

А. І. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО, К. В. МЕДВЕДЕВ (Національний транспортний університет, Київ)

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЗНОСУ ПРОГОНОВИХ БУДОВ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

В статті представлено новий імовірнісний підхід до визначення граничного зносу прогонових будов автодорожніх мостів. Головна мета цієї статті полягає в моделюванні зносу елементів мостів числовим параметром надійності. В моделі параметр служить кількісною оцінкою граничного зносу елементів. Модель послужить в системі експлуатації мостів, як критерій інтегральної оцінки і прогнозу технічного стану елементів.

*Ключові слова:* граничний знос, модель оцінки граничного зносу, характеристика безпеки, автодорожні мости

### Проблема

Дослідження, основні положення якого наведено нижче, виконано в рамках науково-дослідницької роботи з підготовки нового видання ДСТУ-Н «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [1]. Проблема, що розглядається, є складовою принципів оцінки технічного стану елементів споруд. Мова йде про засади контролю зносу елементів споруди в процесі експлуатації.

Останнім часом стрімко зростає кількість морально та фізично застарілих мостів проектний термін служби яких має складати 80...100 років. Як показує аналіз даних Аналітичної експертної системи управління мостами Укравтодору (АЕСУМ) [2], реальний середній строк служби автодорожніх мостів сьогодні складає тільки 45...50 років. Різко зросла кількість мостів, що очікують капітального ремонту або реконструкції. В цих умовах, для безаварійної експлуатації та стратегічного планування ремонту і реконструкції споруд, зростає потреба в уточненні науково-методичних підходів в оцінці технічного стану елементів споруд, в розширенні досліджень з обґрунтування критеріїв рівня надійності, ризику та алгоритмів прогнозу залишкового ресурсу елементів.

Принципи оцінки технічного стану мостів викладені в роботі [3] в 1999 році. Новітня феноменологічна модель роботи [3] основана на марковському дискретному процесі з неперервним часом згодом була прийнята як нормативна в 2002 р. в документі [4] і в 2009 р в ДСТУ-Н [1]. За 10 років, що пройшли з моменту прийняття документу, як інструменту оцінки і прогнозування залишкового ресурсу системі експлуатації, модель пройшла апробацію і обґрунтування. Виявились і слабкі місця. Це, перш за все, граничні рівні зносу, що встановлені в мо-

делі директивно, базуючись на досвіді експлуатації мостів. Сьогодні настав час в подальшому розвитку моделі, науковому пошуку критеріїв граничного зносу елементів мостів. Один із можливих підходів викладено в цій статті.

### Формулювання задачі

Отже головною метою дослідження є оцінка граничного зносу в процесі експлуатації. Дослідження базується на таких гіпотезах:

**А.** Критерієм граничного зносу слугує характеристика безпеки за умови рівності характеристичних значень узагальнених опору і навантаження  $R_n = S_n$  в першому граничному стані.

**Б.** Узагальнений опір елемента  $R_n$  зменшується в процесі експлуатації, узагальнений навантажувальний ефект від постійних навантажень та рухомого складу  $S_n = S_{n1} + S_{n2}$  приймається постійним;

Випадок змінного в часі навантаження  $S_n$  має розглядатися окремо.

Гіпотеза **А**  $R_n = S_n$  означає, що за граничний знос приймається стан коли вичерпані всі коефіцієнти надійності, як з боку узагальненого опору елементу так і з боку узагальненого навантажувального ефекту. Іншими словами це стан в якому реальна несна здатність елемента дорівнює проектному навантаженню без коефіцієнтів надійності.

Гіпотеза **Б** стосовно постійності рівня рухомої частини узагальненого навантаження тут прийнята як умова того, що оцінка зносу елемента виконується відносно постійних та рухомих навантажень, прийнятих при проектуванні об'єкта.

Для оцінки граничного зносу скористуємося класичним визначенням «характеристики безпеки» [5]. Основна формула, у випадку нормального розподілу, має вид:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (1)$$

де  $\mu_R$  – математичне сподівання узагальненого опору елемента;  $\mu_S$  – математичне сподівання узагальненого навантаження елемента;  $\sigma_R$  – середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого опору елемента;  $\sigma_S$  – середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого навантаження елемента.

Дослідження обмежується залізобетонними елементами автодорожніх мостів.

### Критерій граничного зносу

Трансформуємо формулу (1) до форми в якій характеристика безпеки виражається через математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу і узагальнені коефіцієнти варіації опору та навантаження:

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S}; \quad (2)$$

$$V_R = \sigma_R / \mu_R, \quad V_S = \sigma_S / \mu_S \quad (3)$$

де  $\gamma_0$  – математичне сподівання узагальненого коефіцієнту запасу;  $V_R$  – узагальнений коефіцієнт варіації матеріалів;  $V_S$  – узагальнений коефіцієнт варіації навантаження.

Підстановкою (2) та (3) в формулу (1), після нескладних перетворень формула (1) приводиться до виду:

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_S^2}}. \quad (4)$$

У чинних нормативних документах характеристичні значення граничного зусилля в перерізі елемента (несної здатності  $R_n$  і навантажувального ефекту  $S_n$ ) не є математичними сподіваннями. Вони приймаються зміщеними відносно математичних сподівань: вліво зміщено характеристичне значення узагальненого опору

$$\mu_R = R_n \frac{1}{(1 - v_R V_R)}, \quad \mu_R > R_n \quad (5)$$

і вправо – характеристичне значення узагальненого навантаження  $S$

$$\mu_S = S_n \frac{1}{(1 + v_S V_S)}, \quad \mu_S < S_n, \quad (6)$$

де  $R_n, S_n$  – характеристичне значення;  $v_R, v_S$  – значення стандартів, що відділяють характеристичне значення відповідної випадкової змінної від її математичного сподівання; В чинних нормативних документах  $v_R = v_S$ , що відповідає забезпеченості характеристичних значень опору матеріалів  $U_R = 0,95$  та характеристичних значень навантажень  $U_S = 0,05$ .

Для зручності обчислень коефіцієнти переходу від характеристичних значень до математичних сподівань в формулах (5 та 6) виділяються в окремі параметри, які будемо позначати літерою  $B$  з відповідними індексами:

$$B_R = \frac{1}{(1 - 1,64 V_R)}; \quad B_S = \frac{1}{(1 + 1,64 V_S)}. \quad (7)$$

Отже, з урахуванням позначень (7) математичні сподівання узагальненого опору  $R_n$  і узагальненого навантаження  $S_n$  знаходиться за формулами:

$$\mu_R = R_n B_R; \quad (8)$$

$$\mu_S = S_n B_S, \quad (9)$$

де  $R_n$  – характеристичне значення узагальненого опору,  $S_n$  – характеристичне значення узагальненого навантаження.

В позначеннях (8) та (9) математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу матиме вид:

$$\gamma_0 = \frac{R_n B_R}{S_n B_S}. \quad (10)$$

З урахуванням гіпотези **A** математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу матиме значення:

$$\gamma_0 = \frac{B_R}{B_S}. \quad (11)$$

Для отримання числового значення характеристики безпеки маємо задати середні значення коефіцієнтів варіації узагальненої опірності елемента  $V_R$  та узагальненого навантаження елемента  $V_S$ .

Коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента  $V_R$  в формулах (4) та (7) визначається за загальною формулою середнього квадратичного відхилення суми взаємно незалежних випадкових величин:

Таблиця 1

$$V_R = \sqrt{\sum_1^n V_{Ri}^2 + \sum_1^n V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = i - 1, \dots, n - 1, \quad (12)$$

де  $V_{Ri}$ ,  $V_{Rj}$  – коефіцієнти варіації матеріалів, з яких складається переріз;  $n$  – кількість матеріалів складових перерізу (тих матеріалів, міцнісні характеристики яких входять до виразу для обчислення характеристичного значення узагальненого опору  $R_n$ ).

Аналогічно записується формула коефіцієнта варіації узагальненого навантажувального ефекту:

$$V_S = \sqrt{\sum_1^n V_{Si}^2 + \sum_1^n V_{Si}^2 V_{Sj}^2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = i - 1, \dots, n - 1, \quad (13)$$

де  $n$  – кількість типів характеристичних навантажень, що входять до виразу для обчислення характеристичного значення узагальненого навантажувального ефекту  $V_S$  (наприклад: перша частина постійного навантаження + друга частина постійного навантаження + смугове навантаження АК + тандем АК + натовп,  $n = 5$ ).

Статистична модель залізобетонних попередньо напружених прогонових будов автодорожніх мостів прийнята за параметрами, наведеними в табл. 1 та 2.

Обчисливши за формулами (12), (13) коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента та коефіцієнт варіації узагальненого навантажувального ефекту для заданих коефіцієнтів (див. табл. 1 та 2), за формулою (4) отримаємо значення характеристики безпеки, що відповідає граничному зносу при заданих коефіцієнтах варіації.

### Аналіз результатів

Як видно із статистичної моделі наведеної в табл. 1 та 2, граничне значення характеристики безпеки є функцією великої кількості факторів: типу навантаження, довжини лінії впливу, конструкції прогонової будови, типу арматури, міцності бетону і такого іншого. При цьому коефіцієнт варіації в деяких випадках має різницю на порядок (див. табл. 2).

Тут аналіз чутливості виконано шляхом перебору можливих значень коефіцієнтів варіації. Обчислимо за формулами (12), (13) мінімальні і максимальні значення узагальнених коефіцієнтів варіації опірності елемента та навантажувального ефекту.

### Статистичні параметри навантажувальних ефектів

Випадкова змінна	$V_S$
Всі навантаження і дії, окрім вказаних нижче в таблиці	0,03
Вага вирівнюючого, ізоляційного і захисного слоїв автодорожніх і міських мостів	0,10
Вага проїзного полотна і тротуарів автодорожніх мостів	0,1
Вага проїзного полотна і тротуарів міських мостів	0,33
Вага конструкцій в дерев'яних мостах	0,07
Дія усадки и повзучості бетону	0,03
Навантаження від ґрунту на опори моста	0,13
Дія попередньо напруженої арматури (дріт холодного витягу)	0,08
Навантаження від тандему у розрахунках елементів проїзної частини мостів	0,17
Навантаження від тандему у розрахунках всіх інших елементів мостів при $l < 30$ м	0,17
Навантаження від тандему у розрахунках всіх інших елементів мостів при $l > 30$ м	0,07
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК	0,24
Рівномірно-розповсюджене навантаження від натовпу	0,14
Дія одиночної осі навантаження АК	0,07

Примітка. Дані таблиці взято з документа [6]

Таблиця 2

### Статистичні параметри складових опору

Випадкова змінна	$V_S$
Площа поперечного перерізу елемента	0,024
Момент опору поперечного перерізу елемента	0,023
Арматура залізобетонних елементів в залежності від класу	0,040...0,110
Міцність бетону за умови природного твердіння в залежності від міцності $R_{b,28}$ 30...70 МПа	0,051...0,105

Примітка. Дані таблиці взято з ДСТУ-Н [1]

Обчисленні за формулою (11) математичні очікування узагальненого коефіцієнту запасу

$\gamma_0$  та критерії граничного зносу  $\beta$  (4) при всіх можливих комбінаціях узагальнених коефіцієнтів варіації опірності елемента  $V_R$  та навантажувального ефекту  $V_S$  наведені в табл. 3.

Таблиця 3

**Екстремальні значення критерію граничного зносу**

Значення узагальнених коефіцієнтів варіації	Узагальнений коефіцієнт запасу $\gamma_0$	Критерій граничного зносу $\beta$
min $V_S = 0,287$ ; min $V_S = 0,065$	1,649	2,108
max $V_S = 0,453$ ; max $V_S = 0,152$	2,322	2,302
min $V_S = 0,287$ ; max $V_S = 0,152$	1,959	2,319
max $V_S = 0,453$ ; min $V_S = 0,065$	1,951	2,021

Як видно з табл. 3 критерій граничного зносу, в залежності від прийнятих до розрахунку значень коефіцієнтів варіації опірності елемента і навантажувального ефекту лежить в границях [2,310...2,021].

Якщо ці значення порівняти з нормативами ДСТУ-Н [1], то очевидно, що отриманий критерій за величиною характеристики безпеки практично співпадає з верхньою границею 4-го експлуатаційного стану ( $\beta = 2,05$ ; надійність  $P_i = 0,9798$ ) і є більш обережним ніж нормативне визначення. Записане в ДСТУ-Н [1] узагальнене визначення 4-го стану «можливе часткове порушення вимог першої групи граничних станів» в нашому випадку означає вичерпання всіх коефіцієнтів. Інакше кажучи, отриманий критерій відповідає зменшенню несної здатності елемента на величину

$$\delta = \frac{R - R_n}{R} \times 100\%, \quad (14)$$

де  $R$  – розрахункове значення опірності елемента;  $R_n$  – характеристичне значення опірності елемента. Величина  $\delta$  залежить від типу конструкції, типу бетону, армування, розрахункового навантаження. Аналіз типових проектів залізобетонних мостів малих і середніх прольотів показує, що у випадку рухомого навантаження

А11 середня величина  $\delta$  складає 13...22 %. Якщо цей показник обчислити відносно рухомого навантаження, тобто оцінити зниження вантажопідйомності, отримаємо 21...46 %, в залежності від довжини прогону і співвідношення постійного і рухомого навантаження.

Порівнюючи з нормативом ДСТУ-Н [1] граничне зниження вантажопідйомності в 4-му експлуатаційному стані складає 14...40 % бачимо, що за цим показником граничний знос також практично співпадає з прийнятою нормою.

Що стосується 5-го експлуатаційного стану, то за ДСТУ-Н [1] допускається подальше зниження вантажопідйомності. Сам же опис стану, цілком логічно, містить питання про закриття руху. За величиною характеристики безпеки ( $\beta = 1,74$ ; надійність  $P_i = 0,9583$ ) 5-й стан позиціонується значно нижче отриманого нами критерію. Обґрунтування допустимості такого значення характеристики безпеки сьогодні ми не маємо.

### Висновки

1. Можна вважати, що отриманий теоретичний критерій граничного зносу прогонових будов автодорожніх мостів має достатню збіжність з нормативними вимогами на рівні 4-го експлуатаційного стану.

2. Рівень зносу декларований в ДСТУ-Н [1] для 5-го експлуатаційного стану, потребує для свого обґрунтування спеціальних досліджень. Порівнюючи значення зносу в 5-му стані з отриманим нами критерієм, слід визнати що це значення є значно більшим, ніж отриманий нами критерій.

3. Виявлене в дослідженні перевищення зносу відносно встановленого критерію в 5-му експлуатаційному стані має бути попередженням для експерта, котрий виконує оцінку експлуатаційного стану моста. Несна здатність прогонової будови, в цьому випадку, має бути всебічно досліджена, встановлено значення реальної вантажопідйомності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
2. Лантух-Лященко, А. І. До розробки галузевої аналітичної експертної системи управління мостами [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: 2004. – Вип. 69. – С. 120-126.

3. Лантух-Лященко, А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1999. – Вип. 57 – С. 183-188.
4. ВБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються [Текст]. – К.: Державна служба автомобільних доріг України, 2002. – 74 с.
5. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с
6. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. – М.: Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 1989.

Надійшла до редколегії 01.08.2012.

Прийнята до друку 10.08.2012.

А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО, К. В. МЕДВЕДЕВ (Национальный транспортный университет, Киев)

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗНОСА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ**

В статье представлен новый вероятностный подход к определению предельного износа пролетных строений автодорожных мостов. Главная цель этой статьи заключается в моделировании износа элементов мостов численным параметром надежности. В модели параметр служит количественной оценкой граничного износа элементов. В системе эксплуатации мостов модель даст количественный критерий интегральной оценки и прогноза технического состояния элементов.

*Ключевые слова:* граничный износ, модель оценки граничного износа, характеристика безопасности, автодорожные мосты

A. I. LANTKOUH-LYASHCHENKO, K. V. MEDVEDEV (National of Transport University, Kiev)

## **FOR THE DETERMINATION OF LIMIT WEAR OF ROAD BRIDGES SUPERSTRUCTURES**

This paper presents the new probabilistic approach for the determination of limit wear of road bridges superstructures. The focus of this paper is on the wear modeling of highway bridge elements by a numerical parameter of reliability. It serves, in the model, a quantitative estimation of limit service-life of elements. For the purpose of the bridge maintenance that model should give quantitative criteria of integrated estimation and prediction of condition assessment an element while in service.

*Keywords:* limit wear, model of assessments of the limit wear, reliability index, road bridges