

**АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КРИТЕРІЇВ ДЕГРАДАЦІЇ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД**
**ANALYSIS OF EXISTING DEGRADATION CRITERIA IN PREDICTING THE TECHNICAL
CONDITION OF TRANSPORT STRUCTURES**



*Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,
e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,*

<http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



*Давиденко Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,
e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, тел. +380504713399,*

<http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>



*Духненко Яна Сергіївна, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,
e-mail: yana.duhnenko@gmail.com, тел. +380638352205,*

<https://orcid.org/0009-0007-8742-7718>

Анотація: Стаття присвячена нагальній проблемі управління надійністю і довговічністю транспортних споруд. Розглядаються сучасні наукові підходи оцінки технічного стану транспортних споруд засновані на аналізі деградації елементів протягом життєвого циклу експлуатації. В статті представленні переваги та недоліки найпоширеніших моделей прогнозу технічного стану будівельних конструкцій. До кожної моделі застосовується характерний критерій деградації споруди: цикл

навантаження – розвантаження, накопичення критичної кількості хлоридів, коефіцієнт інтенсивності, геометричний параметр (параметри) тріщини в матеріалі, надійність тощо. Аналізується проблема вибору керуючого параметра моделі життєвого циклу елемента мостів. Сформульований теоретичний базис для моделі накопичення пошкоджень та моделі деградації основаної на фізико-механічних характеристиках матеріалу. В залежності від етапу життєвого циклу пропонується обрання типу моделі прогнозу. Розглядається модель прогнозу технічного стану мостів прийнята в нормативних документах України.

Ключові слова: критерій деградації, ланцюги, надійність, транспортні споруди, тріщиностійкість.

Вступ. Принципово важливим моментом в формулюванні моделі оцінки і прогнозу життєвого циклу є прийняття критерія деградації, тобто міри накопичення пошкоджень. Теоретично критерій є складовою фундаментальної проблеми управління надійністю і довговічністю будівельних об'єктів. В теорії споруд відомо не менше десятка різних за своєю фізичною сутністю критеріїв. Назвемо деякі з них.

У будівельній механіці з 50–х років минулого століття, широко використовувалась універсальна модель накопичення пошкоджень відома під назвою «теорія лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена-Майнера», в якій використовується принцип лінійної суперпозиції пошкоджень. Як критерій тут виступає «цикл навантаження – розвантаження». Ця проста і прозора модель набула широкого поширення в машинобудуванні. У меншій мірі модель використовувалася для оцінки життєвого циклу елементів споруд [1,2,4]. Очевидно, що для використання моделі необхідно мати достовірну оцінку кількості циклів навантаження, тобто для прогнозу ресурсу в процесі експлуатації необхідно мати повні дані історії вантаження. Стосовно елементів автодорожніх мостів та і інших елементів конструкцій необхідні початкові дані визначаються настільки приблизно, що втрачається достовірність моделі. Є і інші недоліки, які стримують застосування моделі Пальмгрена-Майнера, такі як, наприклад, ігнорування ефектів взаємодії циклів навантаження з малою і великою амплітудами.

Досить розповсюдженою сьогодні є моделі життєвого циклу залізобетонних елементів в якій деградація залізобетону описується критеріями накопиченням певної «критичної кількості хлоридів», що проникають через захисний шар по капілярній системі та мікротріщинам. Процес дифузії хлоридів тут описується загальними законами аналітичної теорії дифузії, відомими як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка.

Інший напрям розбудови моделей накопичення пошкоджень елементів будівельних конструкцій ґрунтується на фундаментальних дослідженнях механіки руйнування. В Україні це дослідження школи академіка НАНУ В.В. Панасюка [8]. В цих роботах критеріями деградації матеріалу елементів споруд є «коефіцієнти інтенсивності, що трактуються як фізичні константи матеріалу. Безумовно моделі, засновані на класичній теорії механіки руйнування, теоретично найбільш досконалі, проте, поки що не набули широкого застосування в практичній оцінці ресурсу елементів споруд.

В останні 20 – 30 років виявляється що універсальним, найбільш ефективним критерієм деградації елементів будівельних конструкцій є «параметр надійності». Нижче ми наводимо детальне

обґрунтування прийняття надійності як критерія деградації та приклад - відповідну модель, чинну в системі експлуатації автодорожніх мостів України.

Нарешті ще один широко вживаний критерій деградації – «геометричний параметр (параметри) тріщини в матеріалі» для оцінки і прогнозу життєвого циклу. Геометричні параметри тріщин (ширина, довжина, глибина) давно застосовуються в моделях деградації металевих елементів машин і механізмів, елементів сталевих конструкцій споруд. Ми в цій роботі наводимо приклад моделі життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд в якій критерієм деградації слугує ширина розкриття тріщин.

Виклад основного матеріалу. Ідея застосування скалярного параметра – ймовірності як критерія процесу, еволюція якого в часі визначається ймовірнісними законами. В Україні в роботах проф. А.І. Лантуха-Лященко [6] була опублікована марковська теорія процесів (ланцюгів), у якій ймовірність виступає фундаментальною основою цієї теорії. За 100 з лишнім років стохастична теорія інтенсивно розвивалась у всьому світі і стала базою для моделей еволюції систем в часі у всіх галузях знань – від управління економікою до медичних прогнозів. Проте знадобилося більш ніж 50 років щоби теорія почала застосовуватися для моделей накопичення пошкоджень в конструкціях машин, механізмів, будівель і споруд [1,3]. В останні 30-40 років феноменологічні стохастичні моделі, що описують накопичення пошкоджень як марковський процес визнані універсальним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд незалежно від матеріалу.

Доцільність і теоретична обґрунтованість застосування параметра надійності як критерія деградації є очевидною і витікає, перш за все, з сучасного трактування поняття надійності. Приведемо сучасне визначення терміну у формулюванні європейських учених. Так в стандарті ISO2394 [9] визначення наведено гранично коротко: «Надійність - здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби».

Дещо ширше поняття «надійність» представлено у Єврокодi EN 1990:2002 [5]. Наведемо дослівну цитату: «Здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби. Надійність зазвичай виражається в імовірнісних показниках». В примітці до визначення терміну вказується, що надійність є одночасно мірою безпеки, експлуатаційної придатності та довговічності конструкції.

Надійність поряд зі своїм основним призначенням - характеризувати рівень безпеки споруди протягом життєвого циклу має й іншу функцію - служить інструментом оптимізації якості проекту. Так в EN 1990:2002 [5], знаходимо: «Слід зазначити, що значення параметра надійності є формальним або уявним показником ймовірності руйнування. Він використовується скоріше, як засіб для розвитку послідовних проектних правил, ніж для опису частоти руйнування конструкції». Наведені визначення відкривають шлях до застосування надійності в якості критерія деградації – накопичення пошкоджень, оцінки експлуатаційної придатності в інших термінах.

В найбільш загальній формі сучасне наукове обґрунтування проблеми наведено в документі Об'єднаного комітету з безпеки споруд, де надійність трактується як ймовірність досягнення граничного стану за час t . Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(\mathbf{X}, t) = R(\mathbf{X}, t) - E(\mathbf{X}, t), \quad (1)$$

де $R(X,t)$ – узагальнений опір елемента; $E(X,t)$ – узагальнений навантажувальний ефект; X – вектор базових змінних; t – змінна часу.

Тоді надійність в термінах функції граничного стану виражається так:

$$P(t) = \text{Prob}[R(X,t) - Q(X,t) < 0]. \quad (2)$$

Таким чином, залежністю (2) технічний стан, тобто експлуатаційна придатність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю.

Нижче, як приклад, наводиться марковська модель накопичення пошкоджень в якій саме надійність слугує критерієм деградації. Модель була запропонована в 1999 р. [6] і нині має репутацію адекватного апарату управління безпекою експлуатації, оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів України [11].

Покажемо модель деградації елементів споруд основану на теорії випадкових марковських процесів. Систему відмов, що є наслідком зносу елемента споруди, будемо розглядати як потік випадкових дискретних подій марковського ланцюга і моделювати процесом з «якісними станами». Роль випадкової величини відіграє «випадковий дискретний стан системи» [6].

Моделлю деградації елемента встановлюється закон надійності в функції часу і, тим самим, встановлюється апарат прогнозу його технічного стану. Модель має дві принципові складові: феноменологічні класифікаційні таблиці дискретних станів та функцію деградації. Наступні чотири гіпотези становлять теоретичну базу моделі.

А. Критерієм технічного стану елемента є числовий параметр надійності.

В. Життєвий цикл елемента поділено на 5 експлуатаційних станів. Кожен із станів описується добіркою кількісних та неформалізованих якісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента [1,2,7].

В. Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується дискретною моделлю випадкового марковського процесу з неперервним часом.

Г. Перехід із одного експлуатаційного стану в інший описується, як процес Пуассона з дискретними станами та неперервним часом.

Ми сформулюємо визначальні залежності для моделі, в якій блукання по дискретним станам здійснюється тільки в одному напрямку: від стану з меншим, до стану з більшим номером. Будемо вважати, що елемент знаходиться послідовно в дискретних станах S_1, S_2, \dots, S_n , а переходи з одного експлуатаційного стану в інший здійснюються в моменти безперервного часу $t_1; t_2; \dots, t_n$. Ставиться завдання знайти ймовірності станів $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$, де n - кількість дискретних станів. Надійністю системи в кожному з станів визначається процес деградації.

Марковський ланцюг, що розглядається являє собою потік послідовних подій з однаково розподіленими проміжками часу. Граф потоку показаний на рис.1

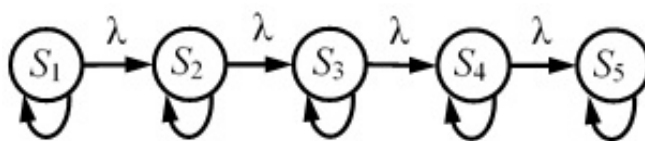


Рисунок - 1 Граф процесу деградації

Figure - 1 Graph of the degradation process

У термінах марковського процесу завдання зводиться до пошуку безумовних ймовірностей перебування системи S на довільному кроці k в стані S_i : $k = 1, 2, \dots, n$:

$$p_i(k) = \text{Prob}[S(k) = S_i]; k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n - 1. \quad (3)$$

Ймовірності $p_i(k)$ виражаються через умовні ймовірності переходу системи S на кроці k в стан S_j , за умови, що на кроці $k - 1$ система була в стані S_i :

$$p_{ij}(k) = \text{Prob}[S(k) = S_j | S(k - 1) = S_i]; i, j = 0, 1, \dots, n - 1. \quad (4)$$

Еволюція системи характеризується щільністю ймовірності переходу (*інтенсивність відмов, швидкість деградації*) $\lambda_{i,i+1}$. Цей параметр є граничним відношенням ймовірності переходу системи за час Δt зі стану S_i в стан S_{i+1} :

$$\lambda_{i,i+1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{i,i+1}(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

де $p_{i,i+1}(\Delta t)$ – ймовірність того, що система перейде за час Δt із стану S_i в стан S_{i+1} .

Шукані ймовірності марковської ланцюга $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ - функції часу є ймовірністю того, що система в момент t знаходиться в стані S_i . і визначаються з системи звичайних диференціальних рівнянь зі змінними, в загальному випадку, коефіцієнтами. Це відомі рівняння Колмогорова - Чепмена, що описують еволюцію дискретного марковського процесу з неперервним часом

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_{kj}(t), \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

До цих рівнянь приєднуються початкові умови

$$p_{ij}(0) = \delta_{ij}, \quad (7)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Крім того, в розв'язку системи диференціальних рівнянь використовується умова нормування, яка є наслідком того, що події марковської ланцюга несумісні і утворюють повну групу:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad (8)$$

Розв'язок системи рівнянь (6) при початкових умовах (7) дає *матрицю ймовірностей переходів* $p_{ik}(t)$, якою описується марковська ланцюг. Цю матрицю часто називають скорочено *матрицею переходів*.

Надійність елемента обчислюється як ймовірність того, що в момент часу t елемент вийде зі стану k , тобто відбудеться відмова $k + 1$:

$$P_i(t) = \sum_{k=1}^N p_k p_{ik}(t), \quad (9)$$

де N - кількість дискретних станів протягом життєвого циклу елемента; p_k - надійність елемента, що приписана йому в k -тому дискретному стані; $p_k(t)$ - перехідна ймовірність k -того дискретного стану, що отримується розв'язком системи рівнянь (6) при початкових умовах (7).

Як видно з (9), в загальному випадку ймовірності переходу складають квадратну матрицю переходів розміром n , де n - кількість дискретних станів. Позначимо її \mathbf{P} . На головній діагоналі матриці \mathbf{P} стоять ймовірності затримки системи в даному стані S_i на кроці k , на бічних діагоналях - ймовірності переходу системи зі стану S_i в стан S_j - $p_{ij}(k)$. В силу того, що на кожному кроці система може перебувати тільки в одному з двох взаємовиключаючих станів, сума всіх ймовірностей однієї строки дорівнює одиниці:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(k) = 1. \quad (10)$$

Диференціальні рівняння марковського ланцюга (6), відповідні графу потоку рис.1, запишемо в матричній формі:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}, \quad (11)$$

де $\mathbf{P}(i, t)$ - матриця ймовірностей переходу; \mathbf{E} - матриця інтенсивностей відмов, тут прийнята постійною $\mathbf{E} = \lambda$.

У випадку моделі за лінійним графом потоку (рис.1) де блукання по станам відбувається в одному напрямку – від стану з меншим номером до стану з більшим номером матриця переходу стає трикутною наддіагональною, мало заповненою. Приклад розв'язку системи рівнянь за лінійним графом потоку наведено нижче:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.181 & 0.819 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.330 & 0.670 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.451 & 0.549 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.551 & 0.449 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Зауважимо, що описана класична процедура отримання матриці переходу не єдина.

Пошук ймовірностей переходу, які містить стохастична матриця \mathbf{P} є домінантою, центральним місцем у розробці моделі деградації елемента споруди, описуваної дискретним марковским процесом. Коли матриця \mathbf{P} знайдена, за відомими значеннями умовних ймовірностей переходу і початкового значення безумовної ймовірності перебування системи в стані S_1 всі інші безумовні ймовірності знаходяться за рекурентною формулою:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij}, k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

Моделлю деградації встановлюється зв'язок між надійністю та часом експлуатації елемента. Перехід із одного дискретного стану в інший описується, як процес Пуассона з дискретними станами та неперервним часом. Це окремий випадок марковського процесу. Інтегральна функція розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу, має вид:

$$P_t = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (14)$$

де λ - параметр процесу – інтенсивність відмов; k – номер дискретного стану; $P(t)$ – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$.

Для випадку лінійного графу з п'яти дискретних станів, залежність (14) має вид:

$$P_t = 1 - 0,008333 \cdot (\lambda t)^5 e^{-\lambda t} \quad (15)$$

Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ , залежністю (15) встановлюється зв'язок між надійністю елемента P_t в i -му стані та часом t , що пройшов від початку експлуатації до стану $i = 2, \dots, 5$.

Стохастична модель накопичення пошкоджень в результаті природного зносу є досить універсальною і має практичну спрямованість, як інструмент оцінки технічного стану та прогнозу залишкового ресурсу споруди. Модель виявилася в Україні затребуваною і сьогодні успішно використовується в системі експлуатації автодорожніх мостів як інструмент управління безпекою, оцінювання і прогнозування технічного стану елементів транспортних споруд.

Представлена тут альтернативна модель оцінювання і прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів будується в функції одного параметра - ширини розкриття нормальних тріщин [10]. Ширина розкриття тріщин, в свою чергу, є функцією параметрів фізико-механічних характеристик матеріалів елемента. У такій постановці модель може бути застосовна на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. Завдання обмежується залізобетонними згинаними елементами мостів.

Теоретичний базис моделі містить дві гіпотези:

А. Критерієм технічного стану елемента приймається числовий параметр ширини розкриття тріщини, який слугує для кількісної інтегральної характеристикою процесу деградації.

Б. Параметр ширини розкриття тріщини є достатньо інформативним для побудови закону деградації залізобетонного згинаного елемента в функції часу.

Процес деградації - зростання ширини розкриття тріщини будемо описувати одновимірним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \gamma A(t), \quad (16)$$

де $A(t)$ - ширина розкриття тріщин, функція часу; γ - швидкість деградації, константа; t - час.

Розв'язок диференціального рівняння (16) має вид:

$$A(t) = a_0 e^{-\gamma t}, \quad (17)$$

тут a_0 - початкове значення ширини розкриття тріщин суть постійна інтегрування, яка визначається з початкової умови: при $t = 0$ $A(t) = a_0$.

Початкове значення ширини розкриття тріщин при проектуванні визначається функцією О.Я. Берга [2,6]:

$$a_0 = f_a(H, R, E, \sigma, \Psi), \quad (18)$$

де H - геометричні характеристики перерізу; R, E - фізико-механічні характеристики перетину; σ - напруження в перерізі; Ψ - коефіцієнт типу перетину.

Проектний строк експлуатації T отримаємо з розв'язку (17) поклавши $A(t) = A_{lim}$, де A_{lim} - скаляр, граничне значення ширини розкриття тріщин в експлуатації:

$$T = \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{A_{lim}}{a_0} \right), \quad (19)$$

Для використання в проектній практиці прогнозу (17) введемо коефіцієнт надійності як 5% квантиль нормально розподіленої змінної T :

$$T_d = T \cdot \gamma_t \quad (20)$$

де T_d – проектний строк експлуатації T елемента; γ_t – коефіцієнт надійності часу життєвого циклу.

Коефіцієнт надійності визначається залежністю:

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta \cdot V_R - 1,645 \cdot V_Q)} \quad (21)$$

де β - граничне значення характеристики безпеки, обчислене за характеристичною шириною розкриття тріщин A_{lim} ; V_R і V_Q - узагальнені коефіцієнти варіації елемента і навантаження відповідно.

Висновки. Модель, що базується на засадах фундаментальних принципів стохастичної теорії надійності є універсальною і придатна для всіх типів елементів будівельних конструкцій. Модель в цьому випадку керується одним параметром – інтенсивністю відмов. Саме цей факт є визначальною характеристикою і робить модель універсальною. З іншого боку, тільки один ймовірнісний параметр є недоліком, звужує можливості моделі як апарата керування довговічністю і потребує від дослідника не стандартних, специфічних прийомів апріорного визначення інтенсивності відмов. Один із ефективних способів визначення інтенсивності відмов був запропонований нами для нормативного документу з експлуатації автодорожніх мостів [11] і визначається експертом на основі оглядів та обстежень споруди, що знаходиться в експлуатації. Очевидно, що в такому випадку модель, в якій надійність є критерієм деградації не може застосовуватись на етапі проектування.

Представлена нова модель прогнозування технічного стану елементів автодорожніх мостів [10] базується на аналізі тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів може стати найбільш обґрунтованою, з точки зору фізики руйнування залізобетону, основою для розробки простого інженерного апарату прогнозування ресурсу на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з

проектування. Очевидно, що в силу великої кількості фізико-механічних та геометричних параметрів, що входять до формули оцінки ширини розкриття тріщини, прогноз розкриття ширини є найбільш обґрунтованою формою аналізу довговічності.

Модель відкриває шлях управління ресурсом варіюючи механічні характеристики матеріалів. В системі експлуатації автодорожніх мостів запропонована модель, з єдиним керуючим параметром - шириною розкриття тріщин, дозволяє прогнозувати термін служби залізобетонних елементів мостів на всіх етапах життєвого циклу експлуатації, може значно спростити процес оцінки їх технічного стану. Недолік такої моделі один – модель придатна тільки для залізобетонних елементів.

Враховавши наведені вище моделі, дану модель [10] можна удосконалити з урахуванням різних факторів, а саме:

1. Пошкодження конструкцій дорожнього одягу: слід враховувати вплив температурних коливань у добовому, сезонному та річному циклах, а також різні режими навантаження, які діють на транспортні споруди протягом тривалого часу. Зокрема, необхідно оцінити час дії навантаження від пневматичних коліс транспортних засобів. Це дозволить знизити ризик виникнення деформацій і пошкоджень дорожнього одягу;

2. Корозія арматури залізобетонних конструкцій – необхідно оцінити тріщиностійкість конструкцій в умовах температурних коливань та впливу транспортних навантажень, що сприяють розвитку корозійних процесів в арматурі залізобетонних прогонових будов;

3. Експлуатаційні пошкодження – важливо провести аналіз ушкоджень балок внаслідок впливу температури та корозії металу, що впливає на загальний стан конструкцій та їх довговічність;

4. Оцінка надійності – доцільно врахувати пошкодження бетону, спричинені впливом надзвичайних ситуацій (наприклад, вибухів) для комплексної оцінки надійності та безпеки конструкцій.

Такий підхід до оцінки дозволить глибше оцінити технічний стан конструкцій, виявити найбільш критичні зони та підвищити ефективність заходів з підтримки та відновлення дорожньої інфраструктури.

Перелік послань

1. А.М. Онищенко, А.І. Лантух-Лященко, А.В. Мішутін, В.П. Снитко, І.О. Твардовський, М.В. Здольник Теоретичні та практичні методи оцінювання надійності і довговічності транспортних споруд: монографія/. Київ:, 2024. 164 с. ISBN 978-617-555-2339 https://doi.org/10.32751/Mono_otsin2024

2. А.М. Онищенко, А.І. Лантух-Лященко, О.О. Давиденко, М.В. Гаркуша, О. І. Риковець Надійність та довговічність транспортних і гідротехнічних споруд: навчальний посібник /. Київ, 2024. 188 с. ISBN 978-617-555-222-3, https://doi.org/10.32751/Mono_nadiy2024

3. А.М. Онищенко, Д.В. Кот, І.В. Башкевич. Теоретичні та практичні методи проектування залізобетонної плити проїзної частини з незмінними опалубками на транспортних спорудах: монографія / Київ:, 2024. 476 с., https://doi.org/10.32751/Mono_plyty2024

4. Давиденко О.О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів/: дис. канд. техн. наук: 05.23.17 Давиденко Олександр Олександрович

5. European Standard EN 1990:2002 Eurocode 1: Basis of structural design, Brussels: European Committee for Standardization, 119 p., 2001.

6. А.І. Лантух-Лященко Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами, Збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», Київ, 57, стр.183-188, 1999.

7. А.М. Онищенко, Л.Л. Янчук, І.В. Башкевич, З.М. Найдюнова, А.В. Коротич, О.В. Здольник Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності транспортних і гідротехнічних споруд. /. Київ: НТУ, 2023. -152 с. ISBN 978-617-676-199-0

8. Panasyuk, V.V. “Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: Spravochnoe posobie v 4–kh tomakh” (Fracture Mechanics and strength of materials: A Reference Guide to 4 volumes), Kyiv: Naukova dumka, 620 p., 1988.

9. ISO 2394: 2015: General principles on reliability for structures (4th ed.), Genève: International Organization for Standardization, 110 p., 2015.

10. Lantukh-Lyashchenko A.I. “Novaya model' prognoza zhiznennogo tsikla zhelezobetonnykh elementov mostov” (The new model prediction the lifecycle of reinforced concrete elements of bridges), Zbirnyk Suchasni problemi tekhnichnogo reguluvannya u budivnitstvi, Kyiv, 2, pp. 33-40, 2016.

11. Ukrainian State Standard DSTU-N B V.2.3-23:2012: Instruction of estimate and prediction of technical state of highway bridges, Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 42 p., 2012.

ANALYSIS OF EXISTING DEGRADATION CRITERIA IN PREDICTING THE TECHNICAL CONDITION OF TRANSPORT STRUCTURES

Artur Onyshchenko, D.Sc. (Doctor of Engineering Sciences), Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, tel. +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Davydenko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, tel. +380504713399, <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

Dukhnenko Yana, PhD student, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, e-mail: yana.dukhnenko@gmail.com, tel. +380638352205, <https://orcid.org/0009-0007-8742-7718>

Abstract. The article is dedicated to the urgent issue of managing the reliability and durability of transport structures. Modern scientific approaches to assessing the technical condition of transport structures, based on the analysis of the degradation of elements throughout their life cycle, are considered. The article presents the advantages and disadvantages of the most common models for predicting the technical condition of building structures. Each model applies a characteristic degradation criterion for the structure: load-unload cycle, accumulation of a critical amount of chlorides, intensity coefficient, geometric parameter(s) of cracks in the material, reliability, etc. The issue of selecting the control parameter for the life cycle model of bridge elements is analyzed. The theoretical basis for the model of damage accumulation and the degradation model based on the physical and mechanical characteristics of the material is formulated. Depending on the stage of the life cycle, the appropriate type of prediction model is proposed. The prediction model for the technical condition of bridges adopted in the regulatory documents of Ukraine is discussed.

Keywords: degradation criterion, chains, reliability, transport structures, crack resistance.

References

1. A.M. Onyshchenko, A.I. Lantukh-Lyashchenko, A.V. Mishutin, V.P. Snytko, I.O. Tvardovsky, M.V. Zdolnyk. Theoretical and Practical Methods of Assessing the Reliability and Durability of Transport Structures: Monograph. Kyiv, 2024. 164 pages. ISBN 978-617-555-2339 https://doi.org/10.32751/Mono_otsin2024
2. Onyshchenko A.M., Lantukh-Lyashchenko A.I., Davydenko O.O., Garkusha M.V., Rikovtsev O.I. Reliability and Durability of Transport and Hydraulic Structures: Textbook /. Kyiv, 2024. 188 pages. ISBN 978-617-555-222-3, https://doi.org/10.32751/Mono_nadiy2024
3. A.M. Onyshchenko, D.V. Kot, I.V. Bashkevich. Theoretical and Practical Methods for Designing a Reinforced Concrete Deck Slab with Permanent Formwork on Transport Structures: Monograph. Kyiv, 2024. 476 pages, https://doi.org/10.32751/Mono_plyty2024
4. Davydenko O.O. Modeling of the life cycle of road bridges/: dissertation. Ph.D. technical Science: 05.23.17 Davydenko Oleksandr Oleksandrovych
5. European Standard EN 1990:2002 Eurocode 1: Basis of structural design, Brussels: European Committee for Standardization, 119 p., 2001.
6. Lantukh-Lyashchenko, A.I. Estimation of the reliability of the construction on the model of a random Markov process with discrete states, Zbirnyk Avtomobil'ni dorogy i dorozhnje budivnyctvo, Kyiv, 57, pp. 183-188, 1999. (in [Ukrainian])
7. A.M. Onyshchenko, L.L. Yanchuk, I.V. Bashkevich, Z.M. Naidonova, A.V. Korotych, O.V. Zdolnyk. Methods for Increasing Corrosion Resistance and Durability of Transport and Hydraulic Structures. Kyiv: NTU, 2023. 152 pages. ISBN 978-617-676-199-0
8. Panasyuk, V.V. “Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: Spravochnoe posobie v 4–kh tomakh” (Fracture Mechanics and strength of materials: A Reference Guide to 4 volumes), Kyiv: Naukova dumka, 620 p., 1988.
9. ISO 2394: 2015: General principles on reliability for structures (4th ed.), Genève: International Organization for Standardization, 110 p., 2015.
10. Lantukh-Lyashchenko A.I. “Novaya model' prognoza zhiznennogo tsikla zhelezobetonnykh elementov mostov” (The new model prediction the lifecycle of reinforced concrete elements of bridges), Zbirnyk Suchasni problemi tekhnichnogo reguluvannya u budivnitstvi, Kyiv, 2, pp. 33-40, 2016.
11. Ukrainian State Standard DSTU-N B V.2.3-23:2012: Instruction of estimate and prediction of technical state of highway bridges, Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 42 p., 2012.