

Янчук Л.Л.

ДЕТЕРМІНІСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ.

Анотація. Виконано аналіз моделей деградації залізобетонних елементів, що побудований на основі класичних законів аналітичної теорії дифузії. Показано, що такі детерміністичні моделі не мають широкого застосування в практиці проектування. Пропонується альтернативна аналітична модель деградації на основі якої будується модель життєвого циклу.

Ключові слова: Деградація залізобетону; модель деградації; модель життєвого циклу.

Аннотация. Выполнен анализ моделей деградации железобетонных элементов, построенный на основе классических законов аналитической теории диффузии. Показано, что такие детерминистические модели не имеют широкого применения в практике проектирования. Предлагается альтернативная аналитическая модель деградации на основе которой строится модель жизненного цикла.

Ключевые слова: Деградация железобетона; модель деградации; модель жизненного цикла.

Abstract. The analysis of the degradation models of reinforced concrete elements constructed on the basis of laws of classical analytic theory of diffusion. Shown that such deterministic models are not widely used in design practice. Proposed an alternative analytical model based on a degradation model is based lifecycle.

Key words: Degradation of concrete; degradation model, the model life cycle.

Проблема

Мостові переходи України є найбільш коштовною частиною національної дорожньої інфраструктури. Термін їх експлуатації обчислюється десятками років, догляд виконується інженерами декількох поколінь. Тому задача

прогнозу терміну безпечної експлуатації мостового переходу є нагальною, значної економічної і соціальної ваги. Мостовий перехід є складним комплексом споруд і розбудову моделі прогнозу ми бачимо тільки як набір взаємозв'язаних моделей прогнозу життєвого циклу експлуатації його конструктивних елементів. Тут розглядається модель прогнозу залізобетонних елементів власне моста.

Сьогодні науковці і інженери дорожньої сфери відмічають суттєвий розрив між рівнем наукового супроводу проектування елементів мостового переходу та системи їх експлуатації. Чітко виявилась потреба в новітній методології наукового супроводу експлуатації будівельних конструкцій мостових переходів. Особливе місце в цій методології займає задача оцінки експлуатаційного стану і прогнозу ресурсу залізобетонних елементів споруд, яка носить узагальнену назву *«життєвий цикл»*. В цей термін вкладається значно ширший сенс, ніж раніше. Його розуміють як модель теорії споруд, яка дає змогу, в інтересах суспільства, проектувати і експлуатувати конструктивні елементи керованої довговічності.

В умовах обмеженого фінансування моделі життєвого циклу мають забезпечити стратегічне планування видатків на експлуатацію споруд так, щоби протягом терміну служби зберегти параметри функціональності, такі як надійність, безпека експлуатації, збереження оточуючого середовища, архітектурної, естетичної і історичної цінності споруди.

З іншого боку, незважаючи на величезні зусилля науковців, які були затрачені на те, щоби розробити сучасну модель напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, існуючих моделей розрахунку за першим і другим граничними станами сьогодні явно недостатньо. Потрібні нові моделі теорії споруд, 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 залізобетонних елементів на заданий термін служби, прогнозувати життєвий цикл елемента в експлуатації.

Дійсно, сучасні норми проектування будівельних конструкцій [7] декларують термін служби споруд 100 років. Цей термін ніяк не обґрунтований і, до того ж, його слід розуміти в сенсі *«не менш ніж 100 років»*. Реальність є зовсім іншою. Так, наприклад, збірно-монолітні залізобетонні прогонові будови автодорожніх мостів України мають середній життєвий цикл в експлуатації

порядку 35 - 45 років [8]. В Росії, за визнанням проф. О.І.Васильєва, цей строк складає ще менше – 30 років [4]. Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруди. Зараз визнається, що зниження середнього терміну служби закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, тому що в проектному рішенні ніяк не відображається в яких умовах і з якою швидкістю протікатиме деградація залізобетону [9].

Очевидно, що існуючі моделі не є адекватними нашому досвіду будівництва і експлуатації мостів. Тому назріла необхідність звернення до нового інструментарію, новим моделям, що відповідають українським реаліям.

Проблема прогнозу ресурсу залізобетонних елементів, як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації, - завжди була найменш вивченою в теорії споруд, а з іншого боку – найбільш ваговою в соціально-економічному плані. Сьогодні, в умовах вкрай обмеженого фінансування системи експлуатації споруд, стратегічне планування видатків на утримання споруд має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу залізобетонних елементів.

Наукові пошуки останніх років з створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [8,9 ,10 ,19] склали базу перших в Україні і СНД чинних нормативних документів [5,6,7], які сьогодні в системі експлуатації мостів регламентують обов'язкову процедуру інтегральної оцінки прогнозу технічного стану конструктивних елементів і споруди цілком в функції часу і, таким чином, прогнозувати її залишковий ресурс. Проте, згадані нормативні документи ще далекі від досконалості і потребуються значні зусилля з подальшого їх розвитку та вдосконалення.

Що ж стосується прогнозу ресурсу залізобетонних елементів на етапі проектування, то нам невідомі дослідження в Україні або в Росії, які мають реальне практичне впровадження. Публікації, на які нижче будуть посилання, на наш погляд, є скоріше постановкою задачі, формулюванням концепції визначення ресурсу елемента в процесі проектування.

Мета роботи

Метою роботи є науковий пошук концепції моделювання деградації залізобетонних елементів мостів з плином часу та прогноз терміну життєвого циклу. Мета дослідження формулюється в таких задачах:

- аналіз моделей деградації залізобетону;

- розробка детерміністичної моделі прогнозу терміну життєвого циклу залізобетонних елементів моста.

Формулювання задачі

Спочатку введемо декілька термінів, якими ми оперуємо в роботі.

Деградація – природній процес погіршення початкових технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента. Протікання процесу може бути описано аналітичною або числовою моделлю деградації.

Модель деградації – аналітична залежність, яка дає середнє значення фактору деградації в функції часу:

$$R(t) = R_l f(t), \quad (1)$$

де $R(t)$ – узагальнений фактор, деградація якого описується моделлю. Це може бути, наприклад, розрахунковий опір матеріалу, несна здатність елемента, ширина розкриття тріщин, параметр надійності і таке інше; R_l – початкове значення фактору деградації;

$f(t)$ - функція деградації, t – час.

Модель життєвого циклу - аналітична процедура, що дозволяє визначити час безпечного використання елемента (або споруди в цілому) при заданих навантаженнях в визначених умовах експлуатації. Це функція часу, якою описується процес погіршення технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом терміну служби елемента/споруди. В загальному випадку така функція має вид:

$$T_l = R(t) \cdot L(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (2)$$

де T_l - термін служби елемента, що прогнозується;

$R(t)$ - 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, рівень експлуатаційного утримання.

В термінах наведених вище, задача роботи формулюється як пошук аналітичної функції типу (1), що відображає *інтегрально* процес деградації залізобетонного елемента в функції часу і служить фундаментальною функцією для моделі життєвого циклу в формі (2). В поняття «*інтегрально*» тут вкладається сенс узагальнення в тому, що модель деградації має виражається

через один фактор деградації. В даному випадку за такий фактор прийнятий параметр тріщина утворення.

Детерміністичні моделі деградації

Дещо умовно, моделі деградації класифікуються за двома групами: детерміністичні (на пів ймовірнісні) моделі та стохастичні феноменологічні. Тут розглядаються детерміністичні.

Найбільш розповсюдженим детерміністичними моделями є такі, що описують швидкість деградації в залежності від часу карбонізації та насичення хлоридами захисного шару бетону. Постулюється, що інтенсивна корозія арматури починається після карбонізації або повного насичення (що наступить скоріше). Ці моделі базуються на загальних законах аналітичної теорії дифузії, відомими як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка (1855р.). Процес карбонізації описується одномірним диференціальним рівнянням першого закону Фіка:

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

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (в даному 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, $\text{см}^2/\text{с}$.

Так розв'язок диференційного рівняння (3) при допущенні, що концентрація вуглецю лінійно змінюється по товщині захисного шару бетону та градієнт концентрації є постійним, дає зв'язок часу з глибиною карбонізації бетону:

$$d_c = \left(\frac{2DCt}{m_0} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

де d_c – глибина карбонізації в напрямку координати x , нормальної до поверхні бетону

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

Модель деградації (3), (4) є феноменологічною, її параметри D , m_0 визначаються експериментально [1], [2], [12].

Інша форма представлення моделі карбонізації надається в роботі [13]:

$$d_c = \left(\frac{2k_1 k_2 k_3 D C t}{a} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (5)$$

де d_c – глибина карбонізації;

k_1 – параметр середнього вмісту вологи в бетоні;

k_2 – параметр умов експлуатації;

k_3 – коефіцієнт водо цементного відношення;

a – граничне значення вмісту CO_2 в карбонізованому бетоні;

t_0 – час експлуатації, $t_0 \leq t$;

n – параметр кліматичних умов експлуатації.

Деградація залізобетону, що характеризується накопиченням певної критичної кількості хлоридів в захисному шарі і, як наслідок, руйнуванням пасивуючого шару арматури, є також початком корозії арматури. Іони хлоридів, які завжди присутні в оточуючому середовищі, проникають через захисний шар по капілярній системі та по мікротріщинам. Процес дифузії хлоридів описується моделлю другого закону Фіка [20,22]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

де $C = C(x, t)$ - концентрація іонів хлориду на глибині x в 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.

Рівняння (6) при граничних і початкових умовах $C(x, t) = C_S$ для $x = 0$, $t > 0$ і $C(x, t) = C_I$ для $x > 0$, $t = 0$ та постійному коефіцієнту дифузії хлоридів в бетоні має розв'язок:

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (7)$$

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

C_I – початковий вміст хлоридів в бетон, $\text{кг}/\text{см}^3$;

C_S – концентрація хлоридів на поверхні захисного шару бетону, $\text{кг}/\text{см}^3$

Розв'язок (8) встановлює зв'язок глибини проникнення хлоридів з часом:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right) \right)} \right]^2, \quad (8)$$

де $erfc()$ – додаткова функція помилок.

Значна кількість дослідників [17] вважає, що врахування граничних та початкових умов $x = 0, t > 0$ і $C(x,t) = C_I$ в розв'язку рівняння (6) є зайвим в силу малості C_I порівняно з концентрацією хлоридів на поверхні захисного шару бетону C_S . В цьому випадку розв'язок рівняння (6) має дещо простішу форму:

$$C = C_S \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right]. \quad (9)$$

Залежності (4,5) та (7,8,9), при відомих параметрах коефіцієнту дифузії хлоридів в бетоні D , початковому вмісту хлоридів в бетоні C_I та концентрація хлоридів на поверхні захисного шару бетону C_S , дають змогу прогнозувати час деградації захисного шару залізобетону в залежності від його товщини, властивостей бетону і характеристик оточуючого середовища.

Якщо встановити критичне значення концентрації хлоридів на глибині товщини захисного шару, залежність (8) дає змогу встановити час закінчення етапу 3, тобто початок інтенсивної корозії арматури, яка веде до припинення експлуатації. В цьому випадку зв'язок товщини захисного шару d_c з часом його критичного насичення хлоридами дається залежністю [18]:

$$d_c = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{C_{CR} - C_I}{C_S - C_I} \right) \right) \sqrt{D \cdot t}, \quad (10)$$

де C_{CR} - критичне значення концентрації хлоридів.

Представлений теоретичний базис детерміністичного прогнозу ресурсу залізобетонних елементів послужив основою для розробки великої кількості моделей деградації [3,11,13,14,18,21]. Вони відрізняються між собою підходами у визначенні параметрів деградації: D - коефіцієнта дифузії хлоридів в бетоні, який є, в свою чергу, залежним від часу і типу конструкції; C_{CR} - критичного значення концентрації хлоридів в залежності від: типу цементу; водоцементного відношення; фізичних характеристик бетону; характеристик оточуючого середовища.

Викладений детерміністичний підхід прогнозу терміну служби, оснований на теоретичних засадах класичних законів дифузії принципово дає змогу час деградації бетону захисного шару. Проте, для розробки практичного апарату прогнозу ресурсу потребується вирішити низку задач пов'язаних з встановленням значень параметрів які входять до рівнянь моделей.

Дослідження, які експериментальним шляхом встановлюють вихідні параметри деградації все ще досить проти речиві і не мають широкого застосування. Так, наприклад, в роботі [2] вказується, що критичні значення концентрації хлоридів C_{CR} в залежності від фізичних характеристик бетону складають 0,1-0,5% від маси цементу. Тоді як в англомовній літературі [22] наводяться критичні значення в таких границях: 0,4 – 1,5% від маси цементу.

Викладені обставини призводять до того, що результати прогнозу деградації можуть значно відрізнятись при близьких вихідних даних. Одна із таких спроб практичного застосування законів Фіка для прогнозу деградації захисного шару наводиться в табл. 1. Дані таблиці взяті з документу [12].

Таблиця 1. Прогноз часу до початку корозії арматури

| Товщина захисного шару, мм | Час, років при значеннях коефіцієнта дифузії хлоридів в бетоні D , cm^2/c | | |
|----------------------------|---|--------------------|--------------------|
| | 5×10^{-7} | 5×10^{-8} | 5×10^{-9} |
| 25 | 0,6 | 5,6 | 56 |
| 50 | 2,3 | 23,0 | 230 |
| 75 | 5,0 | 50,0 | 500 |

Якщо взяти до уваги що бетони в мостобудівництві мають коефіцієнт дифузії хлоридів в бетоні D порядку $5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{c}$ і прийняти гіпотезу що термін деградації захисного шару складає приблизно половину терміну служби, то аналіз табл. 1 не дає ніяких підстав вважати реальним термін експлуатації в 100 років.

Викладений аналіз детерміністичної моделі основаної на рівняннях класичних теорії дифузії дає підставу вважати, що проблема моделювання прогнозу процесу деградації залізобетонних елементів все ще зостається актуальною і є необхідність в розробці нових моделей.

Модель прогнозу деградації залізобетонних елементів, що пропонується

В цій моделі деградація залізобетонного елементу описується одним фактором - параметром тріщиностійкості. Модель є детерміністичною, в ній ігнорується випадкова природа змінного в часі фактору і змінні та функції на час t приймають фіксовані значення.

Модель тріщино утворення протягом терміну служби представимо у вигляді

$$A(t) = a[1 + f(t)], \quad (11)$$

де a – функція ширини розкриття тріщин.

В загальному випадку функція [7] має вид:

$$a = f_a(R, \sigma, E, \psi), \quad (12)$$

тут (R, σ, E, ψ) - розрахункові параметри тріщино утворення, згідно [7];

$f(t)$ - функція – індикатор деградації залізобетонного елемента. Це безрозмірна функція, що приймає значення від 0 до 10, в залежності від співвідношення розрахункової ширини розкриття тріщини при $t=0$ та на фіксований час в майбутньому $t = \tau$ a_0 / a_τ :

$$f(t) = s \cdot t^2, \quad (13)$$

де s - масштабний коефіцієнт, має розмірність $1/t^2$ (за одиницю часу тут прийнято рік).

Модель життєвого циклу

В моделі життєвого циклу використовується модель тріщино утворення (11). Функцію індикатора деградації залізобетонного елемента (13) доповнимо експлуатаційними коефіцієнтами:

$$f(t) = m_1 \cdot m_2 \cdot m \cdot s \cdot t^2, \quad (14)$$

де m_1 – коефіцієнт умов експлуатації (табл.2);

m_2 - коефіцієнт типу конструкції (табл.3);

m - коефіцієнт - функція оточуючого середовища, $m = m(p_1, p_2, p_3)$. Тут p_i - параметри, що характеризують оточуюче середовище (розмах середніх max та min температур, відносна вологість навколишнього середовища, наявність хлоридів).

Таблиця 2. Коефіцієнти умов експлуатації

| Умови експлуатації | Коефіцієнт умов експлуатації m_1 |
|--|------------------------------------|
| Згідно з вимогами чинних норм експлуатації | 1.00 |
| Незадовільна експлуатація | 1.10 |
| Відсутність систематичної експлуатації | 1.25 |

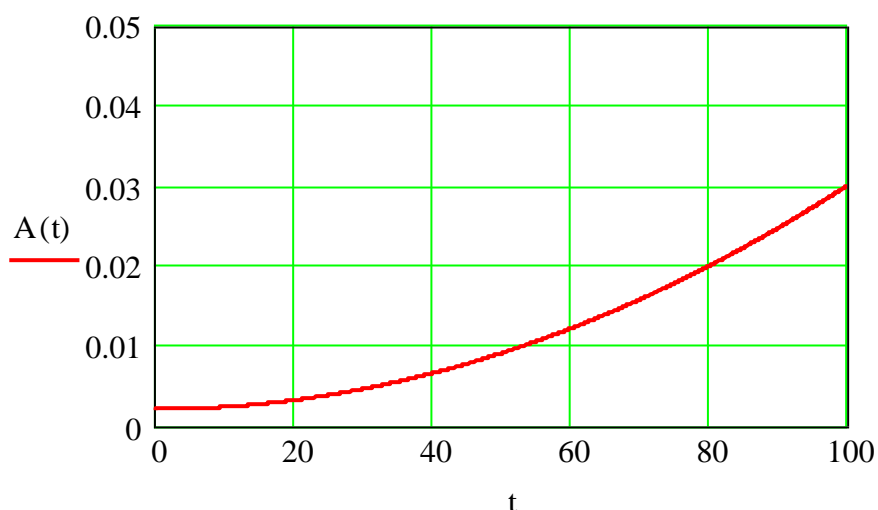
Таблиця 3. Коефіцієнти типу конструкції

| Тип конструкції | Коефіцієнт типу конструкції m_2 |
|--|-----------------------------------|
| Монолітна, з попередньо напруженою арматурою | 1.00 |
| Монолітна, із звичайною арматурою | 1.20 |
| Збірно-монолітна, із змішаним армуванням | 1,25 |
| Збірна, з попередньо напруженою арматурою | 1,50 |

З урахуванням (14) модель життєвого циклу залізобетонного елемента має вид

$$A(t) = a \cdot (1 + m_1 \cdot m_2 \cdot m \cdot s \cdot t^2). \quad (15)$$

Вид функції життєвого циклу залізобетонного елемента при $m = m_1 = m_2 = 1$ показаний на рис.1



З рівняння (15) отримаємо час досягнення граничної деградації, поклавши $A(t) = a_\tau$, де a_τ - граничне значення ширини розкриття тріщин. Іншими словами, отримаємо модель прогнозу життєвого циклу в формі (2):

$$T_l = \left(\frac{a_\tau - a}{a \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot m \cdot s} \right)^{0,5}, \quad (16)$$

де T_i - термін служби елемента, що прогнозується.

В табл.4 наведені дані прогнозу життєвого циклу залізобетонного елемента з попередньо напруженою арматурою при $m = m_1 = m_2 = 1$.

Таблиця 4. Модельний приклад

| Значення граничної ширини розкриття тріщини a_r , см | Час досягнення граничної деградації | | | | |
|--|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|
| | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.008 | 0.02 |
| Термін служби, що прогнозується, роки | 78.78 | 52.52 | 40.12 | 32 | 0 |

Висновки

1. Показано, що розповсюджені детерміністичні моделі деградації, побудовані на основі класичних рівнянь аналітичної теорії дифузії, є достатньо обґрунтованими. Проте їх практичне застосування обмежене по причині значної чутливості моделей до значень вихідних параметрів.

2. Як альтернатива, в роботі пропонується модель життєвого циклу єдиним параметром якої є ширина розкриття тріщин. Виконані тестові приклади демонструють достатню реалістичність прогнозів терміну служби елемента. Можливо вважати, що після статистичного обґрунтування моделі, вона може бути рекомендована до практичного застосування.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. *Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисиль П.* Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: 1990 – 316 с.
2. *Бліхарський З.Я., Стацук 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.
3. *Васильев А.И.* Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов // Сб. Труды ЦНИИС, вып. №208. – М.: 2002. – С. 101 – 120.
4. *Васильев А.И.* Системный подход к натурным исследованиям эксплуатируемых мостов // Сб. Труды ЦНИИС, вып. №208. – М.: 2002. – С. 70 – 84.

5. *ВБН В.3.1-218-174-2002*. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються. - Державна служба автомобільних доріг України. – К.: 2002. – 74 с.
6. *ДБН В.2.3 -2002*. Мости і труби. Обстеження і випробовування. Держбуд України. - К.:2002.
7. *ДБН В.2.3-14: 2006*. Мости і труби. Правила проектування. – Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства. – К.: 2006. – 359 с.
8. *Лантух-Лященко А.І.* О прогнозе остаточного ресурса моста // Зб. Дороги і мости. – К.: ДерждорНДІ, вип. 7, т.2. 2007. – С. 3–9.
9. *Лантух-Лященко А.І.* Уточнення оцінки експлуатаційного стану мостів // Зб. Дороги і мости. Вип. 9, ДерждорНДІ – К.;, 2008. – С.12-18.
10. *Лучко Й.Й., Глагола І.І., Козаревич Б.Л.* Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд. – Львів: Каменяр, 1999. – 229 с.
11. *Маринин М.Н.* О построении кинетической модели карбонизации железобетонных конструкций транспортных сооружений. Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Третьей Всероссийской научной конференции. Ч.1: Самара.- СамГТУ, 2006. – С. 145-148.
12. *Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа.* – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20с.
13. *“New Approach to Durability Design”* CEB Bulletin d’Information No.238, 1997.
14. *CEB-FIP “Model Code 1990”*, Thomas Telford, 1993, 437 pp.
15. *EN 1990-2001*. Eurocode: Basis of Structural Design. – Brussels: CEN, 2001.- 89 p
16. *EUROPEAN PRESTANDARD ENV 1991-1-1*. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design.-European Committee for Standardization. Brussels.- 85 p
17. *Lounis, Z., and Madanat, M.S.* “Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures”.- Pros/ 3rd Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions, Vol.1, 2001. 965-972
18. *New Approach to Durability Design* CEB Bulletin d’Information No.238,1997.
19. *Lantoukh-Liaschenko A.* Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures. Proceeding “EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment”, Kielce, 16-17 May 2006/ WARSZAWA 2006. – ISBN 83-89252-85-6: p.255-261
20. *Service-Life Prediction / - State of the Art Report/ Reported by ACI Committee 365// ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. 2001*
21. *Steen Rostam* “Service life design – The European Approach”. Concrete
22. *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.