

УДК 625.745.1

Давиденко О. О., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

Козарчук І. А., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4972-6016>

Гаркуша М. В., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ МОСТУ З УРАХУВАННЯМ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СПЕЦІАЛЬНОГО ДЕТАЛЬНОГО ОБСТЕЖЕННЯ

Анотація

Вступ. Фактичний технічний стан об'єктів критичної транспортної інфраструктури України є ретроспективним критерієм проблеми експлуатаційного утримання. Першочерговою задачею під час відновлення об'єктів транспортної інфраструктури є складання відомості дефектів по кожному об'єкту для подальшого розроблення проектних рішень та складання проектно-кошторисної документації. Швидкість деградації та її закономірності прямим чином впливають на кінцеву вартість відновлення транспортних споруд.

Визначення технічного стану транспортних споруд, що супроводжується аналізом стану елементів та умов експлуатування споруди, дає можливість ефективно обрати технологічні рішення та будівельні матеріали для виконання ремонтних заходів, з урахуванням дослідження закономірностей деградації для забезпечення прийнятної надійності та довговічності, що є глобальним науковим питанням сьогодення.

А застосування чисельного моделювання для визначення вантажопідйомності мосту, що є нагальною передумовою для уточнення експлуатаційного стану, а також прогнозування надійності та довговічності у функції часу.

Проблематика. Встановлено, що існує необхідність виконання чисельного моделювання вантажопідйомності мосту з урахуванням корозійних процесів для оцінки залишкового ресурсу мосту.

Мета. Мета наукової роботи полягає у розрахунку вантажопідйомності мосту методом скінченних елементів за результатами спеціального детального обстеження мосту через р. Гуйва по вул. Ломоносова в м. Андрушівка у Житомирській області.

Результати. Дослідженням встановлено закономірність втрати вантажопідйомності сталезалізобетонного автодорожнього мосту з урахуванням послаблення елементів ферми внаслідок корозійних процесів. Також, за результатами проведених досліджень визначено технічний стан, оцінку втрати вантажопідйомності відповідно до дефектів та експлуатаційного стану, оцінку залишкового ресурсу, надано пропозиції щодо усунення дефектів і пошкоджень, а також висновки щодо доцільності нового будівництва.

Висновки. У роботі виконано чисельне моделювання вантажопідйомності мосту з урахуванням корозійних процесів за результатами спеціального детального обстеження.

Ключові слова: автодорожній міст, залишковий ресурс моста, мостове полотно, метод скінченних елементів, ремонт, транспортна споруда, чисельне моделювання.

Актуальність роботи

Стан транспортних споруд в Україні та світі, має погіршений стан, що зумовлено умовами експлуатації й особливостями будівництва та утримання споруд, спостерігається зношення матеріалів конструкцій споруд, збільшення кількості та характеристик навантаг, зміна кліматичних умов в яких експлуатуються споруди тощо [1]. Транспортні споруди мають ключове стратегічне

значення, що потребує застосування сучасних будівельних матеріалів і технологій з умовно низькою вартістю під час їх будівництва, ремонту та експлуатації. Світові дослідження акцентують увагу на несній здатності споруд; методиках проектування з особливістю втомних характеристик, втрати довговічності споруд, а також застосування відходів промисловості та перероблених матеріалів тощо [1].

На сьогодні є актуальним застосування сучасних методів розрахунку для визначення вантажопідйомності мостів, тому робота спрямована на розроблення чисельного моделювання.

Викладення основного дослідження

Опис мосту. Міст розташований у межах м. Андрушівка, Житомирської області по вул. Ломоносова. Автодорожній міст знаходиться в комунальній власності м. Андрушівка [2], міст розташований на автомобільній дорозі загального користування державного значення Т-06-09 /Р-18/ – м. Андрушівка (рис. 1–3).

Схема мосту балочно-консольна 5,85 + 33,00 + 5,85 м (нерозрізна ферма з консолями) загальною довжиною 44,70 м (по торцям нижнього поясу ферми), Г-6 + 2 х 0,9 м. Міст з прогонами із чотирикутних металевих ферм з трикутною решіткою із підвісками. Стояни відсутні. Консолі ферми підходять до насипу укріпленого підпірною стінкою. Проміжні опори залізобетонні масивні 9 м х 1 м. Перетинає річку Гуйва під прямим кутом. Отвір мосту в проясненні 33 м. Підмостовий габарит 2,90 м. Найближчий автодорожній об'їзд 6 км з орієнтовним часом руху 15 хв.

Точні дані про дату ведення в експлуатацію моста відсутні. Опитування місцевих жителів м. Андрушівка, Житомирської області та маркування елементів мосту встановило приблизні роки будівництва споруди з 1957 по 1960 роки за індивідуальним проектом під тимчасові рухомі навантаження Н-13, НГ-60.

Тротуар мосту з низової сторони відремонтовано у 2020 році. По низовій та верховій стороні мосту проходять міські комунікації закріплені на металеві консолі які кріпляться у вузлах ферми.

На підходах до мосту із сторони дороги Р-18 (опори № 1) встановлено сім дорожніх знаків з відстанню між знаками 10 м (знак № 7 найближчий до мосту):

Знак 3.29 «Обмеження максимальної швидкості 40 км/год» забороняє рух із швидкістю 40 км/год.

Знак 3.20 «Рух транспортних засобів без дотримання дистанції 50 м заборонено» забороняє рух транспортних засобів з дистанцією між ними менше зазначеної на знакові. Таблиця 7.1.1 «Відстань до об'єкта 150 м» позначає відстань від знака до місця запровадження Знака 3.20.

Знак 1.5.1 «Звуження дороги» (звуження дороги з обох боків). Таблиця 7.1.1 «Відстань до об'єкта 50 м» позначає відстань від знака місця запровадження відповідного обмеження.

Знак 1.39 «Інша небезпека (аварійно-небезпечна ділянка)» встановлюється перед небезпечною ділянкою дороги у місцях, де ширина проїзної частини не відповідають вимогам будівельних норм.

Знак 3.16 «Рух транспортних засобів, навантаження на вісь яких перевищує 8,5 т, заборонено» забороняє рух транспортних засобів, у яких фактичне навантаження на будь-яку вісь більше зазначеної на знакові.

Знак 3.15 «Рух транспортних засобів, маса яких перевищує 18 т, заборонено» забороняє рух транспортних засобів, у тому числі їх складів, загальна фактична маса яких перевищує зазначену на знакові.

Знак 2.6 «Перевага перед зустрічним рухом» встановлюється перед вузькою ділянкою дороги, на якій під час руху водій має перевагу стосовно зустрічних транспортних засобів.

Із сторони центра м. Андрушівка встановлено такі ж самі знаки окрім знаку № 7: «Знак 2.5 «Перевага зустрічного руху» забороняє в'їзд на вузьку ділянку дороги, якщо це може утруднити зустрічний рух. Водій повинен дати дорогу зустрічним транспортним засобам, що знаходяться на вузькій ділянці.»

Під час обстеження було зафіксовано інтенсивний рух спецтехніки — трактор моделі «Steiger 500» з робочим органом «812 N-26» загальною вагою 32 т (рис. 4). Під час обстеження зафіксовано вантажні транспортні засоби тягачі Volvo FH 13.400, Volvo FM 410, Renault 460.18 тощо дозволено повною масою разом із причепом до 44 т, які перетинали міст.



Рисунок 1 — Розміщення мосту в м. Андрушівка, Житомирської обл.

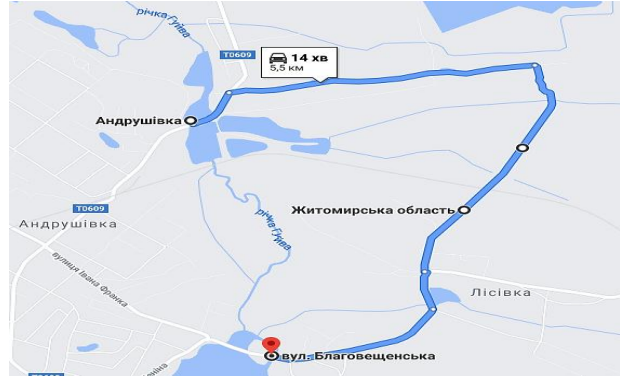


Рисунок 2 — Найближчий об'їзд мосту із сторони дороги Р-18



Рисунок 3 — Загальний вигляд мосту з верхової сторони



Рисунок 4 — Інтенсивний рух спецтехніки — трактор моделі «Steiger 500» з робочим органом «812 N-26» загальною вагою 32 т

Проїзна частина мосту має ширину 6,0 м між крайніми гранями бордюру. Висота бордюру 0,14 м. Бар'єри безпеки відсутні. Тротуари з кожного боку проїзної частини мають ширину проходу 0,9 м. Перильні огороження стійкові висотою 0,90 м.

Покрив проїзної частини — асфальтобетон, має двоскатний профіль в бік тротуарів. Покрив тротуарів – відсутній, гідроізоляція відсутня. Водовідведення з проїзної частини мосту реалізовано за рахунок двоскатного профілю в бік тротуарів та водовідвідних трубок. Товщина асфальтобетонного покриття проїзної частини в середньому — 16–19 см.

Освітлення проїзної частини відсутнє.

Прогонова будова — балочно-консольна металева ферма з паралельними поясами з трикутною решіткою із підвісками з їздою понизу. Нижній та верхній пояси із складеного перерізу: швелери стандартного профілю № 30 об'єднані накладками 4 шт. на секцію.

Нижній пояс $\Phi 1$ та $\Phi 2$ об'єднані поперечною металевою балкою стандартного профілю з кроком 2,25 м — двутавр № 55 (рис. 5).

Орієнтовний час розробки проекту 1950-1957 роки. Розрахункова модель тимчасового рухомого навантаження за Н-106-53 — Н-13, НГ-60. Було проведено статистичне дослідження, яке встановило найбільш ймовірну марку сталі як НЛ2. Розрахункові характеристики сталі приймаємо за ГОСТ 5058-49 [3].

З'єднувальні елементи — заклепки. Висота ферми 3,30 м, відстань між верхніми поясами ферми в просвіті по підвіскам: 11-21 — 6,62 м; 12-22 — 6,65 м; 13-23 — 6,65 м; 14-24 — 6,64 м; 15-25 — 6,64 м; 16-26 — 6,65 м; 17-27 — 6,62 м; 18-28 — 6,57 м.

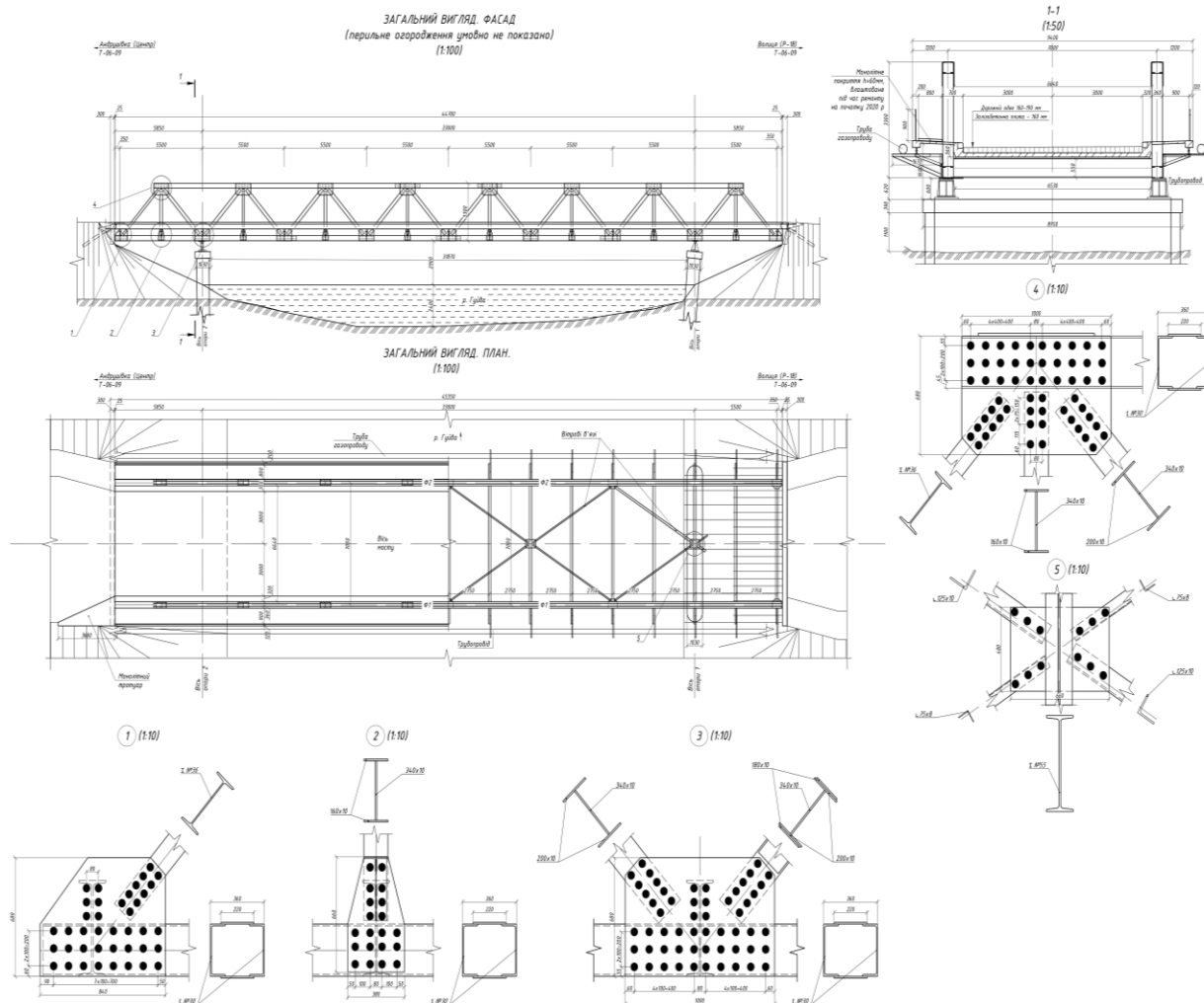


Рисунок 5 — Загальний вигляд споруди

Довжина секції ферми (між осями підвісок) 5,50 м. У середині прогону верхній пояс посилено листами металу загальної товщини 3,5 см (разом з накладками, без накладок 2,4 см з кожної сторони перерізу), довжина посилення 1,6 м (по 0,8 м в кожну сторону від підвіски № 15, 25). На опорах решітка ферми посилюється листами металу 1,2 см. Вигляд ферм наведено на рис. 6-9.



Рисунок 6 — Верхній пояс Ф1 по торцю з боку центра м. Андрушівки



Рисунок 7 — Вигляд на ферму зверху



Рисунок 8 — Вигляд на нижній пояс Ф1 (верхова сторона)



Рисунок 9 — Посилення верхнього поясу в середині прогону листами металу товщиною 3,5 см та довжиною 1,6 м



Опори № 0 та № 1 — масивні залізобетонні. Відомості про фундамент відсутні. Ширина опор поверху — 1,03 м. Довжина опор — 8,95 м. Висота опор над рівнем ґрунту — 1,1 м. Загальний вигляд наведено на **рис. 10–13**.



Рисунок 10 — Опора № 2. Зліва — вигляд з боку низової сторони; праворуч — вигляд з боку верхової сторони



Рисунок 11 — Опора № 1. Зліва — вигляд збоку низової сторони; праворуч — вигляд збоку верхової сторони



Рисунок 12 — Опора № 2. Вигляд збоку ОП № 1

Рисунок 13 — Опора №1. Вигляд збоку ОП № 2

На ОП № 2 встановлені опорні частини валкові — рухомі; на ОП № 1 тангенціальні — нерухомі. Опорні частини встановлені на металевий підферменник (подушку) розмірами 0,6 x 0,6 x 0,04 м. Верхня металева подушка має розміри 0,3 x 0,45 x 0,04 м. Висота опорних частин разом з подушками 0,6 м (від ригелю до нижнього поясу). Дві опорні частини на кожній опорі встановлено під кожний нижній пояс ферми (**рис. 14** і **рис. 15**).



Рисунок 14 — Тангенціальна нерухома опорна частина на ОП № 2



Рисунок 15 — Валкова рухома опорна частина на ОП № 2

Дані про фундаменти відсутні. Обстеження підземної частини мосту не проводили.

Міст перетинає р. Гуйва в прогоні (0–1). Глибина русла в середні прогону — 2,4 м.

Гуйва — річка в Україні, у межах Козятинського району Вінницької області та Бердичівського, Андрушівського і Житомирського районів Житомирської області. Права притока Тетерева (басейн Дніпра). Довжина Гуйви 97 км. Площа басейну 1 505 км². Похил річки 0,9 м/км. Річкова долина V-подібна, завширшки до 2 км. Заплава у верхів'ї заболочена. Річище звивисте, завширшки до 20 м, завглибшки пересічно 1,2 м. Стік зарегульовано ставками. Споруджено Андрушівське водосховище, яке використовують на технічне водопостачання, зрошення, риборозведення.

Бере початок у селі Садки. Тече спочатку на північний схід, у середній течії на північ, у нижній течії (від м. Андрушівки) — на північний захід. Впадає до Тетерева навпроти південно-західної околиці Житомира.

Середня мутність води річки Гуйва змінювалася від 0,94 г/м³ до 42 г/м³, максимальна — до 300 г/м³. Мутність води різко зростає й при проходженні дощових паводків. Найменша мутність води спостерігається зимою та в період літньої межени.

Забір і використання води в басейні Гуйви з 1999 по 2015 роки змінювалося від 2,965 млн м³ на рік у 2000 році до 12,35 млн м³ у 2009 році. В окремі роки загальний водозабір становив: 1999 — 4,465 млн м³; 2001 — 4,533 млн м³; 2004 — 3,698 млн м³; 2005 — 3,059 млн м³; 2006 — 5,588 млн м³; 2008 — 6,482 млн м³; 2012 — 11,87 млн м³; 2014 — 11,94 млн м³; 2015 — 4,464 млн м³. 65 – 33 % забраної води використовували у комунальному господарстві, до 40 % — у промисловості, 10 – 23 % — у сільському господарстві, частково — у риборозведенні [4, 5].

На мосту відсутні регуляційні споруди. По верху течії в 2 км розташована гідротехнічна регуляційна споруда подвійного призначення міст-шлюз (рис. 16 і рис. 17).



Рисунок 16 — Гідротехнічна регуляційна споруда в 2 км поверху течії (по вул. Благовещенська)



Рисунок 17 — Підпірна стінка з боку ОП № 1 (із сторони дороги Р-18)

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Репер «RP0» = 100,000 м — край фундаменту дорожнього Знака 2.6 «Перевага перед зустрічним рухом» на підходах з боку дороги Р-18 по правій стороні за ходом руху в центр м. Андрушівка (рис. 18).

Обстежувалися підходи довжиною 6 м. Регуляційні споруди — відсутні. Укріплення насипу підходів із сторони мосту — підпірна стінка і перехідними плитами. Габарит підходів до мосту — Г-7. Покрив проїзної частини на підходах — асфальтобетон. Перехідні плити — збірні залізобетонні. Бар'єрне огороження проїзної частини підходів — металеве.

Інструментальна зйомка та визначення міцності бетону. Для визначення висотного положення конструкцій мосту, а також поздовжніх і поперечних ухилів по проїзній частині було виконано технічне нівелювання. Інструментальну зйомку проїзної частини мосту через р. Гуйва виконували нівеліром Topcon Manab A4 S/NH88154 (Made in Japan). Прилад від'юстовано та гарантовано точність вимірів відповідно до технічних вимог. Результати нівелювання проїзної частини наведені в табл. 1–2.

Таблиця 1

Визначення умовних відміток по осі мосту (2012 рік)

	Підвіски №				ОП № 1	ОП № 2
	11-21	12-22	18-28	17-27		
	По лівому краю проїзної частини за ходом пікетажу					
Умовна відмітка, м	7,934	7,941	7,960	7,963	7,938	7,962
	По осі мосту					
Умовна відмітка, м	7,973	7,949	7,933	7,947	7,961	7,940
	По правому краю проїзної частини за ходом пікетажу					
Умовна відмітка, м	7,974	7,967	7,938	7,965	7,971	7,952

Таблиця 2

Порівняння перевищень нівелювання різних років

Ч.ч.	Місце відміток	Умовні Відмітки, м		Перевищення		Різниця перевищень
		2012 рік	2021 рік	2012 рік	2021 рік	
По осі мосту						
1	Над ОП №1	7,961	100,165	0,021	0,04	-0,019
	Над ОП №2	7,940	100,125			
2	Над ОП №1	7,961	100,165	0,002	0,021	-0,019
	Середина прогону	7,959	100,144			
3	Над ОП №2	7,940	100,125	-0,019	-0,019	0,00
	Середина прогону	7,959	100,144			
По лівому краю проїзної частини за ходом пікетажу						
1	Над ОП №1	7,938	100,116	-0,024	0,041	0,017
	Над ОП №2	7,962	100,119			
2	Над ОП №1	7,938	100,116	-0,048	-0,03	-0,018
	Середина прогону	7,986	100,190			
3	Над ОП №2	7,962	100,119	-0,024	-0,071	0,05
	Середина прогону	7,986	100,190			

Ч.ч.	Місце відміток	Умовні Відмітки, м		Перевищення		Різниця перевищень
		2012 рік	2021 рік	2012 рік	2021 рік	
По правому краю проїзної частини за ходом пікетажу						
1	Над ОП №1	7,971	100,151	0,019	-0,011	0,03
	Над ОП №2	7,952	100,162			
2	Над ОП №1	7,971	100,151	0,007	0,019	-0,012
	Середина прогону	7,964	100,132			
3	Над ОП №2	7,952	100,162	-0,012	0,03	-0,04
	Середина прогону	7,964	100,132			

Для виявлення просядок опори порівнюємо перевищення між опорами та серединою мосту з результатами нівелювання ТОВ «НВФ МостоБудСервіс». У звіті з обстеження ТОВ «НВФ МостоБудСервіс» висотні умовні відмітки визначені лише в перерізі по підвіскам, тому визначимо умовні висотні відмітки по над опорою методом лінійної інтерполяції.

ТОВ «НВФ МостоБудСервіс» прийняло за репер конструкцію мосту, що є недопустимо, та збільшує похибку при порівнянні перевищень.



Рисунок 18 — Репер «RP0»

Враховуючи використання різних реперів, а також відміток по асфальтобетонному покриттю, надати точні дані з наявності просідання опор і прогинів неможливо, а порівняльний аналіз переміщень за 2012 рік і 2021 рік показав, що є негативні зміни у висотному положенні із сторони опори № 1 та середини прогону. Можливе просідання опори до 4 мм за 9 років, також відмітки над серединою мосту стали в середньому нижчими на 7 мм, що свідчить про збільшення прогину ферми.

Для перевірки міцності конструкцій мосту були проведені роботи з визначення поверхневої міцності бетону відповідно до ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [6].

Визначення міцності бетону на стиск методом пружного відскоку проводили механічним склерометром МШ-225 (енергія удару 2207 Дж) для бетону товщиною від 70 мм.

Випробування поверхневої міцності бетону проводили за від'ємної температури повітря мінус 3 °С. Визначення показників міцності бетону на стиск проводили на поверхнях, які не мають дефектів. За результатами випробувань фактична міцність елементів конструкцій (при їх середніх значеннях) складає: тіло ОП № 2 — 33 МПа; ТІЛО ОП № 1 — 27 МПа; низ залізобетонної плити проїзної частини — 39 МПа (рис. 19).

З врахуванням дефектів бетону та фронту карбонізації рекомендується до розрахунку приймати наступний клас бетону: для монолітного бетону ОП № 2 — В30; для монолітного бетону ОП №1 — В25; для монолітного бетону плити проїзної частини — В35.

Розрахункові характеристики бетону приймати згідно з таблицею 3.6 ДБН В.2.3-14 [7].



Рисунок 19 — Процес визначення міцності бетону для монолітного бетону плити проїзної частини по середині довжини консолі К(2-3)

Результати розрахунку вантажопідйомності. Вихідні дані — схема мосту балочно-консольна ферма 5,85 + 33,0 + 5,85. Загальна довжина 44,7 м, Г-6 + 2 x 0,8 м, загальною шириною 9,4 м. Ферма з їздою понизу з паралельними поясами з трикутними решітками. Розрахункові характеристики сталі НЛ2 приймаємо за ГОСТ 5058-49 [3].

Модель тимчасового навантаження Н-13, НГ-60 та коефіцієнти надійності приймаються за Н-106-53. Тимчасове рухоме навантаження розташовується на мосту, так щоб викликати найбільші зусилля в конструкції. Навантаження від натовпи приймається як 300 кг/м².

Постійне навантаження визначаються вагою конструктивних елементів, розрахунок яких виконано в табличній формі (табл. 3). При цьому коефіцієнт надійності по навантаженню усіх елементів прийнято 1,1, беручи до уваги результати виконаних при обстеженні інструментальних вимірювань параметрів шарів дорожнього одягу проїзної частини та інших конструкцій мостового полотна та прогонової будови.

Таблиця 3

Постійні навантаження

Вид навантаження	Загальна вага, кН	Нормативна вага на п.м., кН/м	Розрахункова вага на п.м., кН/м
Асфальтобетонний покрив	615	13,8	15,2
Плита проїзної частини	1 788	40,0	44
Металева прогонова будова, 36 т	360	8,1	8,9
Всього	2 763	61,9	68,1

Розрахункова схема — розрахунок проводили в програмному комплексі, що працює за методом Скінченних Елементів (МСЕ). Розрахункова схема враховує об'єднання металевих ферм із збірною залізобетонною плитою проїзної частини (рис. 20 – 23). Під час створення розрахункової схеми приймають розрахункові перерізи відповідальних елементів без врахування дефектів.

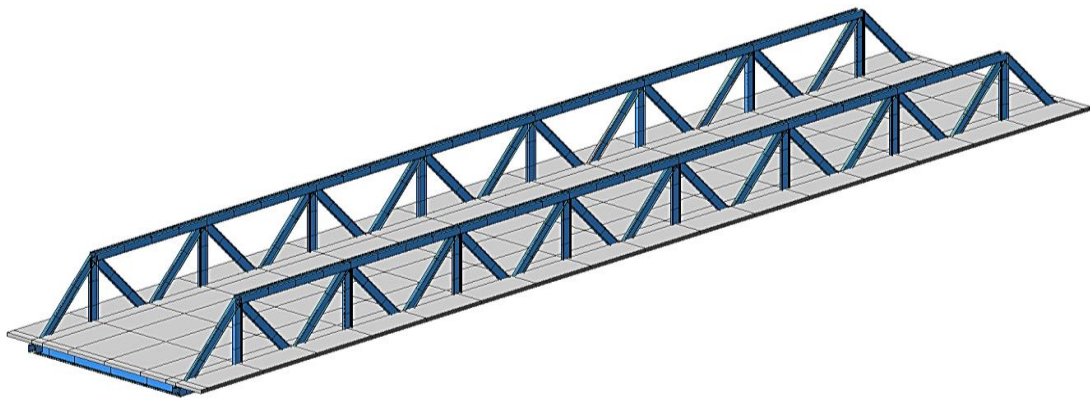


Рисунок 20 — Зображення розрахункової схеми

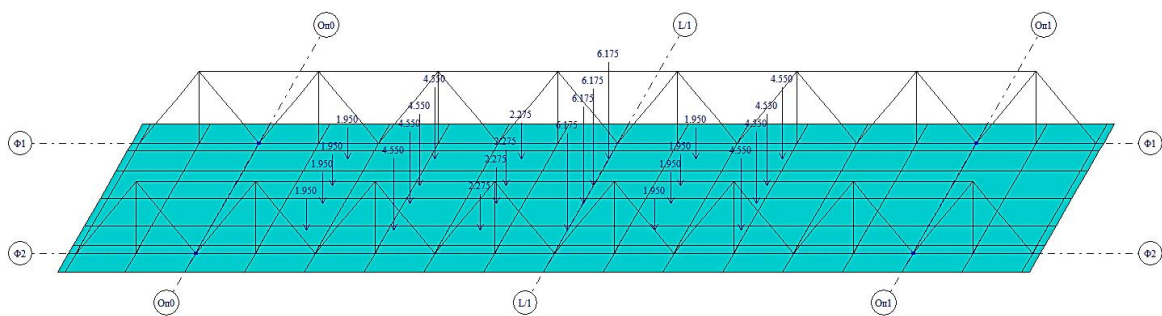


Рисунок 21 — Задання тимчасового навантаження Н-13 на розрахункову схему

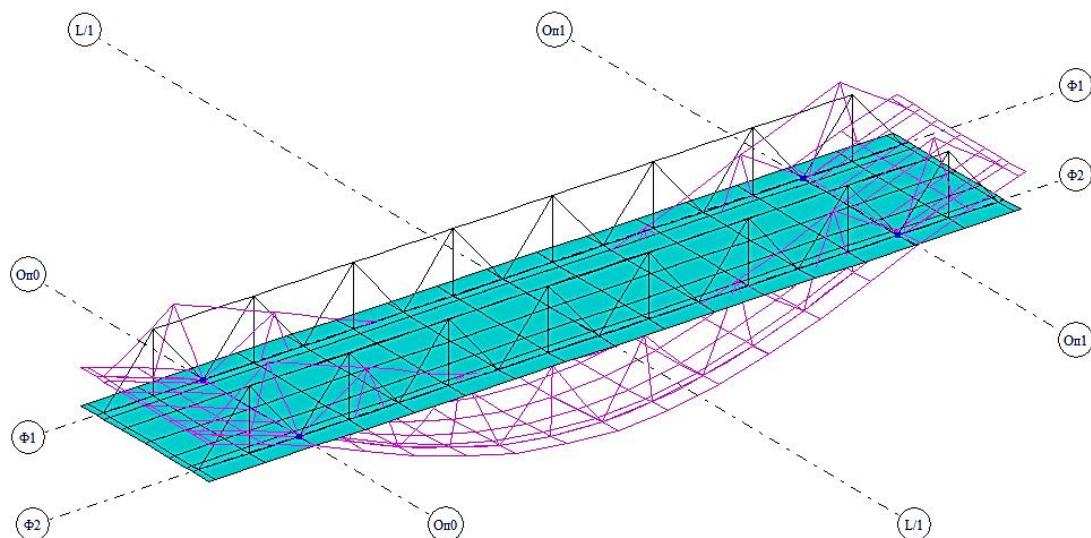


Рисунок 22 — Деформації прогонової будови від заданого навантаження

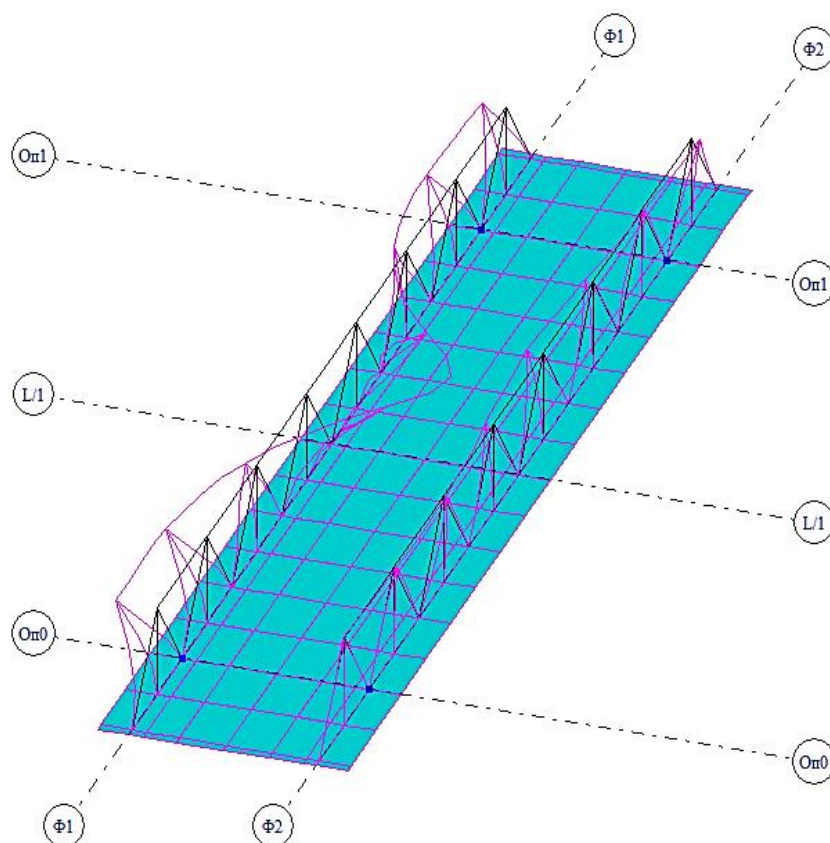


Рисунок 23 — Відображення 1-ої форми втрати стійкості ферм прогонової будови

Пружні розрахунки міцності позacentрово-стиснутих, стиснутозігнутих, позacentрово-розтягнутих і розтягнуто-зігнутих елементів для перерізів 1-го класу за згину в одній із головних площин виконують за формулою:

$$\frac{N}{A_n} + \frac{M}{W_n} \leq \frac{R_y \cdot m}{\gamma_r} \quad (1)$$

де $R_y = 333426,1 \text{ кН/м}^2$ згідно з ГОСТ 5058-49 [3],
 $m = 0,9$ згідно з ДБН В.2.3-26:2010 [8],
 $\gamma_r = 1,05$ згідно з ДБН В.2.3-22:2009 [9].

Результати розрахунку наведено в **табл. 4**.

Розрахунок з урахуванням всіх зафіксованих дефектів під час обстеження, показав, що вантажопідйомність мосту забезпечить пропуск транспортних засобів в колоні загальною масою не більше 10,0 т з прийнятною надійністю та безпекою експлуатації. Слід враховувати, що наскрізна корозія та втрата заклепок можуть призвести до раптової втрати стійкості та зміни розрахункової системи. Контроль за рухом вантажного транспорту та обмеження маси 10 т в колоні зменшить ймовірність втрати геометричної незмінності системи до прийнятої протягом рекомендованого часу будівництва нового мосту при умові постійного та регулярного нагляду за мостом.

Зведена таблиця результатів розрахунку

	Переріз	Сумарне напруження $\frac{N}{A_n} + \frac{M}{W_n}$		Граничне допустиме напруження, $\frac{R_y \cdot t}{\gamma_r}$	Забезпечена вантажопідйомність
		Постійне навантаження	Тимчасове навантаження		
Верхній пояс + підсилення	[] №30+ Пластини $W_n = 1328,95 \text{ см}^3 A_n = 210,8 \text{ см}^2$	152232,6 кН/м ²	146140,5 кН/м ²	285793,8 кН/м ²	Втрата вантажопідйомності > 40 % [10] Транспортний засіб в колоні – 10 т На одну вісь – 7 т
Нижній пояс	[] №30 $W_n = 774,0 \text{ см}^3 A_n = 81,0 \text{ см}^2$	152232,6 кН/м ²	146140,5 кН/м ²	285793,8 кН/м ²	Забезпечено
Поперечна балка	I №55 $W_n = 2035,0 \text{ см}^3 A_n = 118,0 \text{ см}^2$	42598,3 кН/м ²	11144,5 кН/м ²	285793,8 кН/м ²	Забезпечено
Підвіска	$W_n = 726,56 \text{ см}^3 A_n = 66,0 \text{ см}^2$	35979,0 кН/м ²	3351,6 кН/м ²	285793,8 кН/м ²	Забезпечено
Діагональ	$W_n = 1437,63 \text{ см}^3 A_n = 112,0 \text{ см}^2$	39994,3 кН/м ²	34895,9 кН/м ²	285793,8 кН/м ²	Забезпечено

Оцінка технічного стану

Оцінювання технічного стану мосту виконане згідно з ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 [10], ДБН В.2.3-6-2009 [11], Р В.2.3-218-03450778-793:2011 [12].

Технічний стан елементів конструкції споруди:

Елементи проїзної частини — стан 5 (непрацездатний).

Елементи прогонової будови — стан 5 (непрацездатний).

Опори та опорні частини — стан 5 (непрацездатний).

Фундаменти — стан 4 (обмежено працездатний)..

Підмостове русло — стан 2 (обмежено справний).

Регуляційні споруди — відсутні.

Підходи — стан 5 (непрацездатний).

Експертна експлуатаційна оцінка є середньозваженим значенням визначеного експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди, що розглядаються. За нормативним документом ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 [10] експлуатаційну оцінку технічного стану споруди *E* визначають за шкалою безрозмірних коефіцієнтів у 100 балів та становить згідно **табл. 5**.

Таблиця 5

Загальна оцінка технічного стану мосту

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Рейтингова оцінка	Характеристика безпеки, β
Стан 5	Непрацездатний	27	1,74

Висновки

Розрахунок з урахуванням всіх зафіксованих дефектів під час обстеження, показав, що вантажопідйомність мосту забезпечить пропуск транспортних засобів в колоні загальною масою не більше 10,0 т з прийнятною надійністю та безпекою експлуатації. Слід враховувати, що наскрізна корозія та втрата заклепок можуть призвести до раптової втрати стійкості та зміни розрахункової системи. Контроль за рухом вантажного транспорту та обмеження маси 10 т в колоні зменшить ймовірність втрати геометричної незмінності системи до прийнятної протягом рекомендованого часу будівництва нового мосту при умові постійного та регулярного нагляду за мостом.

У роботі використано ряд нормативних документів, які на момент обстеження були чинними.

Під час обстеження виявлено дефекти, які суттєво знижують несну здатність, довговічність і перешкоджають безпечному дорожньому та пішохідному руху. Переломи поздовжнього профілю у вузлі спряження мосту з насипом дороги створюють динамічний удар, що сприймається прогоною будовою, опорами та підпірними стінками і пришвидшує швидкість деградації елементів мосту.

Згідно з табл. 5.3 ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [10] для мостів, що знаходяться в технічному стані «Стан 5. Непрацездатний» знос елементів мосту перевищує 43 %, а залишковий ресурс вичерпано.

Рекомендації щодо подальшої експлуатації споруди: необхідно нагально вирішити питання щодо капітального ремонту / реконструкції або нового будівництва.

Враховуючі існуючі дефекти, пошкодження та результати розрахунку відповідно до табл. 5.3 ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [10] рекомендується обмежити рух вантажного транспорту в колоні масою більше 10 т та вести постійний нагляд і контроль за виконанням обмежень руху та технічним станом мосту із залученням спеціалізованих організацій. Особливо нагляду потребує нахилена ОП № 1 та контролю її нахилу. Обмеження руху вантажних транспортних засобів знизить ймовірність виникнення аварійних ситуацій. У такому разі необхідно на підходах до мосту з обох сторін встановити дорожній знак 3.15 «Рух транспортних засобів, маса яких перевищує 10 т, заборонено». Дорожній знак необхідно встановити таким чином, щоб вантажний транспорт, побачивши знак, зміг змінити напрям руху, не заважаючи іншим учасникам дорожнього руху.

Балансоутримувач на свій розсуд може не змінювати існуючі знаки, але в такому разі повинен контролювати дотримання дистанції та перенавантаження мосту. Також слід враховувати, що визначено вантажопідйомність прогону мосту, а вантажопідйомність опори невідома у зв'язку із відсутністю будь-яких відомостей про фундаменти. Для забезпечення довговічності та прийнятної надійності до завершення нового будівництва або ремонту ми рекомендуємо замінити існуючий знак обмеження повної маси 18 т на 10 т, на вісь з 8,5 т на 7 т та залишити всі інші знаки.

Рекомендовано наступне планове обстеження провести не пізніше ніж 01 жовтня 2022 року.

Рекомендації щодо капітального ремонту / реконструкції / нового будівництва споруди. Габарит мосту та ширина тротуарів не задовольняють чинних вимог, а саме ДБН В.2.3-22:2009 [9].

На сьогодні габарит мосту та тротуарів не задовольняє потреб міста і в найближчу перспективу потребує поширення і доведення до чинних вимог. Існуюча конструкція мосту — ферма з їздою понизу не дає можливості в рамках ремонту повноцінного поширення з дотриманням сучасних вимог і забезпеченням ширини тротуару, яка достатня для користування маломобільними групами населення.

Міст було запроєктовано під тимчасові моделі навантаження Н-13, НГ-60 відповідно до норм СН-106-53, які втратили чинність у 1962 році та були замінені нормами СН-200-62. Таким чином, забезпечення в межах капітального ремонту або реконструкції відповідності чинним моделям навантаження А-15, НК-100 є технічно неможливим без улаштування додаткових опор і суттєвого підсилення елементів ферм. Реалізація зазначених заходів призведе до істотного збільшення кошторисної вартості робіт і фактично наблизить її до вартості нового будівництва.

Проведення капітального ремонту / реконструкції забезпечує прогнозу довговічність споруди до 25 років. За результатами аналізу аналогічних об'єктів та з урахуванням технічного стану металевих елементів і опор, оціночна вартість ремонту у цінах 2020 року становила 12–20 млн грн.

З урахуванням інфляційних процесів 2021 – 2025 років, девальвації національної валюти відносно долара США, а також суттєвого зростання вартості металопрокату, бетонних сумішей, енергоносіїв і логістики, приведена до поточного рівня цін вартість капітального ремонту / реконструкції становить орієнтовно 22–38 млн грн (у поточних цінах станом на сьогодні).

Було проведено статистичний аналіз вартості нового будівництва мостів протяжністю 40–80 м за даними електронної системи публічних закупівель «Прозорро». У цінах 2020 року вартість нового будівництва становила 30–60 млн грн. З урахуванням зазначених макроекономічних чинників поточна оціночна вартість нового будівництва складає орієнтовно 55–110 млн грн із забезпеченням нормативної довговічності не менше 80 років.

Оцінювання вартості виконували за методикою аналізу аналогічних об'єктів (comparative analogous estimation) [13], що відповідає підходам до попереднього вартісного оцінювання інвестиційних проєктів. Аналогічні об'єкти були відібрані станом на момент проведення обстеження, тоді як вартісні показники приведені до поточного рівня цін шляхом індексації з урахуванням макроекономічних показників.

Під час статистичного аналізу вартості не враховували інженерно-будівельну оцінку території (геологічні умови, складність влаштування фундаментів, організація будівельного майданчика тощо), що може додатково вплинути на кінцеву кошторисну вартість як ремонту, так і нового будівництва.

Порівняльні приведені економічні показники (умовна середньорічна вартість життєвого циклу без урахування експлуатаційних витрат) становлять:

— для капітального ремонту / реконструкції — орієнтовно 0,9–1,5 млн грн/рік (за розрахункового строку служби 25 років), невраховуючи вартості наступного капітального ремонту, яке значно збільшить вартість експлуатаційного утримання на наступні 25–50 років;

— для нового будівництва — орієнтовно 0,7–1,4 млн грн/рік (за розрахункового строку служби не менше 80 років).

При цьому експлуатаційні витрати для відремонтованих споруд є статистично вищими порівняно з новими мостами через підвищені витрати на поточне утримання, антикорозійний захист і періодичне підсилення елементів.

Ураховуючи технічні обмеження щодо забезпечення чинних нормативних навантажень, співставні приведені економічні показники та значно більший нормативний строк експлуатації, нове будівництво мосту є раціональним та економічно доцільнішим рішенням у довгостроковій перспективі (не менше 80 років).

Враховуючи, що технічний стан мосту «Стан 5. Непрацездатний», наявний інтенсивний розвиток пошкоджень, порівняно з обстеженням 2012 року, таких як: нахил опори № 1 із сторони дороги Р-18, наскрізна корозія елементів ферми, руйнування 40 % заклепок вузлів тощо рекомендується протягом року розробити проект нового будівництва мосту та протягом трьох років після затвердження проекту та проходження експертизи завершити будівництво.

Список літератури

1. Давиденко О. О., Гаркуша М. В., Козарчук І. А., Казак П. О., Цапок Я. О. Методи визначення технічного стану водопропускної труби з аналізом необхідних ремонтних робіт. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький, ЦНТУ*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С. 214–223. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.214-223](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.214-223).
2. Постанова КМУ №55 від 30 січня 2019 року Про затвердження переліку автомобільних доріг загального користування державного значення URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2019-п#Text> (дата звернення: 01.02.2026).
3. ГОСТ 5058-49 Сталь низьколегована. Технічні умови. Київ, 1949. 9 с. (Інформація та документація).
4. Географічна енциклопедія України : в 3-х томах / редкол.: О. М. Маринич (відпов. ред.) та ін. Київ: Українська Радянська Енциклопедія ім. М. П. Бажана, 1990. 480 с.
5. Лозовіцький П.С., Молочко А.М. Формування стоку та екологічний стан води річки Гуйва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-соціальні науки*. 2018. Вип. 2 (38). С. 21–26.
6. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Київ, 2010. 34 с. (Інформація та документація).
7. ДБН В.2.3-14:2006 Мости і труби. Правила проектування. Київ, 2007. 218 с. (Інформація та документація).
8. ДБН В.2.3-26:2010 Споруди транспорту. Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. Київ, 2011. 214 с. (Інформація та документація).
9. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2010. 40 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2010. 55 с. (Інформація та документація).
11. ДБН В.2.3-6-2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. Київ, 2010. 36 с. (Інформація та документація).
12. Р В.2.3-218-03450778-793:2011. Рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності та довговічності мостових споруд. Київ, 2011. 48 с. (Інформація та документація).
13. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021. 274 p.

References

1. Davydenko O. O., Harkusha M. V., Kozarchuk I. A., Kazak P. O., Tsapok YA. O. Metody vyznachennya tekhnichnoho stanu vodopropusknoyi truby z analizom neobkhidnykh remontnykh robit. *Tsentral'noukrayins'kyu naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky. Kropyvnyts'kyu*, TSNTU, 2025. Vyp. 11(42), ch. II, S. 214 – 223. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.214-223](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.214-223) [in Ukrainian].
2. Postanova KМУ №55 vid 30 sichnya 2019 roku Pro zatverdzhennya pereliku avtomobil'nykh dorih zahal'noho korystuvannya derzhavnoho znachennya URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2019-п#Text> [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 55 of January 30, 2019 On Approval of the List of Public Roads of State Importance URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2019-п#Text>] [in Ukrainian].

3. HOST 5058-49 Stal' nyz'kolehovana. Tekhnichni umovy [GOST 5058-49 Low-alloy steel. Technical conditions]. Kyiv, 1949. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. Heohrafichna entsyklopediya Ukrayiny : v 3-kh tomakh / redkol.: O. M. Marynych (vidpov. red.) ta in. Kyiv: Ukrayins'ka Radyans'ka Entsyklopediya im. M. P. Bazhana, 1990. 480 s. [in Ukrainian].
5. Lozovits'kyi P.S., Molochko A.M. Formuvannya stoku ta ekolohichnyy stan vody richky Huyva. *Visnyk Kyivsk'oho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Viys'kovo-sotsial'ni nauky*. 2018. Vyp. 2 (38). P. 21–26 [in Ukrainian].
6. DSTU B V.2.7-220:2009 Budivel'ni materialy. Betony. Vyznachennya mitsnosti mekhanichnyimi metodamy neruynivnoho kontrolyu [DSTU B V.2.7-220:2009 Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing]. Kyiv, 2010. 34 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. DBN V.2.3-14:2006 Mosty i truby. Pravyla proektuvannya [DBN V.2.3-14:2006 Bridges and pipes. Design rules]. Kyiv, 2007. 218 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. DBN V.2.3-26:2010 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Stalevi konstruktsiyi. Pravyla proektuvannya [DBN V.2.3-26:2010 Transport structures. Bridges and pipes. Steel structures. Design rules]. Kyiv, 2011. 214 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. DBN V.2.3-22:2009 Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya [DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv, 2010. 40 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
10. DSTU-N B V.2.3-23:2009 Nastanova z otsynuyvannya i prohnozuvannya tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv [DSTU-N B V.2.3-23:2009 Guidelines for assessing and predicting the technical condition of road bridges]. Kyiv, 2010. 55 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
11. DBN V.2.3-6-2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennya ta vyprobuvannya [DBN V.2.3-6-2009 Transport structures. Bridges and pipes. Inspection and testing]. Kyiv, 2010. 36 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
12. R V.2.3-218-03450778-793:2011. Rekomendatsiyi shchodo pidvyshchennya ekspluatatsiynoyi nadiynosti ta dovhovichnosti mostovykh sporud [R B.2.3-218-03450778-793:2011. Recommendations for increasing the operational reliability and durability of bridge structures]. Kyiv, 2011. 48 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
13. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021. 274 p. [in English].

Oleksandr Davydenko, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

Igor Kozarchuk, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4972-6016>

Mykola Harkusha, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

NUMERICAL MODELING OF BRIDGE LOAD-CARRYING CAPACITY CONSIDERING CORROSION PROCESSES BASED ON THE RESULTS OF A SPECIAL DETAILED INSPECTION

Abstract

Introduction. The actual technical condition of Ukraine's critical transport infrastructure facilities is a retrospective indicator of the problem of maintenance and operation. The primary task during the restoration of transport infrastructure facilities is to compile a defect list for each facility in order to further develop design solutions and prepare design and cost documentation. The rate of degradation and its patterns directly affect the final cost of restoring transport structures.

Determining the technical condition of transport structures, accompanied by an analysis of the condition of structural elements and operating conditions, makes it possible to effectively select technological solutions and construction materials for repair works, taking into account the study of degradation patterns to ensure acceptable reliability and durability, which is a global scientific issue of today.

The application of numerical modeling to determine the load-carrying capacity of a bridge is an urgent prerequisite for clarifying its operational condition, as well as for predicting its reliability and durability as a function of time.

Problem Statement. It has been established that there is a substantiated need to carry out numerical modeling of the bridge's load-carrying capacity, taking into account corrosion processes, in order to assess its residual service life.

Objectives. The aim of this research is to calculate the load-carrying capacity of the bridge using the finite element method based on the results of a special detailed inspection of the bridge over the Guiva River on Lomonosova Street in Andrushivka, Zhytomyr Region.

Results. The study established a pattern of loss of load-carrying capacity of a steel-reinforced concrete road bridge, taking into account the weakening of truss elements due to corrosion processes. Furthermore, based on the results obtained, the technical condition of the structure was determined; an assessment of the loss of load-carrying capacity in accordance with the identified defects and operational condition was carried out; the residual service life was evaluated; proposals for eliminating defects and damages were provided; and a conclusion regarding the feasibility of new construction was formulated.

Conclusions. The study presents numerical modeling of the bridge's load-carrying capacity, taking into account corrosion processes, based on the results of a special detailed inspection.

Keywords: highway bridge, bridge residual service life, bridge deck, finite element method, repair, transport structure, numerical modeling.