



УДК 625.745.1

• © О.О. Давиденко (НТУ)

## ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

*Анотація.* Присвячено проблемі управління ресурсом транспортних споруд, що перебувають в експлуатації. Базується дослідження на статистичних даних системи експлуатації автодорожніх мостів України – галузевій Аналітичній експертній системі управління мостами Укравтодору (АЕСУМ).

*Ключові слова:* автодорожній міст, довговічність, життєвий цикл, залишковий ресурс.

*Анотация.* Посвящено проблеме управления ресурсом транспортных сооружений находящихся в эксплуатации. Исследование базируется на статистических данных системы эксплуатации автодорожных мостов Украины – отраслевой Аналитической экспертной системы управления мостами Укравтодора (АЭСУМ).

*Ключевые слова:* автодорожный мост, долговечность, жизненный цикл, остаточный ресурс.

*Annotation.* Paper is devoted to the resource management of road bridges are in service. The research is based on statistical data system operation of road bridges Ukraine - Analytical expert management system of Ukravtodor bridges (AESUM).

*Key words:* road bridge, durability, life cycle, residual resource.

### Вступ

Проблема оцінки і прогнозу безпечного строку експлуатації залізобетонних мостів, з якою стикаються всі країни, для України є особливо ваговою через значний перелік несприятливих причин. Назвемо головні з них: складний економічний та фінансовий стан; майже останнє місце в Європі за розвитком дорожньої мережі; малий строк служби залізобетонних прогонових будов мостів, відсутність належної системи експлуатації.

Сьогодні констатується суттєве погіршення стану автодорожньої мережі України загалом, особливо мостів. Кількість мостів, що потребують ремонту, збільшується загрозливими темпами (рис. 1). Спроба прогнозу за лінійною регресією дає значне зростання кількості мостів, які потребують термінового ремонту в період 2013 – 2018 років з 1 957 од. до 2 743 од.

В умовах обмеженого фінансування галузі транспортного будівництва очевидно, що для оптимізації видатків на ремонт і реконструкцію мостів необхідна систематизована технічна інформація про стан мостів та науково обґрунтована система прогнозування залишкового ресурсу. Саме

систематизація інформації з технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів Укравтодору і є предметом цього дослідження.

Глобальною метою цієї роботи є узагальнення оцінки технічного стану та прогноз залишкового ресурсу залізобетонних автодорожніх мостів України, що перебувають в експлуатації, базуючись на даних Аналітичної експертної системи управління мостами (далі – АЕСУМ) Укравтодору. Реалізується поставлена мета вирішенням низки завдань, серед яких: добірка статистичних даних строків служби, їх аналіз та прогнозування ресурсу залізобетонних автодорожніх мостів.

*Огляд публікацій.* Сьогодні проблема управління життєвим циклом елементів споруд стає пріоритетною для багатьох країн світу. Незважаючи на безумовну актуальність цієї теми, публікацій в Україні мало. Теоретичні дослідження з проблем надійності, довговічності та прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів знаходимо в матеріалах українських науковців А.С. Дехтяра, А.І. Лантуха-Лященко, О.О. Давиденка, [3, 5-7].

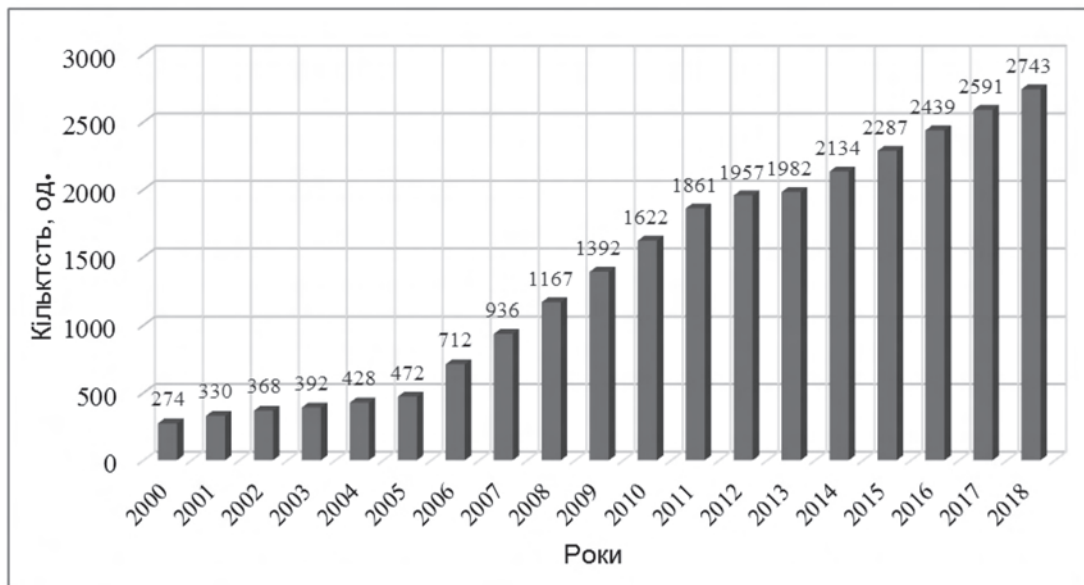


Рис. 1. Динаміка зростання кількості мостів, що очікують термінового ремонту

У країнах Європи та США ця проблема розглядається як нагальна при розробці теоретичних засад системи експлуатації споруд, тому матеріалів є багато. Серед численних закордонних публікацій назвемо декілька, найбільш відомих.

Науковці Zhongjie Zhang та Xiaoduan Sun з Луїзіанської транспортної Академії, пропонують спрощену модель прогнозу технічного стану моста як споруди з трьох елементів: прогонових будов, фундаментів та опор, [9]. Модель описується матрицею деградації, яку отримують шляхом трансформування матриці ймовірності переходу, застосовуючи емпіричні формули, що базуються на аналізі історії кожної споруди окремо.

У роботах вчених Asko Sarja та Erkki Vesikari з Фінського Технічного дослідницького центру, [8], процес старіння споруди описується матрицею деградації та матрицею впливів невизначеності.

Особливу увагу дослідників привертають роботи видатного вченого США, професора університету Ліхай (Lehigh University) Д. Франгопола, [10], з проблем експлуатації мостів і розбудови моделей прогнозування залишкового ресурсу на основі статистичних даних історії експлуатації.

#### Основна частина

*АЕСУМ – як інструмент наукового пошуку оцінки технічного стану автодорожніх мостів, що перебувають в експлуатації*

Для належного функціонування національної дорожньої мережі необхідно мати сучасний інструмент управління мостами. Сьогодні таким інструментом є АЕСУМ, яку було розроблено на замовлення Державної служби автомобільних доріг України. Роботи виконувались починаючи з 2004 року Державним дорожнім науково-

дослідним інститутом ім. М.П. Шульгіна і Національним транспортним університетом під керівництвом професора А.І. Лантуха-Лященко. Науковий супровід програмного комплексу АЕСУМ веде ДП “ДерждорНДІ”.

Методичною базою АЕСУМ стали новітні нормативні документи системи експлуатації ДБН “Обстеження і випробування мостів”, [2], ДСТУ-Н “Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів”, [4]. Сьогодні ми констатуємо, що програмний комплекс АЕСУМ став центральним методичним ядром системи експлуатації мостів Укравтодору і успішно використовується в наукових дослідженнях, [6].

Глобальною метою АЕСУМ є автоматизація формалізованої оцінки технічного стану автодорожніх мостів, прогнозування залишкового ресурсу споруди, генерація рекомендацій із стратегії експлуатації та оптимізація витрат на ремонт і реконструкцію в умовах обмеженого фінансування.

Цієї мети досягнуто виконанням програмним комплексом в автоматизованому режимі великої кількості завдань. Назвемо основні з них:

- зберігання та обробка інформації стосовно нагляду, ремонтів, випробувань та обстежень дефектів споруди;
- технічна оцінка експлуатаційного стану споруди;
- техніко-економічний аналіз, економічний прогноз, моделювання соціальних наслідків закриття мосту на ремонт.

За статистикою на 01.01.2013 року на дорогах загального користування експлуатується 16 187 од. (загальною довжиною 384,3 км) автодорожніх мостів, підпорядкованих Укравтодору. Абсолютна більшість з них – 15 558 од. (96 %) є залізобетонними.



Таблиця 1

Характеристика експлуатаційного стану автодорожніх мостів

Технічна характеристика	Одиниць	Протяжність, п.м.	У відсотках до загальної кількості
Потребують першочергової реконструкції або капітального ремонту	1 957	54 040	12,0 %
На стадії будівництва, реконструкції або капітального ремонту	124	9 954	0,9 %

Таблиця 2

Розподіл залізобетонних мостів за експлуатаційними станами

Категорія мостів	Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5	Разом
Залізобетонні мости всіх типів, %	14	48	28	10	100
У тому числі монолітні мости, %	10	33	19	7	69
У тому числі збірні і збірно-монолітні, %	4	15	9	3	31

Таблиця 3

Статистичні оцінки строків служби автодорожніх мостів

Експлуатаційний стан	Тип моста	Середнє значення строків служби, років	Середнє квадратичне відхилення, років,
Стан 2	Монолітні	41	18
	Збірно-монолітні, збірні	35	15
	<b>Всі типи</b>	<b>36</b>	<b>16</b>
Стан 3	Монолітні	52	16
	Збірно-монолітні, збірні	41	16
	<b>Всі типи</b>	<b>45</b>	<b>17</b>
Стан 4	Монолітні	52	13
	Збірно-монолітні, збірні	43	14
	<b>Всі типи</b>	<b>46</b>	<b>14</b>
Стан 5	Монолітні	50	7
	Збірно-монолітні, збірні	45	12
	<b>Всі типи</b>	<b>48</b>	<b>11</b>

Загальний експлуатаційний стан частини мостів, які не відповідають чинним нормативним вимогам експлуатації, характеризується даними, що наведені у **табл. 1**.

Виконаний в межах цього дослідження регресивний аналіз статистичних даних строків служби залізобетонних автодорожніх мостів Укравтодору базується на вибірці кількістю у 2 777 од., що складає 18 % від загальної кількості всіх мостових споруд – тобто вибірка є достатньо репрезентативною, щоб результати аналізу технічного стану могли бути інтерпретовані відносно загальної кількості залізобетонних мостів.

Насамперед наведемо розподіл залізобетонних мостів за експлуатаційними станами. Зауважимо,

що дійсні реальні цифри можуть дещо відрізнятися від наведених у **табл. 2**, так як більшість даних АЕСУМ стосується доріг державного значення. Мости на місцевих дорогах складають у вибірці близько 40 %, тоді як їх технічний стан є дещо нижчий ніж на дорогах державного значення. Крім того дані, що аналізувались, не містили мостів у першому експлуатаційному стані. Проте їх кількість незначна і на загальну оцінку технічного стану мостів їх вплив несуттєвий.

Деяка суб'єктивність вноситься в дані АЕСУМ також тим, що експлуатаційні служби призначають обстеження в першу чергу тим мостам, які за результатами періодичних оглядів відносяться службами до категорії низького технічного стану.

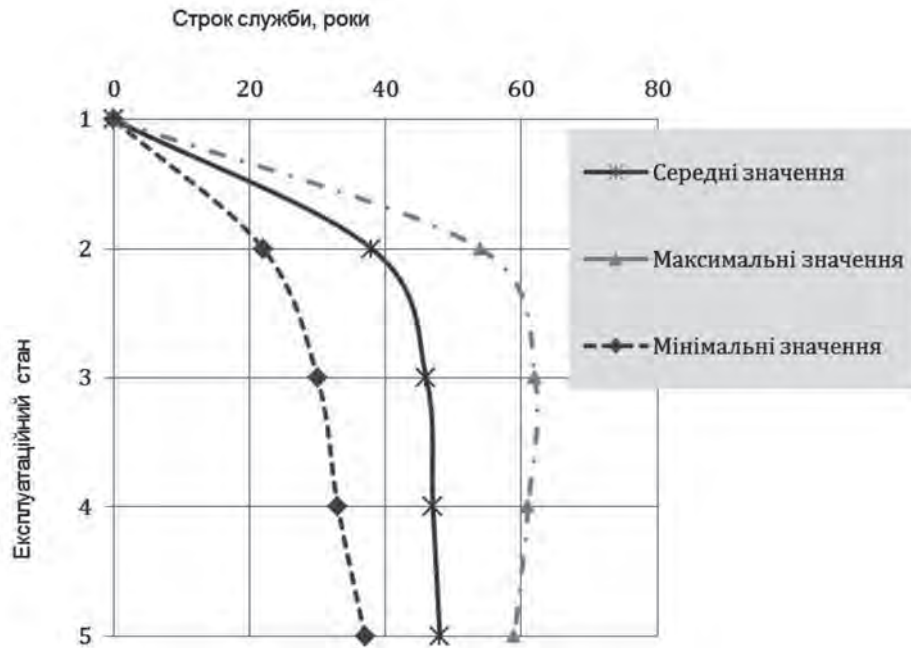


Рис. 2. Графіки фактичних середніх строків служби залізобетонних мостів всіх типів

Характерно, що більшість залізобетонних мостів – 86 % (табл. 2) перебувають в обмежено працездатному стані, потребують ремонту.

Характеризуючи дані строків служби автодорожніх мостів України, отриманих з ПК АЕСУМ (табл. 3), відмітимо, що *середній строк служби* у 3 – 4 – 5 станах складає 45-48 років. Привертає увагу, також, факт значного розкиду строків служби – середнє квадратичне відхилення складає 17-11 років.

Вікова характеристика мостів всіх типів, що перебувають в другому – п'ятому експлуатаційних станах наведена ще раз в графічній формі на рис. 2.

Графіки фактичних середніх строків служби монолітних та збірно-монолітних і збірних мостів мають такий же характер, відрізняються тільки абсолютними значеннями (табл. 3).

#### Аналіз статистичних даних

Центральним місцем цього дослідження є аналіз отриманих статистичних даних строків служби залізобетонних мостів. У даних, що аналізуються, насамперед, привертає увагу значна різниця між фактичними і декларованими нормативним документом [1] строками служби. Нагадаємо, що згідно з [1] монолітні мости проектується на строк служби у 100 років, збірно-монолітні – 80 років, збірні 70 років (зауважимо, що декларовані строки служби варто розуміти як мінімальні). Розрив між нормативними і середніми фактичними строками служби монолітних, збірних і збірно-монолітних мостів становить 48 і 35 років відповідно. Очевидно, що такий низький строк служби 86 % автодорожніх мостів, у стратегічному плані, виліється

в майбутньому в тяжкі для країни економічні і соціальні втрати.

Ще більш неочікувану виявилась фактична форма вікової кривої, яка різко падає після третього експлуатаційного стану (рис. 2). Виявляється, що сьогодні мости, які перебувають в третьому, четвертому і п'ятому станах, практично мають один і той же вік. А це означає дуже високі темпи втрат початкових функціональних характеристик, зниження безпеки експлуатації, різке збільшення потреб фінансування на ремонт. Із іншого боку, ставиться під сумнів чинна нормативна методологія прогнозування залишкового ресурсу елементів споруд, [4].

Причин різкого падіння довговічності залізобетонних прогонових будов після третього експлуатаційного стану є немало. Тут і помилкові проектні рішення, і недосконалі технологія будівництва, і специфічні кліматичні умови. Проте головною причиною, на наш погляд, є відсутність дійової системи експлуатації мостів, відсутність регулярних заходів з утримання.

В обґрунтування цієї гіпотези наведемо приклад з роботи Д. Франгопола, [10]. У цій роботі досліджується вибірка із 713 од. сталезалізобетонних мостів, побудованих у 1955 – 1998 рр. Середній фактичний строк їх служби складав 50 років, середнє квадратичне відхилення – 23 роки.

Прогнозування часу життєвого циклу виконували за моделлю функції характеристики безпеки  $\beta$ :

$$T = f[\beta(t)] = \beta_0 - (t - t_1) \alpha, \quad (1)$$

де  $\beta_0$  – початкова характеристика безпеки;

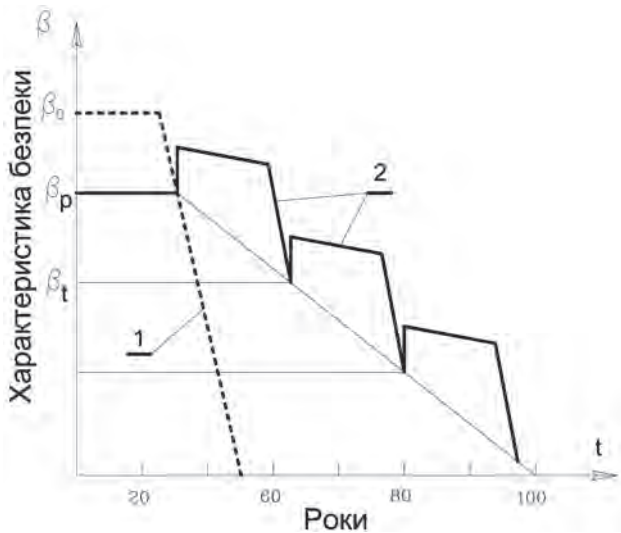
$t$  – час для якого визначається характеристика безпеки в процесі експлуатації;



Таблиця 4

Порівняння прогнозів залишкового ресурсу з фактичними строками служби

Експлуатаційний стан	Середній строк служби, років	Прогноз ресурсу в стані 3, років	Різниця, років	Прогноз ресурсу в стані 4, років	Різниця, років
Стан 3	45				
Стан 4	47	61	14		
Стан 5	48	77	29	59	11



$\beta_0$  – початкова характеристика безпеки;  
 $\beta_p$  – мінімальна нормативна характеристика безпеки;  
 $\beta_t$  – характеристика безпеки в момент другого ремонту;

1 – графік деградації у випадку без експлуатаційних втручань;  
 2 – графік деградації у випадку регулярних експлуатаційних втручань

Рис. 3. Графік залежності характеристики безпеки від системи експлуатації

$t_1$  – час визначення характеристики безпеки на попередньому етапі,  $t_1 < t$ ;  
 $\alpha$  – швидкість деградації,  $\alpha = \beta_0 / t$ .

У загальному випадку (регулярні експлуатаційні втручання) це складна кусково-лінійна функція, тоді як у разі відсутності регулярних експлуатаційних втручань функція складається з двох лінійних ділянок – горизонтальної та похилої (рис. 3). У цьому, останньому випадку, ломана двохкусова лінія зміни характеристики безпеки протягом життєвого циклу чітко демонструє різкий спад ресурсу елемента після невеликого початкового строку експлуатації.

Порівняння графіків, що наведені на рис. 2 і рис. 3 свідчить про їх якісну ідентичність. Розбудова вікової кривої (рис. 2) для середніх значень

строків служби в координатах  $\beta - T$  за моделлю (1) дає значення прогнозу строків служби близьких до тих, що наведені у табл. 3, із різницею в межах 3-12 %.

Насторожує також той факт, що отримана фактична крива деградації (рис. 2, табл. 3) не збігається з кривою нормативного документу ДСТУ-Н Б.В.1.3–23:2013 [4] з оцінки і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Наведемо порівняльну кількісну характеристику прогнозування залишкового ресурсу.

Оцінку залишкового ресурсу згідно з [4] виконують за феноменологічною моделлю марковського ланцюга з неперервним часом. Крива деградації описується як стохастичний процес Пуассона. Це експоненціальна функція, що залежить від параметра швидкості деградації (інтенсивності відмов)  $\lambda$  та часу експлуатації  $t$ . Для випадку п'яти експлуатаційних станів, функція має вигляд:

$$P_i = 1 - 0,008333 (\lambda t)^5 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

де  $P_i$  – надійність елемента в  $i$ -му стані.

Таким чином, при заданій швидкості деградації  $\lambda$ , залежністю (2) встановлюється зв'язок між надійністю елемента  $P_i$  в  $i$ -му стані та часом  $t$ , що пройшов від початку експлуатації до стану  $i = 2, \dots, 5$ . Для прикладу, нами виконане прогнозування ресурсу для залізобетонних мостів всіх типів (рис. 2, середні значення), що знаходяться в третьому та четвертому станах. Середні швидкості деградації мають значення в третьому стані  $\lambda_3 = 0,0274$ , четвертому  $\lambda_4 = 0,0354$ . Характеристика безпеки в  $i$ -му стані виражається через надійність  $P_i$  класичною залежністю через функцію нормального розподілу Гауса:

$$P_i = \Phi(-b). \quad (3)$$

Порівняння прогнозів залишкового ресурсу з фактичними термінами служби наведено в табл. 4.

Відповідні криві прогнозу наведені на графіках рис. 4 (суцільні лінії, пунктирна лінія – фактична вікова крива).

Як можна побачити з даних табл. 4 прогноз залишкового ресурсу в стані 3 перевищує фактичний на 29 років, в стані 4 – на 11 років.



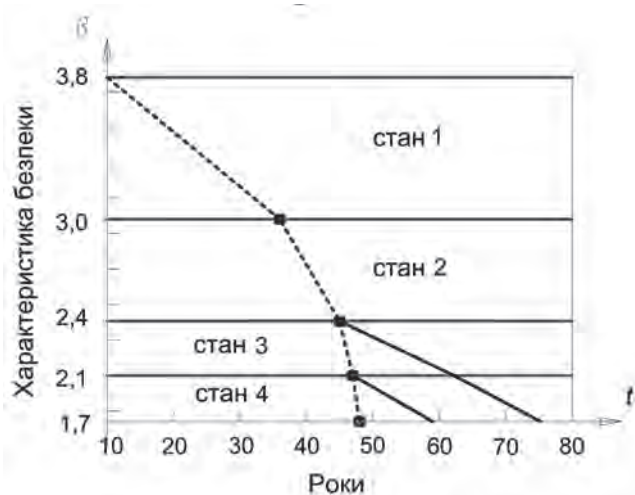


Рис. 4. Прогноз залишкового ресурсу за даними станів 3 та 4

### Висновки

1. Дані системи АЕСУМ свідчать про низьку довговічність залізобетонних мостів України, констатується значний розрив між ресурсом декларованим нормативними документами та фактичним. Так середній вік залізобетонних монолітних мостів, що перебувають у п'ятому експлуатаційному стані, тобто мости які вичерпали свій ресурс, складає 50 років, збірно-монолітних – 45 років. Значна частина залізобетонних мостів – 76 % знаходяться у 3-4 експлуатаційних станах. Оцінка їх залишкового ресурсу, базується на аналізі даних системи АЕСУМ, складає 2-4 роки. Очевидно, що в умовах відсутності адекватних ремонтних заходів кількість мостів у п'ятому експлуатаційному стані в найближчі п'ять років буде стрімко зростати. Наше дослідження дає підстави вважати, що основною причиною низької довговічності є відсутність регулярних експлуатаційних втручань.

2. Викликає занепокоєння факт того, що 86 % залізобетонних мостів потребують ремонту, 12 % з них (1957 од., **рис. 1**) потребують першочергової реконструкції або капітального ремонту. Фінансування такого великого обсягу ремонтів виллється в десятки мільярдів гривень. За нашою оцінкою, тільки на першочерговий ремонт 1 957 мостів сьогодні потрібно біля 6,6 млрд грн.

3. Цим дослідженням доведено, що чинна методологія прогнозування залишкового ресурсу мостів потребує оперативного коригування для мостів, які у 3 і 4 станах не мали регулярних ремонтів. Необхідність змін в методології пояснюється так.

У прийнятій за нормативну моделі прогнозування залишкового ресурсу [4], швидкість деградації приймається постійною. У дійсності ж, як видно з даних **табл. 4** та **рис. 4**, у випадку відсутності регулярних експлуатаційних втручань,

швидкість деградації, починаючи з третього експлуатаційного стану різко збільшується. Цей факт належить врахувати в АЕСУМ спеціальним додатковим модулем корегування прогнозу при формуванні довгострокових планів фінансування ремонтів мостів.

4. Іншим опосередкованим, проте принципово важливим висновком, є нагальна потреба в чіткому виконанні вимог зі строків проведення обстежень мостів [2]. Сьогодні 80 % автодорожніх мостів не обстежувались протягом останніх 10-15 років, тоді як серед них велика кількість таких, що потребують обстежень кожні два роки. У цих умовах прогнозування ресурсу за моделлю [4] буде мати далеко не реалістичний характер.

### ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.3–22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
2. ДБН В.2.3–6:2009. Мости та труби. Обстеження і випробування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
3. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів // Наук. праці семінару “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій”. – Луцьк, 16-19 вересня 2002 р.
4. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2013. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – К.: Мінрегіон України, 2013.
5. Лантух-Лященко А.І. Надійність і довговічність автодорожніх мостів. Наукові розробки з нормативного регулювання // 36. Транспортна академія України: 20 років (1992 – 2012) – К.: НТУ, 2012. – С. 39-59.
6. Лантух-Лященко А.І. Нормативне регулювання у сфері проектування і експлуатації мостів // Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університету. – Вып. 58. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – С. 7-15.
7. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України // Міжвід. наук.-техн. зб. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – 2013. – № 78, том 2. – С. 225-235.
8. Erkki Vesikari. Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, Technical Research Centre of Finland.VTT Building Technology; from 01.01.2001 to 31.12.2003.
9. Zhongjie Zhang, Xiaoduan Sun. 9th International Bridge Management Conference, Orlando Airport Marriott Orlando, Florida April 28–30, 2003. 207-208 pp.
10. Frangopol Dan M., Jung S. Kong, Emhaidy S. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2001. – Vol. 15, No. 1.