

ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗАХИСНОГО ШАРУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

В статті представлено моделі визначення довговічності захисного шару залізобетонних елементів споруд за статистичним методом. Наводяться алгоритми визначення довговічності захисного шару залізобетонних елементів споруд.

В статье представлены модели определения долговечности защитного слоя железобетонных элементов конструкций при помощи статистического метода. Приводятся алгоритмы определения долговечности защитного слоя элементов сооружений.

This paper presents the models and algorithms for determination of longevity of protective coating of reinforced concrete parts of structures by a statistical (Monte-Carlo) method.

Вступ

Досі питанню довговічності захисного шару залізобетонних елементів приділялося дуже мало уваги, про що свідчить той факт, що на українських автошляхах 90...95 % залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти захисного шару й арматури, які знижують довговічність і несучу здатність.

Норми регламентують, що розрахунковий ресурс мостів має бути 70...100 років [3]. При цьому в розрахунках немає змінної часу, що в свою чергу пояснюється детерміністичністю розрахункових моделей. В дійсності всі процеси і навантаження в реальному житті відбуваються в функції часу. Сьогодні стає очевидною необхідність в моделях життєвого циклу споруд, які б враховували стохастичну природу характеристик матеріалів і навантажень.

Проблема визначення довговічності споруди складна, її коректна постановка вимагає обліку мінливості матеріалів і навантажень у часі, чутливості до деградації конструктивної форми споруди, умов будівництва, умова експлуатації, характеристики навколишнього середовища, соціально-економічні вимоги. За такої великої кількості вихідної інформації завдання стає важкодоступним для огляду, практично нерозв'язним.

Нові споруди мають певні запаси несної здатності, які створюються за рахунок того, що нормами передбачаються числові характеристики матеріалів і навантажень з урахуванням їхньої випадкової природи. Згодом конструкції зношуються, у них накопичуються дефекти й безпека конструкцій, тобто їхня надійність зменшується. А це ставить перед інженерами завдання кількісної оцінки надійності й довговіч-

ності конструкцій як у процесі експлуатації, так і на стадії проектування. Проблеми такого роду зараз стають особливо актуальними через різке зростання кількості споруд, що вимагають ремонту й реконструкції.

Наукові пошуки останніх років з створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [5] склали базу перших в Україні і СНД чинних нормативних документів [3].

Ця робота присвячена розробці моделі визначення довговічності захисного шару залізобетонних елементів за статистичним методом. Довговічність захисного шару залізобетонного елемента конструкції має тісний зв'язок з довговічністю самого елемента і конструкції в цілому.

Мета роботи

Метою роботи є розробка моделі довговічності захисного шару залізобетонного елемента з урахуванням ймовірнісного характеру стану оточуючого середовища, якості матеріалів, помилок при будівництві і т.д.

Формулювання задачі

Довговічність залізобетонного елемента значною мірою визначається довговічністю захисного шару. Після деградації захисного шару починається активна корозія арматури. Термін служби елемента T до вичерпання ресурсу елемента фактично визначити досить складно. Скористаємось гіпотезою з роботи [5], за якою приблизно половина часу життєвого циклу в експлуатації припадає на деградацію захисного шару.

$$t_0 + t_1 \approx 0,5T, \quad (1)$$

де t_0 – час повної карбонізації захисного шару арматури; t_1 – час насичення захисного шару хлоридами (початок корозії арматури і незначного тріщиноутворення).

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

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

Для прогнозу часу карбонізації захисного шару скористаємося одномірним диференціальним рівнянням першого закону Фіка [1]:

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

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (в даному випадку – вуглецю), так звана щільність дифузійного потоку; $C(x, t)$ – концентрація речовини, що дифундує як функція координати x і часу t ; D – коефіцієнт дифузії газу в бетоні.

Процес дифузії хлоридів описується диференціальним рівнянням другого закону Фіка [1]:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де $C = C(x, t)$ – концентрація іонів хлориду на глибині x в час t ; D – коефіцієнт дифузії хлоридів у бетоні; t – час (рахується від початку експлуатації); x – координата, нормальна до поверхні бетону.

Ставиться задача отримати час карбонізації захисного шару арматури t_0 та час насичення захисного шару хлоридами t_1 за статистичним методом – методом Монте-Карло.

Алгоритм моделі карбонізації

Карбонізація бетону проходить за рахунок проникнення карбону у захисний шар залізобетону із атмосфери. В залежності від багатьох умов, таких як вологість, середня температура, насиченість карбоном довкілля та ін. швидкість карбонізації змінюється [6]. Цей факт дуже ускладнює аналітичні розрахунки і робить їх практично неможливими. Теж саме стосується і хлоритизації. Проникнення карбонатів і хлоридів в бетон не достатньо вивчений процес, ускладнений складністю аналітичного роз-

в'язання диференціальних рівнянь законів Фіка [9]. Тому для вирішення задачі було запропоновано алгоритм проникнення часток дифузанта, як броунівського руху, за методом Монте-Карло.

Аналітично можна показати, що середній квадрат відстані від початку руху R_N пропорційний числу кроків N [4], тобто:

$$\bar{R}_N^2 = N \cdot x^2, \quad (4)$$

де x – довжина кожного кроку.

З огляду на те, що число кроків пропорційне часу $t = N \cdot x$, маємо:

$$\bar{R}_N^2 = x \cdot t, \quad (5)$$

де x – зсув частки, що дифундує.

(Зауважимо, що *середній квадрат відстані* пропорційний часу, тоді як середня відстань не є пропорційною часу).

Середній квадрат зсуву x^2 визначається рівнянням Ейнштейна для одномірного простору. Середній квадрат зсуву часток при цьому виявляється пропорційний часу:

$$\bar{x}^2 = 2D \cdot t. \quad (6)$$

Виходячи з (5), отримаємо час, необхідний для виконання одного циклу зміщення частки:

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

Виходячи з (4) – (7), отримаємо час T , необхідний для виконання всіх n циклів зміщення частки:

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

На перший погляд модель виглядає дуже просто, але найбільша складність полягає якраз в тому, щоб вірно порахувати кількість циклів n .

Сам алгоритм складається з наступних кроків:

1. Обирається ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико-механічні властивості.
2. Здається концентрація вуглекислого газу на вході в зразок і на виході з нього.
3. Робиться розіграш проходження кожною часткою шляху до моменту отримання шуканої концентрації на виході.
4. Підраховується кількість циклів розіграшів.
5. Обчислюється дійсний час проходження одного циклу в секундах.

6. Обчислюється загальний час перебігу експерименту.

Алгоритм моделі карбонізації, зображений на рис. 1, було реалізовано в програмних комплексах Visual Basic та MathCAD. Слід зауважити, що на відміну від Visual Basic генератор

випадкових чисел в MathCAD псевдовипадковий, тому було зроблено перевірку, чи істотно вплине цей факт на результат. Виявляється, що в нашому випадку ніяких розбіжностей не виявлено.

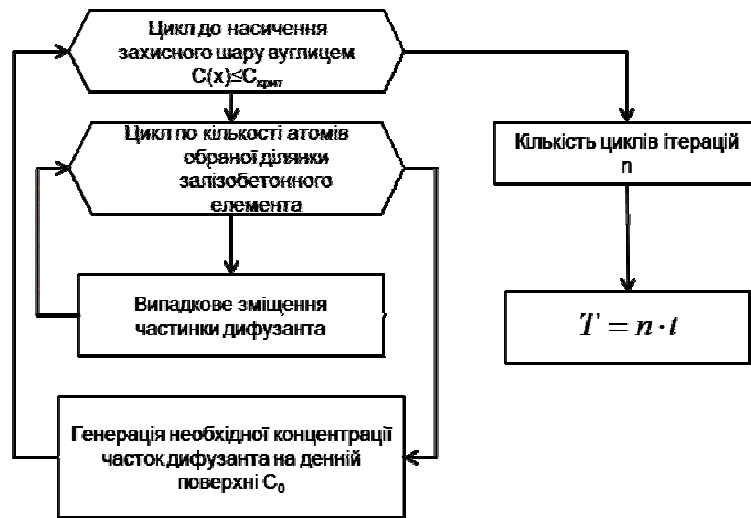


Рис. 1. Графічне зображення алгоритму карбонізації

На сьогодні однозначно ще невідомо, що проходить швидше – карбонізація чи хлоридизація, але відомо, що один процес може прискорювати інший [10]. Саме через наскрізний ефект хлоридизація і карбонізація можуть проходити й одночасно. Аналітичне підтвердження цих положень розрахунками нам невідоме.

Як приклад взято три найпоширеніші товщини захисного шару залізобетонних елементів мостів, які використовуються у середовищі з помірно агресивною, де концентрація CO₂ у повітрі складає 0,03 %. Результати обчислень наведені в табл. 1.

Алгоритм моделі насичення хлоридами

Алгоритм, графічно зображений на рис. 2, складається, подібно до алгоритму карбонізації, з наступних кроків:

1. Обирається ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико-механічні властивості.
2. Задається концентрація хлориду на виході в зразок і на вході з нього.
3. Робиться розіграш проходження кожною часткою шляху до моменту отримання шуканої концентрації на виході.
4. Підраховується кількість циклів розіграшів.
5. Обчислюється дійсний час проходження одного циклу в секундах.

6. Обчислюється загальний час перебігу експерименту.

Таблиця 1

Час до досягнення критичної концентрації карбонатів

Товщина захисного шару, мм	Час T , років, при заданих значеннях коефіцієнтів дифузії D , мм ² /рік		
	$0,9 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
30	75	38	15
40	100	50	20
50	126	62	26

У якості прикладу взято три значення товщини захисного шару залізобетонних елементів мостів, що використовуються у середовищі з помірно агресивною, де концентрація хлоридів по масі бетону на денній поверхні 0,15 %, а критична концентрація хлоридів на рівні арматури 0,02 %. Результати обчислень наведені в табл. 2.

В табл. 3 представлено результати обчислень часу деградації захисного шару залізобетонного елемента.

Для порівняння отриманих результатів були використані відомі аналітичні і емпіричні моделі визначення часу карбонізації (9) – (11) і для визначення часу насичення хлоридами (12) – (14).

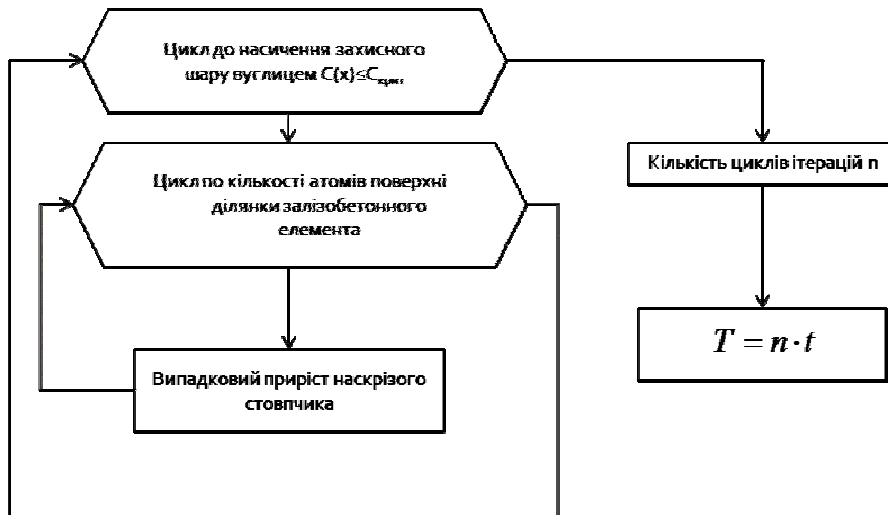


Рис. 2. Графічне зображення алгоритму насичення хлоридами

Таблиця 2

Час до досягнення критичної концентрації хлоридів

Товщина захисного шару, мм	Час T , років, при заданих значеннях 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

В якості прикладу взято захисний шар товщиною 30 мм, з коефіцієнтом дифузії для визначення часу карбонізації $D_c = 0,9 \cdot 10^{-5}$ мм²/рік, концентрацією вуглекислого газу на поверхні $C_c = 0,03$ %. Для визначення часу насичення захисного шару хлоридами коефіцієнт дифузії $D_{cl} = 5 \cdot 10^{-12}$ мм²/рік, поверхнева концентрація хлоридів $C_{cl} = 0,15$ %.

Рівняння (9), яке дозволяє встановити приблизний час t , необхідний для проникнення агресивних речовин до поверхні металу [4]:

$$t = \frac{x^2}{4D} \quad (9)$$

З виразу (9) витікає, що довговічність конструкції визначається товщиною захисного шару x і ефективним коефіцієнтом дифузії D агресивних компонентів у шарі.

Інша залежність наводиться в роботі [7]:

$$t = \frac{x^2 m_0}{2DC} \quad (1)$$

де m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

В документі [8] надається інша форма представлення властивостей бетону в моделі карбонізації:

$$t = \sqrt[-n+0.5]{\frac{x}{\left(\frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D \cdot C}{a}\right)^{0.5} \cdot t_0^n}} \quad (11)$$

де x – товщина захисного шару; k_1 – параметр середнього вмісту води в бетоні; k_2 – параметр умов експлуатації; k_3 – коефіцієнт водоцементного відношення; a – граничне значення вмісту CO₂ в карбонізованому бетоні; t_0 – час експлуатації; n – параметр кліматичних умов експлуатації.

Аналітичний розв’язок (12) рівняння (3) встановлює зв’язок глибини проникнення хлоридів із часом [9]:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_l}{C_s - C_l} \right)} \right]^2 \quad (12)$$

де $\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

В роботі [9] пропонується така математична модель проникнення хлоридів, яка залежить від водоцементного співвідношення:

$$t = \frac{129 \cdot (x)^{1,22}}{W_{CR} \cdot (C_{cl})^{0,42}} \quad (13)$$

де W_{CR} – водоцементне співвідношення; C_{cl} – концентрація хлоридів; x – товщина захисного шару.

В роботі [2] А. І. Васильєв пропонує іншу модель проникнення хлоридів:

$$t = \sqrt[a]{x}, \quad (14)$$

де a – коефіцієнт, який враховує властивості бетону.

Таблиця 3

Порівняння результатів	
Модель визначення глибини проникнення дифузанта згідно формули №:	Час T деградації захисного шару, років
(9)	25
(10)	23
(11)	31
Запропонована модель карбонізації	30
(12)	27
(13)	38
(14)	20
Запропонована модель насичення хлоридами	41

Висновки

1. Прийнята в роботі ймовірнісна процедура методу Монте-Карло для розв'язку диференціальних рівнянь деградації бетону А. Фіка дає досить реалістичні алгоритми прогнозу довговічності залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування.

2. Реалізація запропонованих алгоритмів у програмному комплексі MathCAD показує їх достатньо високу швидкість.

3. Запропонована в роботі модель життєвого циклу, хоча і відображає досить точно процес деградації захисного шару, є приблизною, оскільки є приблизною гіпотеза (1) стосовно того, що час протікання першого і другого етапів деградації в сумі складають приблизно половину ресурсу залізобетонного елемента.

4. Явним недоліком запропонованої моделі життєвого циклу є те, що модель не відображає напружено-деформованого стану елемента.

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

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бліхарський, З. Я. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі. Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж [Текст] / З. Я. Бліхарський, М. Г. Стащук, О. М. Малик. – Донецьк, 2003.
2. Васильев, А. И. Вероятностная оценка остаточного ресурса физического ресурса срока службы железобетонных мостов [Текст] / А. И. Васильев.
3. ДБН В.2.3-14:2006. Мости і труби. Правила проектування [Текст]. – Мін-во буд-ва, архіт. та житл.-комун. госп-ва. – К., 2006. – 359 с.
4. Бекман, И. Н. Математика диффузии. Лекции [Текст] / И. Н. Бекман. – М.: МГУ, 2004.
5. Лантух-Лященко, А. И. О прогнозе остаточного ресурса моста [Текст] / А. И. Лантух-Лященко // Зб. «Дороги і мости». – 2007. – Вип. 7, т. 2. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – С. 3-9.
6. Маринин, М. Н. О построении кинетической модели карбонизации железобетонных конструкций транспортных сооружений [Текст] / М. Н. Маринин // «Математическое моделирование и краевые задачи». Тр. Третьей Всерос. науч. конф. – Ч. 1. – Самара: СамГТУ, 2006.
7. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа [Текст]. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974.
8. New Approach to Durability Design [Text] // CEB Bulletin d'Information. – 1997. – No. 238.
9. "Critical Literature Review of High-Performance Corrosion. Reinforcements in Concrete Bridge Applications [Text] / W. Hartt [et al.]. – 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 [Text] / K. Takewaka, S. Mastumoto // ACI SP 109-17. – American Concrete Institute, 1988. – P. 381-400.

Надійшла до редколегії 21.05.2010.

Прийнята до друку 26.05.2010.