

ПРОГНОЗ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ. СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД

© Яцко Ф.В., 2010

Розглянуто імовірнісне моделювання і прогноз стохастичної деградації залізобетонних елементів мостів. Показано модель прогнозу довговічності залізобетонних елементів мостів, яка ґрунтується на процедурі Монте-Карло. Наведено алгоритми прогнозу довговічності залізобетонних елементів, реалізованих у програмному середовищі MathCAD.

Ключові слова: довговічність, стохастичний процес, імовірнісна модель, метод Монте-Карло, карбонізація, хлоридизація.

This paper presents the application of a probabilistic approach for modelling and prediction of stochastic deterioration bridge reinforced concrete elements. The focus of this paper is on the model of service life prediction of the reinforced concrete elements by using Monte Carlo simulation. The algorithms of service life prediction of reinforced concrete elements of bridges in the programme MathCAD are carried out.

Keywords: service life, stochastic process, probabilistic model, method of Monte Carlo, carbonization, chloridization.

Вступ. Проблема довговічності елементів мостів сьогодні є вкрай актуальною для України. Так, в рішенні від 13 жовтня 2009 р. Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України відмічається критичний стан автодорожніх мостів та транспортних споруд, що підвищує ризик виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру та становить, відповідно до статті 7 закону України «Про основи національної безпеки України», загрозу національній безпеці України в економічній та екологічній сферах. Стосовно технічного стану автодорожніх мостів, що підпорядковані «Укравтодору», в постанові підкреслюється, що 52 % мостів на дорогах загального користування не задовольняють частково чи повністю вимоги чинних норм експлуатації і тим самим порушують вимоги безпечної їх експлуатації. Значна кількість автодорожніх мостів (близько 25 %), потребують капітального ремонту або реконструкції. Середній термін служби прогонових будов є дуже низьким. (Зауважимо, що 93 % автодорожніх мостів в Україні – залізобетонні).

Причини зниження очікуваного ресурсу є на усіх стадіях життєвого циклу споруд. Низький технічний стан та мала довговічність залізобетонних мостів пояснюються насамперед низькою якістю будівництва та відсутністю належної системи експлуатації. Проте сьогодні все частіше визнається [5], що зниження середнього терміну служби до 45 – 50 років закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, тому що в проектному вирішенні ніяк не відображається, в яких умовах і з якою швидкістю перебігатиме деградація залізобетону. На етапі проектування ми не маємо жодних важелів контролю і прогнозу довговічності, розрахункові нерівності за першим і другим граничними станами не пов'язані із змінною часу [3]. Нормативні документи з розрахунку залізобетонних елементів мостів не мають апарата керування довговічністю, не містять регламентацій з кількісної оцінки впливу на довговічність елемента фізичних і механічних характеристик матеріалів, кількісної оцінки впливу оточуючого середовища. У результаті з'ясовується, що декларований нормами проектування мостів термін служби залізобетонних прогонових будов 80–100 років для України є нереальним [4].

У цих умовах, очевидно, необхідно в моделях прогнозувати ресурс залізобетонних елементів мостів на етапі розроблення проекту моста. Це актуальне завдання має велике соціально-

економічне значення. Його розв'язок може стати надійною основою для стратегічного планування у будівництві і експлуатації. У роботі, що пропонується, викладено один із можливих підходів до розроблення моделі прогнозу довговічності залізобетонних елементів мостів.

Мета роботи – розробити алгоритми прогнозу довговічності залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування. Для досягнення поставленої мети у роботі приймається узагальнена інтегральна модель деградації залізобетону. Центральним місцем у моделі є функція деградації саме бетону. Функція деградації бетону у нашому дослідженні описується диференційними рівняннями аналітичної теорії дифузії А. Фіка і завдання роботи є розбудова спеціальної імовірнісної процедури статистичного методу – методу Монте-Карло для розв'язку диференційних рівнянь деградації бетону.

Формулювання завдань дослідження. Проблема прогнозу довговічності споруд складна. Її коректна постановка вимагає обліку мінливості матеріалів і навантажень у часі, чутливості до деградації конструктивної форми споруди, умов будівництва, умов експлуатації, характеристик довкілля, врахування соціально-економічних вимог. За такої великої кількості вихідної інформації завдання стає важкодоступним для огляду, фактично таким, що не розв'язується. Тому у цій роботі виділена одна складова – бетон – і ставиться завдання розбудови моделі деградації (корозії) бетону.

Науковою гіпотезою, яка дає змогу перейти від часу критичної деградації бетону до часу деградації залізобетону, є інтегральна модель деградації залізобетону [8], яка являє собою кусково-лінійну функцію (рис. 1), яка описує рівень корозії арматурної сталі з плином часу залежно від стану захисного шару бетону.

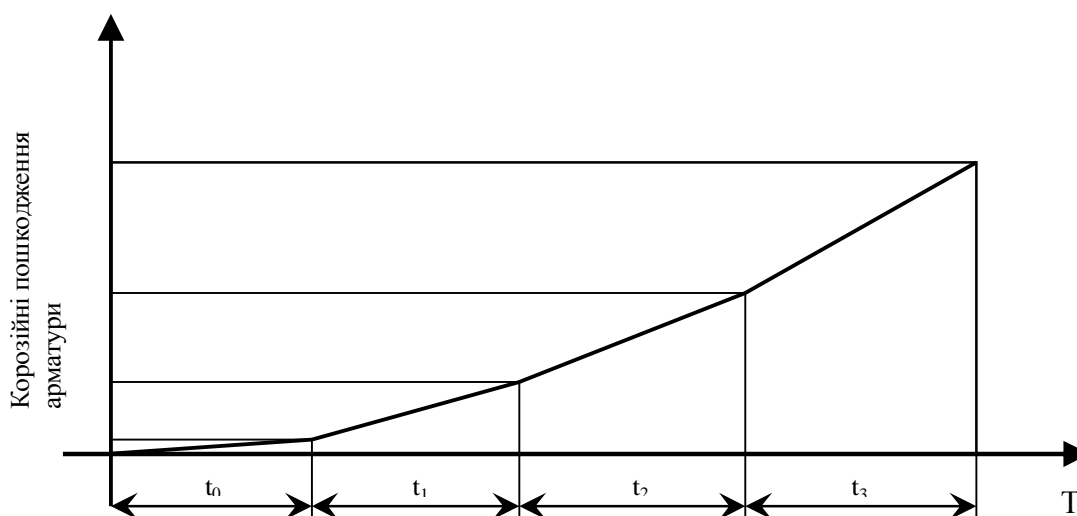


Рис. 1. Схема деградації

Ідеалізована схема деградації, показана на рис. 1, має чотири характерні інтервали часу:

- t_0 – час повної карбонізації захисного шару арматури;
- t_1 – початок корозії арматури, час руйнування пасивуючого шару арматури і незначного тріщиноутворення;
- t_2 – час корозії арматури незахищеної пасивуючим шаром та інтенсивного тріщиноутворення;
- t_3 – час інтенсивної корозії, що супроводжується сколюванням захисного шару і сягає свого граничного рівня – припинення експлуатації.

Термін служби елемента – ресурс T є сумою означених інтервалів часу.

Центральна гіпотеза, яка дає змогу прогнозувати ресурс залізобетонного елемента моста, полягає у такому:

1. За умови декомпозиції процесу деградації, як це представлено ідеалізованою діаграмою рис. 1, можна прогнозувати ресурс елемента сумою прогнозів кожного із чотирьох етапів:

$$T = t_0^p + t_1^p + t_2^p + t_3^p. \quad (1)$$

2. Постулюється, що час перебігу першого і другого етапів в сумі становлять приблизно половину ресурсу залізобетонного елемента:

$$t_0^p + t_1^p \approx 0,5T. \quad (2)$$

У фізичному сенсі $0,5 T$ – є часом початкового тріщиноутворення в бетоні, який проходить після повної карбонізації і насичення захисного шару хлоридами.

Теоретичною базою опису швидкості деградації захисного шару бетону $t_0^p + t_1^p$ є загальні закони аналітичної теорії дифузії, відомі як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка.

Сьогодні ми маємо фундаментальні дослідження українських і зарубіжних учених, якими встановлюються детерміновані моделі корозійного руйнування бетону та залізобетону з плином часу [1; 6; 8]. Нашою ж метою є розбудова імовірнісної моделі.

Диференційні рівняння стохастичних процесів деградації бетону. Для прогнозу часу перебігу першого етапу деградації t_0^p – процесу карбонізації, використовується одновимірне диференційне рівняння першого закону Фіка [6]:

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (3)$$

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (у цьому випадку – вуглецю), так звана щільність дифузійного потоку;

$C = C(x, t)$ – концентрація речовини, що дифундує, функція координати x і часу t ;

D – коефіцієнт дифузії газу в бетоні, $\text{см}^2/\text{с}$;

Процес дифузії хлоридів описується моделлю другого закону Фіка [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (4)$$

де $C = C(x, t)$ – концентрація іонів хлориду на глибині x і часу t , $\text{кг}/\text{см}^3$;

D – коефіцієнт дифузії хлоридів в бетоні, $\text{см}^2/\text{с}$;

t – час, с (рахується від початку експлуатації);

x – координата, нормальна до поверхні бетону, см.

Представлений теоретичний базис детерміністичного прогнозу ресурсу залізобетонних елементів є основою для розроблення великої кількості моделей деградації [1; 6].

Статистичні моделі деградації бетону. Карбонізація бетону відбувається за рахунок проникнення карбону у захисний шар залізобетону із атмосфери. Залежно від багатьох умов, таких як вологість, середня температура, насиченість карбоном довкілля тощо, швидкість карбонізації змінюється. Цей факт дуже ускладнює аналітичні розрахунки. До того ж сам процес проникнення карбонатів і хлоридів в бетон сьогодні ще недостатньо вивчений процес. Тому для моделювання стохастичних процесів карбонізації та насичення хлоридами ми прийняли статистичний метод Монте-Карло [8].

Алгоритми карбонізації та насичення хлоридами розроблено як стохастичний процес проникнення часток дифузанта за рахунок броунівського руху. Аналітично можна показати, що якщо векторна відстань від вихідної точки руху частки через N кроків, де середній квадрат відстані від початку пройденої відстані пропорційний до кількості кроків N [8], тобто

$$\overline{R_N^2} = N \cdot L^2, \quad (5)$$

де L – довжина кожного кроку.

Оскільки кількість кроків пропорційна до часу, то

$$\bar{R}^2 = x \cdot t, \quad (6)$$

де x – зсув частки; тобто середній квадрат відстані пропорційний до часу (середня відстань не пропорційна до часу (!)).

Зсув частки в наперед заданому напрямку, або точніше середній квадрат зсуву \bar{x}^2 , визначається рівнянням Ейнштейна для одновимірного простору. Середній квадрат зсуву часток при цьому є пропорційний до часу:

$$\bar{x}^2 = 2D \cdot t. \quad (7)$$

Враховуючи (7), отримаємо час, необхідний для виконання одного циклу зміщення частки:

$$t = \frac{\bar{x}^2}{2D}. \quad (8)$$

З урахуванням (5)–(8) отримаємо час T , необхідний для виконання усіх n циклів зміщення частки:

$$T = n \cdot t. \quad (8)$$

На перший погляд модель виглядає дуже просто, але найбільша складність полягає якраз у тому, щоб правильно порахувати кількість циклів n . Умовою для підрахунку кількості ітерацій n є досягнення на вибраній глибині зразка критичної концентрації дифузанта.

Сам алгоритм складається з таких кроків:

1. Задаються такі параметри: ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико-механічні властивості.
2. Задається концентрація карбонатів на вході у зразок і критична концентрація на поверхні арматури.
3. Виконується цикл до досягнення критичної концентрації карбонатів на заданій глибині зразка ($C(x) \leq C_{\text{крит}}$).
4. Виконується цикл за кількістю часток кожного шару зразка.
5. За допомогою генератора випадкових чисел розігрується зсув x кожної частки поточного шару.
6. Генерується необхідна концентрація дифузанта на денній поверхні зразка C_0 .
7. Обчислюється загальна кількість кроків n у циклі п.3, причому за один крок вважається повне виконання п. 4, вважаючи, що усі частки зразка рухаються водночас.
8. За формулою (8) обчислюється час t , необхідний для виконання одного кроку.
9. За формулою (9) обчислюється час T , необхідний для виконання усіх n кроків процедури.

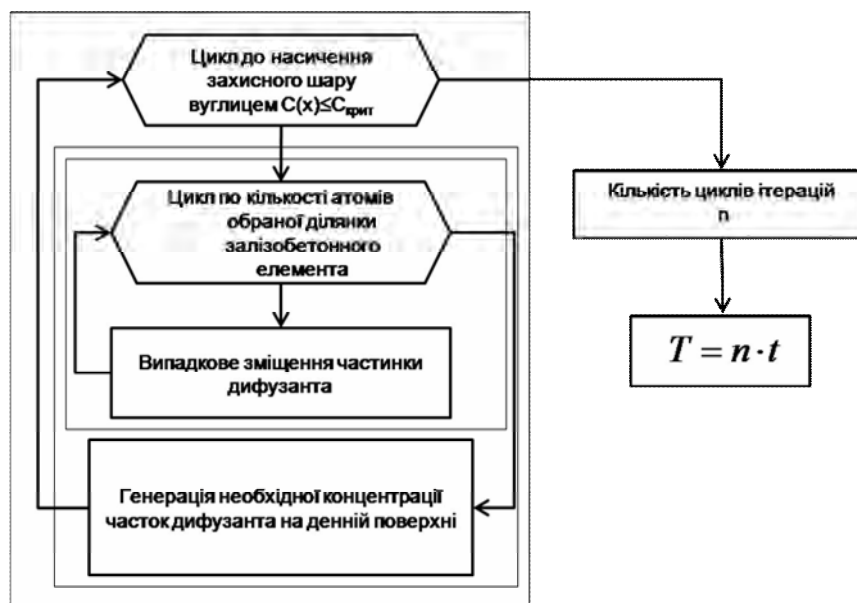


Рис. 2. Схема алгоритму карбонізації

Алгоритм моделі карбонізації, зображений на рис. 2, був реалізований в програмних комплексах VisualBasic та MathCAD. Варто зауважити, що на відміну від VisualBasic, генератор випадкових чисел в MathCAD є псевдовипадковий, тому була зроблена перевірка, чи істотно вплине цей факт на результат. Виявляється, що в нашому випадку жодних розбіжностей не виявлено.

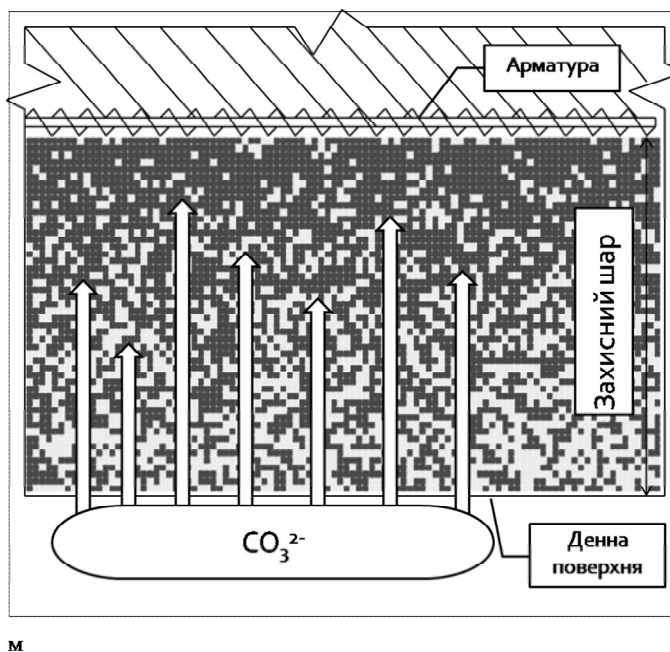


Рис. 3. Схема проникнення карбонатів

На рис. 3 зображено схему проникнення карбонатів у захисний шар залізобетонного елемента. Світлі квадратики – частки карбону, темними позначено цементний камінь. Процес карбонізації небезпечний тим, що утворює наскрізний ефект, і захисний шар втрачає свої захисні властивості.

Сьогодні напевне ще не відомо, що відбувається швидше – карбонізація чи хлоридизація, але відомо, що один процес може прискорювати інший. Саме через наскрізний ефект хлоридизація і карбонізація можуть проходити і одночасно. Аналітично підтвердити ці факти розрахунками сьогодні майже неможливо.

Як приклад, взято чотири найпоширеніші товщини захисного шару залізобетонних елементів мостів, які використовуються у середовищі з помірною агресивністю, де концентрація CO₂ у повітрі становлять 0,03 %. Результати обчислень наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати обчислень

Товщина захисного шару, мм	Час T (до досягнення критичної концентрації C _{крит} карбонатів), років, за заданих значень коефіцієнтів дифузії D, мм ² /рік		
	0,9·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	4,5·10 ⁻⁸
30	75	38	15
40	100	50	20
50	126	62	26
60	151	75	30

Алгоритм моделі насичення хлоридами (рис. 4), подібно до алгоритму карбонізації, складається з таких кроків:

1. Задаються такі параметри: ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико-механічні властивості.

2. Задається концентрація іонів хлору на вході у зразок і критична концентрація на поверхні арматури.
3. Виконується цикл до досягнення критичної концентрації хлоридів на заданій глибині зразка ($C(x) \leq C_{\text{крит}}$).
4. Виконується цикл за кількістю часток кожного шару зразка.
5. За допомогою генератора випадкових чисел розігрується зсув x кожної частки поточного шару.
6. Обчислюється загальна кількість кроків n у циклі п. 3, причому за один крок вважається повне виконання п. 4, вважаючи, що усі частки зразка рухаються одночасно.
7. За формулою (8) обчислюється час t , необхідний для виконання одного кроку.
8. За формулою (9) обчислюється час T , необхідний для виконання усіх n кроків процедури.

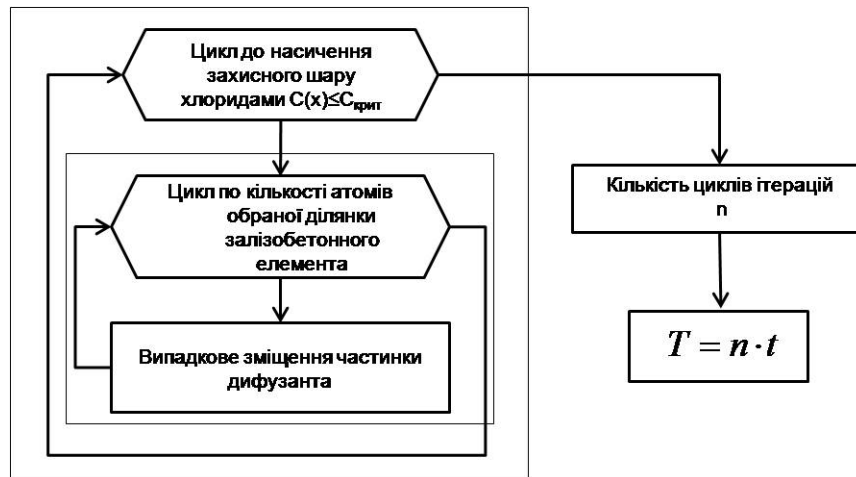


Рис. 4. Схема алгоритму насичення хлоридами

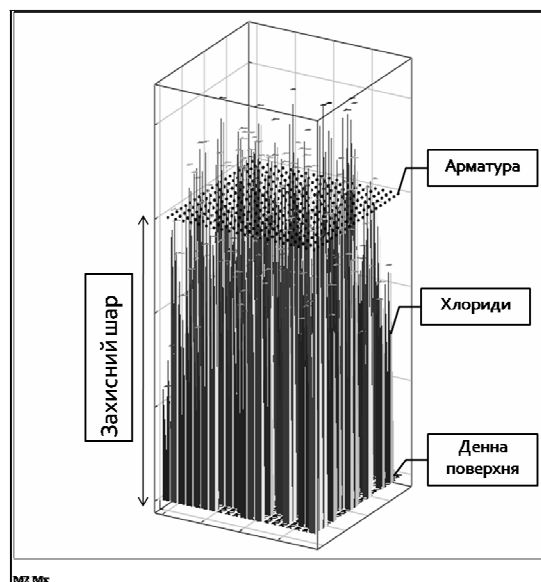


Рис. 5. Графічне відображення моделювання процесу насичення захисного шару хлоридами

Як приклад, взято чотири найпоширеніші товщини захисного шару залізобетонних елементів мостів, які використовуються у середовищі з помірною агресивністю, де концентрація хлоридів по масі бетону на денній поверхні – 0,15 %, а критична концентрація хлоридів на рівні арматури – 0,02 %. Результати обчислень наведено у табл. 2.

Результати обчислень

Товщина захисного шару, мм	Час T (до досягнення критичної концентрації $C_{\text{крит}}$ карбонатів), років, за заданих значень коефіцієнтів дифузії D, мм ² /рік		
	$5 \cdot 10^{-12}$	$10 \cdot 10^{-12}$	$15 \cdot 10^{-12}$
30	168	63	42
40	168	82	56
50	210	105	70
60	252	126	84

Висновки: 1. Прийнята в роботі імовірнісна процедура методу Монте-Карло для розв'язку диференціальних рівнянь деградації бетону А. Фіка дає доволі надійні алгоритми прогнозу довговічності залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування.

2. Реалізація запропонованих алгоритмів у програмному комплексі MathCAD показує їх достатньо високу швидкість. Результати обчислення часу деградації захисного шару і прогнозу терміну служби елемента за тестовими прикладами виявились доволі реалістичними.

3. Запропонована у роботі модель життєвого циклу, хоча і відображає доволі точно процес деградації захисного шару, є приблизною, оскільки є приблизною гіпотеза (2) стосовно того, що час перебігу першого і другого етапів деградації в сумі становлять приблизно половину ресурсу залізобетонного елемента.

4. Запропонована модель життєвого циклу не відображає напружено-деформованого стану елемента. Для подальшого її вдосконалення необхідно врахувати вплив рухомого навантаження на довговічність автодорожніх мостів.

1. Бліхарський З.Я., Стащук 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.* 2. Бекман И.Н. *Математика диффузии: Лекции.* – М.: МГУ, 2004. 3. ДБН В.2.3-14: 2006. *Мости і труби. Правила проектування // Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства.* – К., 2006. 4. ДБН В.2.3-22 – 2009 "Мости і труби. Основні вимоги проектування" // *Мінрегіонбуд України.* – К., 2009. 5. Лантух-Лященко А.І. *О прогнозе остаточного ресурса моста: Зб. "Дороги і мости".* – К.: ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7, Т. 2. – С. 3–9. 6. Маринин М.Н. *О построении кинетической модели карбонизации железобетонных конструкций транспортных сооружений. Математическое моделирование и краевые задачи: Труды III Всероссийской научной конференции.* – Ч.1. – Самара: СамГТУ, 2006. 7. *Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа.* – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. 8. Трухан С.Н. *Моделирование диффузии методом Монте-Карло // Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет.* – Новосибирск, 2008. 9. 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. – P. 381–400.