) = R(X, \tau) - S(X, \tau) \quad (2)$$

де $R(X, \tau)$ – узагальнений опір елемента; $S(X, \tau)$ – узагальнений навантажувальний ефект; X – вектор базових змінних, τ – змінна часу.

Зауважимо, що в загальному випадку вектор X є залежним від часу і теорія надійності має моделі в яких $R(X, \tau)$ та $S(X, \tau)$ з (2) є функціями випадкових змінних та часу. На практиці отримати такі функції за допомогою аналітичних залежностей поки що неможливо, проте використавши апарат теорії ймовірностей можливо отримати вектор змінних дискретних величин, тобто не самих функцій, а їх значень, які б відповідали певним умовам.

Постулюється, що узагальнений опір елемента в повній мірі залежить від зміни характеристик матеріалів і напружено-деформованого стану в часі. Тому необхідно розглянути закони деградації бетону і арматури, їх взаємозв'язок і зміни напружено-деформованого стану.

Тут теоретичною базою опису швидкості деградації захисного шару бетону є загальні закони аналітичної теорії дифузії, відомі як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка. [1]:

$$Q = -D_{\text{еф}} \frac{C(h, \tau)}{\partial h}, \quad (3)$$

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (в даному випадку - вуглецю), так звана, щільність дифузійного потоку; $C(h, \tau)$ – концентрація речовини, що дифундує, функція координати h і часу τ ;

$D_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт дифузії газу в бетоні.

$$\frac{\partial C(h, \tau)}{\partial \tau} = D_{\text{еф}} \frac{\partial^2 C(h, \tau)}{\partial h^2}, \quad (4)$$

де $C(h, \tau)$ – концентрація іонів речовини на глибині h у час τ ; $D_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт дифузії; τ – час (рахується від початку експлуатації); h – координата нормальна до поверхні бетону.

З урахуванням впливу напружень на швидкість корозії арматури з роботи [16] швидкість деградації арматури:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right), \quad (5)$$

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

За процедурою метода Монте-Карло чисельне визначення кількості речовини, що проникла на глибину більшу за h перетворюється у досить простий імовірнісний вираз усереднення по кількості статистичних експериментів:

$$p_{x \geq h} = \frac{N_{x \geq h}}{N}, \quad (6)$$

де $p_{x \geq h}$ – частка іонів, що продифузували на глибину $\geq h$; $N_{x \geq h}$ – кількість іонів, що пройшли на задану глибину h ; N – загальна кількість іонів (кількість випробувань).

Для визначення концентрації іонів на глибині h після N випробувань скористаємось залежністю:

$$C_h = C_0 \cdot p_{x \geq h}, \quad (7)$$

де C_h – концентрації іонів на глибині h ; C_0 – поверхнева концентрація іонів; $p_{x \geq h}$ – частка іонів, що продифузували на глибину більшу за h .

Часовий крок випробувань доцільно обрати таким, що дорівнює одному місяцю. Це пов'язано з тим що швидкість протікання хлоритизації захисного шару і корозії арматури в значній мірі залежать від коливань вологості, температури і віку елемента. Так при деяких умовах, наприклад в сухі і спекотні періоди рух іонів СІ майже припиняється через відсутність

рідкої фази (електроліту) навіть в найменших порах. Більші проміжки роблять розрахунок більш неточним. З іншого боку коротші проміжки часу такі як тиждень або день призводять до зайвої втрати часу при розрахунках. Щодо результатів оцінки терміну служби, то його зручно вимірювати в роках.

Для визначення глибини проникнення частки дифузанта для кожного випробування використовується формула Ейнштейна [3]:

$$x_{Cl_i} = \sqrt{\frac{2kK_iB\Delta\tau}{N_0}}, \quad (8)$$

де x_{Cl_i} – глибина проникнення дифузанта; k – стала Больцмана (1,3806488 Дж/К); K_i – температура (K); $\Delta\tau$ – відтинок часу (с); B – рухливість (1/Дж·с); N_0 – число Авогадро.

Рухливість B характеризується як самим дифузантом, так і середовищем, де відбувається процес дифузії. В нашому випадку для визначення рухливості B застосовується рівняння Стокса:

$$B = \frac{1}{6\pi\eta r}, \quad (9)$$

де η – в'язкість рідини (Па/с); r – іонний радіус; N_0 – число Авогадро.

В'язкість рідини η залежить від температури і визначається з:

$$D_{\text{еф}_i} = \frac{kT_iB}{N_0} = \frac{kK_i}{6\pi\eta rN_0}, \quad (10)$$

звідки

$$\eta = \frac{kK_i}{6\pi D_{\text{еф}_i} rN_0}, \quad (11)$$

де $D_{\text{еф}_i}$ – ефективний коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$), визначається згідно:

$$D_{\text{еф}_i} = K_{\text{еф}_i} D_0, \quad (12)$$

де $K_{\text{еф}_i}$ – коефіцієнт ефективності:

$$K_{\text{еф}_i} = \frac{\left[1 + \frac{(1-H_i)^4}{(1-H_c)^4}\right]^{-1} e^{q\left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K_i}\right) \left[1 + A_i \left(\frac{\sigma_i}{f}\right)\right]^2}}{\tau_i^m}, \quad (13)$$

де m – фактор впливу часу; H_i – вологість повітря (%); H_c – критична вологість повітря

(75%); q – константа активації дифузії; K_0 – кімнатна температура; K – температура в час τ ; A_i – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (при стисканні $-0,0236$, розтягу $+0,0496$); σ_i – напруження в бетоні; f – граничний опір бетону; D_0 – початковий коефіцієнт дифузії:

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/C)}, \quad (14)$$

де $B|C$ – водоцементне співвідношення.

Поєднавши рівняння 8–12 отримаємо вираз для визначення глибини деградації бетону:

$$x_i = \sqrt{2D_0K_{\text{еф}_i}\Delta\tau}, \quad (15)$$

Глибину корозії арматури за обраний проміжок часу визначимо з (5):

$$\delta_i = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right)\Delta\tau, \quad (16)$$

Таким чином, провівши певну кількість розіграшів, отримаємо значення функції граничного стану (2) за кожний проміжок часу:

$$q_i = R(x_i, \delta_i, \Delta\tau) - S_i, \quad (17)$$

де $R(x_i, \delta_i, \Delta\tau)$ – опір елемента у заданий період часу з урахуванням деградації, S_i – навантаження.

Тоді час до настання граничного стану можна записати:

$$T = \sum \Delta\tau_{q>0}. \quad (18)$$

Алгоритм моделі

1. Ввід даних.

Силкові фактори: M_{pn} – характеристичний згинальний момент від тандему АК; M_{vn} – характеристичний згинальний момент від смугового навантаження АК; M_{hn} – характеристичний згинальний момент від Натовпу на тротуарах; M_{gn} – характеристичний згинальний момент від постійного навантаження.

Характеристика досліджуваного перерізу елемента: R_{bn} – характеристичний тимчасовий опір бетону стисканню; R_{pn} – характеристичний тимчасовий опір арматури розтягу; W – момент опору перерізу; A_p – площа робочої поздовжньої арматури.

Корозійні властивості, концентрації хлоридів, критичні концентрації: C_s – критична кон-

центрація хлоридів на поверхні арматури для початку активної корозії арматури; C_0 – початкова концентрація хлоридів на поверхні бетону; v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень; B/C – водоцементне співвідношення.

Властивості середовища: зміна температури K і вологості H по місяцях.

Кількість випробувань N .

2. Розіграш випадкових змінних K_i ; H_i ; m_i ; $\sigma_{b,i}$; $R_{b,i}$; A_i за нормальним законом розподілу які відповідають i -му місяцю життєвого циклу.

3. Обчислення $K_{\text{еф}}$ – коефіцієнта ефективності і $D_{\text{еф}}$ – ефективного коефіцієнта дифузії, для для i -го місяця.

4. Визначення зміщення фронту хлоритизації $X_{\text{Cl},i}$

Кроки 2–4 повторюються до утворення на поверхні арматури критичної концентрації хлоридів C_s . 1 крок – один місяць експлуатації. Кількість кроків до утворення критичної концентрації є часом деградації захисного шару τ_{Cl} .

5. Формується вектор швидкості деградації арматури і відповідний йому вектор зміни моменту опору перерізу елемента $\frac{\partial \delta}{\partial t}$ і $\frac{\partial W}{\partial t}$ відповідно.

6. Розіграш випадкових змінних $R_{b,i}$; W_i ; M_{Pn} ; M_{vn} ; M_{Hn} ; M_{gn} ; за обраним законом розподілу які відповідають i -му місяцю життєвого циклу.

7. Обчислення M_{ui} – несучої здатності і M_i – згинального моменту від всіх видів навантажень, для i -го місяця. Порівняння M_{ui} і M_i .

Кроки 6–7 повторюються до вичерпання ресурсу, тобто до моменту настання критичного стану.

Кроки 2–7 повторюються N разів. Будуються гістограми результатів.

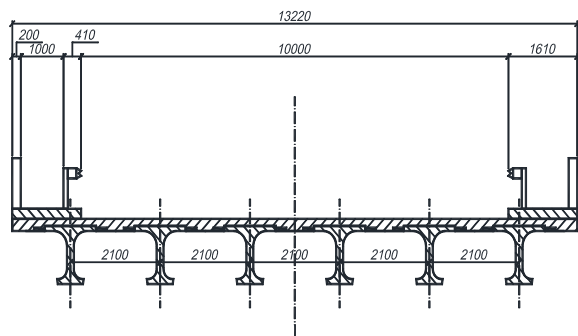


Рис. 2. Поперечний переріз мосту

Приклад

Прогонова будова довжиною 24 м у поперечному перерізі мосту розташовано 6 балок висотою 1,15 м і відстанню в осях 2,1 м. Товщина монолітного шару бетону плити проїзної частини над балками дорівнює 14 см. Габарит 10 м.

Тротуари виконано у монолітному варіанті, огорожа безпеки – металева бар’єрного типу висотою 75 см, поручнева огорожа – металева безстоякова висотою 110 см.

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В40. Робоча арматура балок – попередньо напружена з дроту діаметром 5 мм зі сталі класу В-II. Балка армована пучками, кожен з яких містить 24 дроти.

Характеристичні дані зведені в табл. 1

Таблиця 1

Вид зусилля	Значення зусиль, кН·м	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (власна вага), кН·м	1426	0,033
Друга частина постійного навантаження (навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	581	0,170
Навантаження від тандему, кН·м	978	0,170
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, кН·м	529	0,240
Рівномірно-розповсюджене навантаження від натовпу, кН·м	76	0,140
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	20	0,111
Пружно-пластичний момент опору W , м ³	0,159	0,023

Робоча арматура являє собою 11 арматурних пучків загальною площею 51,81 см² та розміщуємо їх в поперечному перерізі балки (площа одного пучка 24 $\varnothing 5$ $f = 4,71$ см²). Відстань від низу балки до центру ваги розтягнутої арматури (рис. 3).

Район будівництва Київ. $C_s = 0,2$ %; $C_0 = 0,6$ %; $N = 10000$.

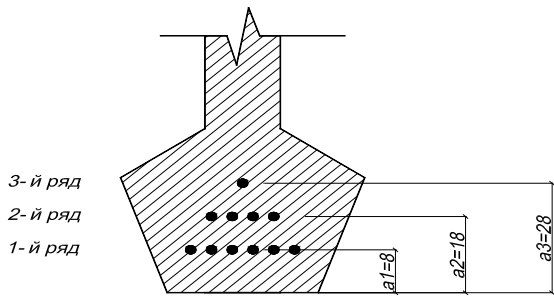


Рис. 3. Розташування арматури

Результати обчислень наведені на рис. 4, 5 і 6.

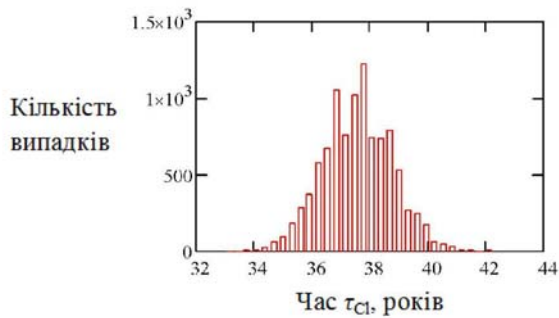


Рис. 4. Час деградації захисного шару

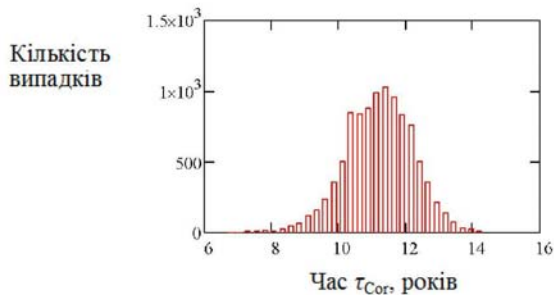


Рис. 5. Час деградації арматури

Свідченням деградації захисного шару, також, є наявність слідів іржі на поверхні бетону, дуже скоро з'являються тріщини викликані корозією. З досвіду обстежень відомо, що період експлуатації залізобетонних прогонових до відшарування захисного шару складає приблизно 30 років.

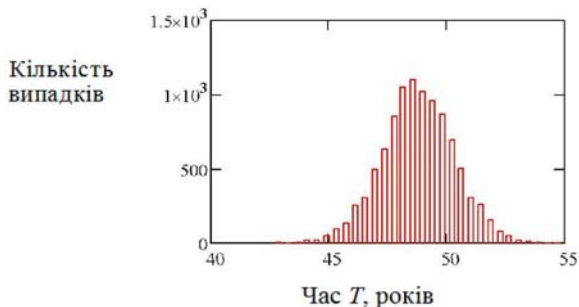


Рис. 6. Час деградації залізобетонного елемента

Необхідно зауважити, що достатня висока швидкість деградації арматури викликана малим діаметром дротів, що в свою чергу збільшує площу поверхні металу з бетоном насиченим хлоридами.

Результати обчислень

За результатом обчислень середня довговічність обраної прогонової будови складе 48 років. В свою чергу деградація захисного шару відбувається протягом 37 років, що вказує на необхідність приділяти більшу увагу довговічності захисного шару. Як видно з рис. 5 середній час корозії арматури до вичерпання ресурсу лише 11 років.

Висновки

1. Запропонована модель свідчить про можливість вирішення задач довговічності з урахуванням як стохастичної природи матеріалів, характеристик перерізів так і впливу навколишнього середовища на довготривалі процеси, що в свою чергу дає можливість оцінити правильність конструктивних рішень в певних умовах.

2. Результати обчислень за моделлю, що пропонується є першим наближенням. Вочевидь є необхідність подальшого дослідження і дискусій, які б базувалися на більш широкій експериментальній базі.

3. Метод Монте-Карло в вирішенні складних задач довговічності з урахуванням багатогранності впливів різноманітних чинників значно спрощує задачу оцінки довговічності залізобетонних елементів мостів та відкриває шлях до прогнозу ресурсу на всіх етапах життєвого циклу.

Ця робота була виконана під керівництвом д-ра техн. наук, професора А. І. Лантуха-Лященко. Висловлюю йому мою щирю подяку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бліхарський, З. Я., Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі [Текст] / З. Я. Бліхарський, М. Г. Сташук, О. М. Малик // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – Донецьк, 2003.
2. Васильев, А. И Вероятностная оценка остаточного ресурса физического ресурса срока службы железобетонных мостов [Текст] / А. И. Васильев // Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов. Труды ЦНИИС. Вып. 208. – М.: ЦНИИС, 2002. – С. 101–120.

3. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Введ. 2009-11-11. – К. Мін регіон буд. України, 2009. – 73 с.
4. Бекман, И. Н. Математика диффузии [Текст]: лекции. МГУ / И. Н. Бексан. – М., 2004.
5. Лантух-Лященко, А. І. О прогнозе остаточного ресурса моста [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Дороги і мости: зб. наук. праць, Вип. 7, Т. 2 / ДерждорНДІ. – К., 2007. – С. 3–9.
6. Марянин, М. Н. О построении кинетической модели карбонизации железобетонных конструкций транспортных сооружений [Текст] / М. Н. Марянин // Математическое моделирование и краевые задачи: тр. Третьей Всерос. науч. конференции, Ч. 1 / Самоту. – Самара, 2006.
7. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа [Текст]. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974.
8. «New Approach to Durability Design» [Текст]. – SEB Bulletin d'Information – No. 238. – 1997.
9. Hartt, W. Critical Literature Review of High-Performance Corrosion. Reinforcements in Concrete Bridge Applications [Текст] / W. Hartt, R. Powers, V. Leroux, D. K. Lysogorski // Center for Marine Materials. – Florida Atlantic University, 2004. – 53 p.
10. 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. – P. 381–400.
11. Matsumoto, T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance [Текст] / T. Matsumoto, S. S. Beng // Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005. – P. 23–36.
12. Блихарский, З. Я. Влияние карбонизации бетона на предпосылки коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожного комплекса [Текст] / З. Я. Блихарский, Р. Е. Хмиль, Р. Ф. Струк // Дороги і мости: зб. наук. праць / ДерждорНДІ. – К., 2006. – Вип. 6 – С. 229–239.
13. Глагола, І. І., Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій [Текст] / І. І. Глагола // Автореф. дисерт. к.т.н. – К., 2004.
14. Лучко, Й. Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд [Текст] / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Козаревич. – Львів: Каменяр, 1999 – 229 с.
15. Melchers, R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction [Текст] / R. E. Melchers // Second Edition. John Wiley & Sons. – New York, 1999. – 437 p.
16. Probabilistic Model Code. – 12th draft. Joint Committee on Structural Safety [Текст]. PART I – BASIS OF DESIGN - JCSS-OSTI/DIA/VROC-10-11-2000. – ETH Zurich. – 64 p.
17. Гутман, Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии [Текст] / Э. М. Гутман. – М.: Металлургия, 1981. – 281 с.

Надійшла до редколегії 03.07.2012.
 Прийнята до друку 16.07.2012.

Ф. В. ЯЦКО (Национальный транспортный университет, Киев)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ

В статье представлена общая модель деградации железобетонных элементов мостов построенная при помощи статистического метода, учитывая влияние окружающей среды и напряженно-деформированного состояние. Приведен алгоритм определения долговечности железобетонного элемента.

Ключевые слова: долговечность, стохастический процесс, метод Монте-Карло, уравнения диффузии, хлоридизация, коррозия арматуры, статистический метод

F. V. YATSKO (National of transport university, Kiev)

APPLICATION OF METHOD OF MONTE-KARLO FOR THE ESTIMATION OF LONGEVITY OF REINFORCED-CONCRETE ELEMENTS OF BRIDGES

This paper presents general model of reinforced-concrete elements deterioration by a statistical method including atmospherically and force condition. Paper includes algorithm of service life prediction of reinforced concrete elements of bridges.

Keywords: longevity, stochastic process, method of Monte Carlo, diffusion equations, chloridization, corrosion of reinforcement, statistic method