

## УДК 624.873:624.046.2

К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ<sup>1\*</sup>, Д. С. СПІВАК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Факультет військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорт, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 738 54 25, ел. пошта kirill\_perpelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237

<sup>2</sup>Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту, Україна, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

## Методика оцінювання несучої здатності інвентарних конструкцій наплавних мостів

**Мета.** Метою даної роботи є розробка підходів для об'єктивного дослідження інвентарної конструкції наплавного залізничного мосту НЖМ–56. Вибір розрахункової схеми наплавного мосту для подальших обґрунтованих досліджень вантажопідйомності та рекомендацій з улаштування мостів з майна НЖМ–56 для пропуску залізничного, автомобільного та гусеничних навантажень. **Методика.** Варіативне моделювання наплавних (понтонних) мостів НЖМ–56 з різними схемами (довжиною та кількістю понтонних опор) для їх дослідження методом ліній впливу. Аналіз отриманих результатів, обґрунтування розрахункової схеми мостового переходу, яка пропонується до подальших досліджень. Застосування програмного забезпечення, що реалізує метод скінчених елементів для проведення досліджень. **Результати.** Опрацювання підходів для перерахунку вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) систем мостів методом скінчених елементів. Визначено варіант довжини та схему збирання наплавного мосту НЖМ–56, що чинить найбільший вплив на величину зусиль, які виникають під дією тимчасового навантаження, для подальших досліджень та надання обґрунтованих рекомендацій з пропуску тимчасового навантаження. Запропоновано найбільш невигідні варіанти та місця розміщення тимчасових рухомих навантажень для дослідження напружено-деформованого стану конструкції. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в отриманні нових результатів на основі уточненої методики для перерахунку вантажопідйомності наплавних (понтонних) систем мостів на прикладі наплавного мосту НЖМ–56. Дослідження зосереджено на вивченні особливостей перехідної частини понтонного мосту, що розглядається як окрема підсистема та в сукупності з елементами руслової частини. **Практична значимість.** Визначення підходів та методик з перерахунку вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) систем, які потребують перерахунку за викликами сьогодення. Дослідження направлені на забезпечення безпечного пропуску тимчасового залізничного, гусеничного та колісних навантажень по наплавному (понтонному) мосту НЖМ–56. Визначення особливостей дослідження наплавної системи мосту із застосуванням програмного забезпечення, що реалізує метод скінчених елементів.

*Ключові слова:* наплавні (понтонні) мости; критична довжина; схема збирання; подолання водних перешкод; функціонування транспортної інфраструктури; метод ліній впливу; варіативне моделювання наплавних систем; метод скінчених елементів

### Вступ

Сучасні виклики, пов'язані з повномасштабною агресією збройних сил російської федерації проти України та застосуванням ворогом високоточного озброєння, безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та інших сучасних засобів ведення бойових дій, створює нагальну потребу в забезпеченні надійного технічного прикриття об'єктів національної транспортної інфраструктури для її стійкого функціонування в будь-яких сценаріях виникнення загрози її функціонуванню. Це критично важливе завдання в за-

безпеченні обороноздатності країни. У разі руйнування об'єкту транспортної мережі способи та терміни його відновлення визначаються великою кількістю чинників, що залежать від його місця знаходження та вагомості в ланці логістичного забезпечення. Короткотермінове відновлення руху через бар'єрне місце можливе шляхом наведення переправи на ближньому обході з використанням наплавних (понтонних) військових мостів, паромної переправи, з використанням механізованих мостових комплексів.

Для забезпечення пропуску великовагових транспортних засобів через водні перешкоди

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

збройні сили НАТО поділяють військові мости на три категорії:

– штурмові мости, так звані мости близької підтримки з прогонами довжиною близько 20 м, що перевозяться і встановлюються на гусеничному шасі;

– загальні опорні мости (GSB – general support bridges) з прогонами близько 40 м, що перевозяться на декількох колісних транспортних засобах;

– мости ліній зв'язку (LOC – line-of communication bridges), які найчастіше є складними або понтонними конструкціями, використовуються для переправи через широкі водойми.

Ця класифікація була створена у відповідь на різні сценарії використання, а також у зв'язку із конструктивними відмінностями між перерахованими трьома категоріями мостів.

Мости LOC і GSB часто використовуються в рамках заходів із ліквідації наслідків кризових ситуацій для підтримки місцевого населення, забезпечення життєдіяльності мережі доріг. Також їх використовують в якості тимчасових мостів, які замінюють постійні мости, пошкоджені повеннями [10].

У країнах членах НАТО військова класифікація навантаження мостів, поромів, плотів і транспортних засобів визначена, стандартизована та описана в [11]. Зміст числового значення, яке відображає вантажопідйомність мосту та відповідність транспортного засобу MLC (Military Load Classification), включає в себе значення маси транспортного засобу з урахуванням його геометрії (довжини і ширини) та використовується для оцінки здатності військового транспортного засобу використовувати штучну споруду як засіб для подолання перешкоди безпечно та без її пошкодження.

Для використання мостів у військових цілях на дорогах оборонного значення інженерам рекомендовано додатково, під час проектування або оцінки технічного стану, класифікувати мости згідно зі STANAG 2010 та 2021, QSTAG 180, що забезпечить їх використання з максимальною безпечною військовою пропускною здатністю. Класифікація мостів на альтернативних дорогах повинна відповідати класифікації тимчасових рухомих навантажень на мости відповідно до [3] та [5]. Окрім цього, слід враховувати вантажопідйомність мосту та можли-

вість проїзду великовагових транспортних засобів або військової техніки [6].

За досвідом практичного застосування, майно наплавного залізничного мосту НЖМ–56 активно використовується для технічного прикриття важливих транспортних споруд. Крім того, воно забезпечує оперативне відновлення руху автомобільного транспорту через водні перешкоди на територіях України, що постраждали внаслідок бойових дій [1]. З огляду на сучасні військові виклики та вимоги щодо пропуску сучасного навантаження, зокрема військового, виникає потреба в опрацюванні методики дослідження мосту НЖМ–56 з подальшою його класифікацією відповідно до класу військової навантаження MLC.

### Мета

Метою даної статті є розробка методики оцінки вантажопідйомності наплавних мостів для забезпечення безпечного пропуску сучасних залізничних, автомобільних та гусеничних транспортних засобів в умовах бойових дій та раціонального використання інвентарних конструкцій. В статті розглянуто підходи до вибору розрахункової схеми наплавного мосту та визначення критичних ділянок для тимчасових рухомих навантажень, які підлягають розрахунку відповідно до сучасних стандартів країн НАТО. При дослідженні розрахункової моделі понтонного мосту аналізується вплив довжини мосту на величину внутрішніх зусиль під дією тимчасового навантаження, а також визначаються критичні ділянки для колісних, гусеничних і залізничних моделей рухомих навантажень.

### Методика

В більшості випадків забезпечення швидкого відновлення руху через бар'єрну ділянку забезпечується за рахунок тимчасового відновлення інвентарними конструкціями наплавних систем. Більшість вітчизняних штатних інвентарних конструкцій запроєктовані за старими нормами по навантаженню, яке діяло на той час. Безпечна експлуатація цих систем мостів за викликом сучасних стандартів країн НАТО та діючими нормативними документами щодо тимчасових рухомих навантажень можлива тільки після перевірки їхньої вантажопідйом-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ності. Пропускна здатність тієї чи іншої конструкції визначається напруженнями, які виникають в елементах під найбільш важкою одиницею рухомого навантаження та діючими технічними умовами.

Діючим керівним документом з визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов мостів є Інструкція з визначення умов та пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах [2]. Вказівки є посібником для оперативного визначення рівня навантаження залізничних мостів рухомим складом залізниць на основі методу класифікації, а також для встановлення режиму пропуску поїздів по мостах. Слід зазначити, що визначення вантажопідйомності за методикою [2] не є нормативним у зв'язку з наявністю суттєвих особливостей, які виявляються під час аналізу дії сучасних залізничних навантажень на наплавні системи. Зазначені особливості зумовлені динамічним характером навантажень, плавучістю конструкцій, коливальними процесами та впливом водного середовища. Таким чином, встановлення вантажопідйомності наплавного мосту НЖМ–56 методом класифікації елементів потребує сучасних підходів. Підготовчими етапами визначення вантажопідйомності наплавної (понтонної) системи мосту є визначення:

- довжини мосту, яка буде розрахунковою;
- варіанту влаштування понтонних опор;
- місць розташування схеми тимчасового рухомого залізничного, гусеничного та колісних навантажень.

Для точного встановлення вантажопідйомності рекомендуються сучасні обчислювальні методи, які інтегрують класифікацію елементів з числовим моделюванням. Основним є метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований у програмних комплексах інженерного аналізу, що дозволяє враховувати просторову роботу конструкції, динамічний характер навантажень, плавучість елементів та взаємодію з водним середовищем.

### Результати

Залежно від необхідної ширини подолання водної перешкоди може бути наведений понтонний міст із майна НЖМ–56 загальною довжиною до 531,8 м, який складається з руслової та перехідної частин. Основними конструктив-

ними елементами наплавного мосту НЖМ–56 є блоки прогонових будов довжиною 6,25 м та понтонні опори. Понтонні опори формуються з трьох секцій – носової, середньої та кормової – відповідно до вимог, наведених у [8]. Один блок прогонової будови встановлюється на одну або дві секції понтонних опор залежно від прийнятої схеми збирання мостового переходу.

Початковим етапом дослідження вантажопідйомності є визначення варіантів довжини мосту, які чинять найбільший вплив на величину зусиль, що виникають у балках під дією тимчасового навантаження. З цією метою конструкція мосту розглядалася в трьох конфігураціях:

- руслова частина без перехідної, яка може існувати як самостійна конструкція;
- сумісна робота руслової частини з перехідною;
- перехідна частина без руслової, яка не може функціонувати як самостійна конструкція, однак перевіряється у випадку виявлення більш критичних розрахункових ситуацій.

У ході визначення критичної довжини мосту було виконано розрахунок по 11 варіантів для кожної конфігурації з однією понтонною опорою під прогоном складеної із трьох секцій. Зазначені розрахункові моделі розглядалися без урахування шарнірних з'єднань, які можуть бути додані при досягненні довжини руслової частини 250...300 м.

Створення розрахункових схем мосту НЖМ–56 було виконано за методикою, описаною раніше у роботі [7]. Розрахункові схеми для крайових варіантів самостійної роботи руслової частини наведено на рис. 1, а отримані результати подано у табл. 1. При цьому за довжину проїзної частини мосту прийнято відстань між зовнішніми гранями крайніх понтонів.

Порівняння варіантів здійснюється на основі аналізу максимальних значень ординат та однознакових площ ліній впливу згинальних моментів і нормальних зусиль, що виникають у балці проїзної частини. Згідно з даними табл. 1, найбільші значення розрахункових показників спостерігаються при довжинах проїзної частини 55,4 та 61,65 м. Оскільки результати для зазначених варіантів є близькими між собою, доцільним є зменшення кількості варіантів для подальших перевірок шляхом розгляду усередненого варіанта.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

У даному випадку найбільш наближеним до оптимального за мінімальним відхиленням отриманих показників є варіант із довжиною проїзної частини 67,9 м. Для цього варіанта спостерігаються такі відхилення від максимальних значень:

- за ординатами згинальних моментів – 2,1 %;
- за ординатами поздовжніх зусиль – 2,6 %;
- за однознаковими площами згинальних моментів – 1,3 %;

– за однознаковими площами поздовжніх зусиль – не більше 0,1 %.

Для нівелювання зазначених відхилень пропонується збільшити нормативне навантаження на величину середніх відхилень, які становлять:

- для ординат ліній впливу (під дією колісного та гусеничного навантаження) – на 2,4 %;
- для однознакових площ ліній впливу (під дією залізничного навантаження) – на 0,7 %.

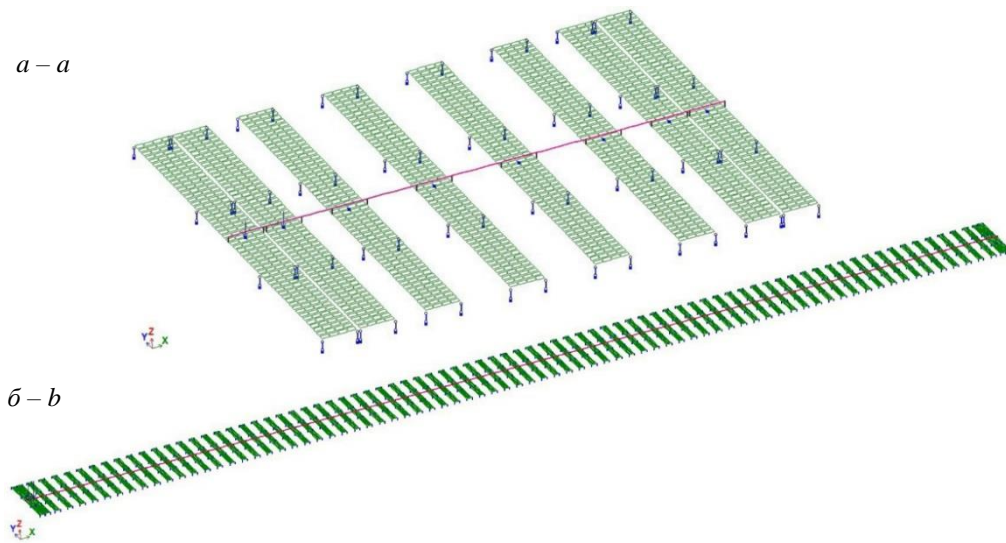


Рис. 1. Розрахункові моделі крайніх варіантів руслової частини за її довжинами:  
а – 36,65 м; б – 486,65 м

Fig. 1. Computational models of the extreme river-span variants according to their lengths:  
a – 36,65 m; b – 486,65 m

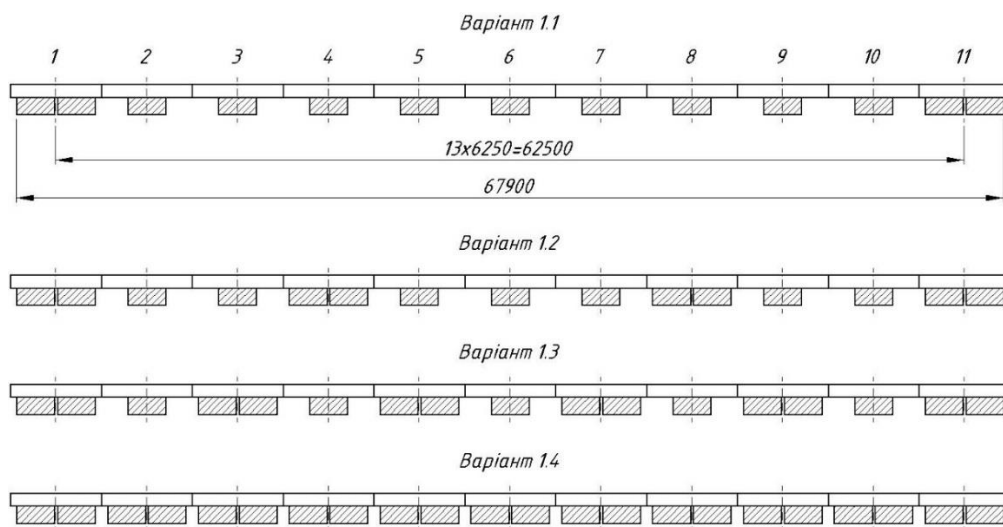


Рис. 2. Схеми руслової частини мосту з різною комбінацією розташування понтонних опор, мм

Fig. 2. Schemes of the river-span section of the bridge with different combinations of pontoon pier arrangement, mm

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В результаті максимальне зведене відхилення становитиме не більше 0,6 %, що може вважатися несуттєвим. У зв'язку з цим, варіант з довжиною 67,9 м доцільно прийняти для подальших основних розрахунків із використанням фінальних навантажень, наведених у табл. 2.

Наступним етапом дослідження є визначення впливу різної послідовності розташування понтонних опор, як показано на рис. 2. В окремих випадках на цьому етапі може не формуватися симетрична схема мосту. У зв'язку з чим допускається визначення іншого усередненого та універсального варіанта за умови, що виникаючі похибки не спотворюють результати роз-

рахунків. Для цього також можливе застосування підходу, аналогічного використаному при обґрунтуванні довжини 67,9 м. У підсумку для новоутворених варіантів із різним розташуванням понтонних опор необхідно також виконати обчислення параметрів ліній впливу.

Наступним етапом є обчислення варіантів із сумісною роботою руслової частини та перехідної частини мосту. Методика оцінювання впливу на кожну з частин є аналогічною до застосованої раніше для руслової частини мосту, що розглядалася як самостійна система. На рис. 3 наведено основні конфігурації розрахункових схем.

Таблиця 1

**Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду руслової частини мосту як самостійної системи**

Table 1

**Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the river-span bridge section considered as an independent system**

Довжина проїзної частини мосту, м	Кількість прогонів у руслової частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна одностороння площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом М					
36,65	6	5,036	–	53,406	–
49,15	8	5,744	+14,1	74,883	+40,2
55,40	9	5,797	+0,9	79,585	+6,3
61,65	10	5,790	–0,1	82,473	+3,6
67,90	11	5,678	–2,0	81,435	–1,3
74,15	12	5,567	–2,0	79,685	–2,2
111,65	18	5,485	–1,5	77,026	–3,3
149,15	24	5,485	0	77,570	+0,7
261,65	42	5,485	0	77,822	+0,3
374,15	60	5,485	0	77,823	>+0,1
486,65	78	5,485	0	77,823	0
За поздовжнім зусиллям N					
36,65	6	1,942	–	21,296	–
49,15	8	2,307	+18,8	30,834	+44,8
55,40	9	2,388	+3,5	33,836	+9,7
61,65	10	2,360	–1,2	34,276	+1,3
67,90	11	2,327	–1,4	34,262	>–0,1

Продовження табл. 1  
Continuation of Table 1

Довжина проїзної частини мосту, м	Кількість прогонів у русловій частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна одностороння площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
74,15	12	2,273	-2,3	33,212	-3,1
111,65	18	2,249	-1,1	32,223	-3,0
149,15	24	2,249	0	32,431	+0,7
261,65	42	2,249	0	33,129	+2,2
374,15	60	2,249	0	33,137	>+0,1
486,65	78	2,249	0	33,137	0

Таблиця 2

## Варіанти комбінації видів навантажень для руслової частини мосту

Table 2

## Load combination variants for the river-span section of the bridge

№ комбінації	Постійне навантаження	Тимчасове навантаження	
		Колісний транспорт	Розрахункове значення $\times 1,024$
1	Розрахункове значення	Колісний транспорт	Розрахункове значення $\times 1,024$
2		Гусеничний транспорт	Розрахункове значення $\times 1,024$
3		Залізничний транспорт	Розрахункове значення $\times 1,008$

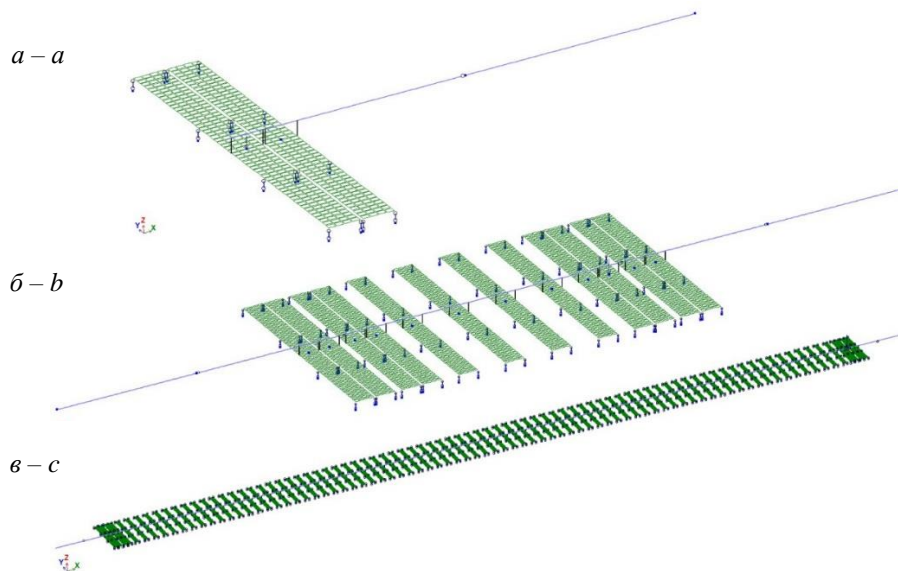


Рис. 3. Варіанти розрахункових моделей мосту за основними відмінностями: самостійна модель перехідної частини (а); модель сумісної руслової та перехідної частин мосту сумарною довжиною проїзної частини 114,10 м (б) та 564,10 м (в)

Fig. 3. Variants of computational bridge models according to the main differences: an independent model of the transition section (a); a combined model of the river-span and transition sections of the bridge with a total deck length of 114.10 m (b) and 564.10 m (c)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Результати для руслової та перехідної частин розглянуто незалежно та наведено відповідно у табл. 3 та 4. У табл. 3 додатково подано результати для перехідної частини, розглянутої як самостійна система (38,725 м).

За результатами, наведеними у табл. 3, максимальні значення розрахункових показників для перехідної частини конструкції спостерігаються у таких випадках: 1) при розгляді перехідної частини як самостійної системи (довжина 38,725 м); 2) при сумісній роботі з русловою частиною конструкції, за довжин руслової частини 49,15 та 486,65 м.

За результатами для руслової частини спостерігається тенденція до зростання нормальних зусиль зі збільшенням довжини проїзної частини. У зв'язку з чим конструкції, у яких довжина проїзної частини руслової секції перевищує 486,65 м, необхідно розглядати додатково.

Варіанти з довжинами 61,65 та 74,15 м є найближчими до варіанта з довжиною 67,9 м, який було прийнято при обчисленнях руслової частини як самостійної системи. Відхилення значень цих варіантів від значення варіанта з довжиною 67,9 м становлять:

– за ординатами згинального моменту – 0,2 %;

– за однознаковими площами згинального моменту – 0,9 %.

З огляду на незначні відхилення показників згинальних моментів, а також з метою оптимізації обсягів трудомістких розрахунків, варіант з довжиною 67,9 м допустимо розглядати під час перевірки сумісної роботи руслової та перехідної частин конструкції. Разом з тим, за показниками поздовжніх зусиль спостерігається суттєва різниця як для варіанта з довжиною 67,9 м, так і для варіанта з довжиною 49,15 м. Таким чином, за результатами перевірки сумісної роботи перехідної та руслової частин, до подальших розрахунків прийнято чотири варіанти мосту з довжинами руслової частини 36,65, 47,15, 67,9 та 486,65 м, а також окремий варіант самостійної перехідної частини довжиною 38,725 м.

Після визначення та обчислення параметрів ліній впливу здійснюється встановлення повного комплексу постійних і тимчасових навантажень. У даному розрахунку для НЖМ–56 розглядається навантаження від колісного транспорту класу MLC120, гусеничного транспорту MLC150, а також залізничне навантаження С10 (рис. 4).

Таблиця 3

**Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду перехідної частини мосту під час самостійної та сумісної роботи з русловою частиною**

Table 3

**Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the transition section of the bridge under independent action and combined action with the river-span section**

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у русловій частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом М						
38,725	–	–	9,448	–	112,849	–
114,10	36,65	6	6,980	–	174,760	–
120,35	42,90	7	7,026	+0,7	179,250	+2,6
126,60	49,15	8	7,031	+0,7	180,408	+0,7
132,85	55,40	9	7,025	> –0,1	179,238	–0,7
139,10	61,65	10	7,020	> –0,1	176,883	–1,3
145,35	67,90	11	7,017	> –0,1	174,295	–1,5

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження табл. 3  
Continuation of Table 3

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслової частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
151,60	74,15	12	7,015	> –0,1	173,187	–0,6
226,60	149,15	24	6,997	–0,3	172,552	–0,4
339,10	261,65	42	6,982	–0,2	170,542	–1,2
564,10	486,65	78	6,972	–0,1	169,085	–0,9
За поздовжнім зусиллям N						
38,725	–	–	11,834	–	98,845	–
114,10	36,65	6	6,110	–	157,179	–
120,35	42,90	7	6,492	+6,3	184,278	+17,2
126,60	49,15	8	6,650	+2,4	206,109	+11,9
132,85	55,40	9	6,785	+2,0	220,805	+7,1
139,10	61,65	10	6,913	+1,9	229,579	+4,0
145,35	67,90	11	7,005	+1,3	234,134	+2,0
151,60	74,15	12	7,076	+1,0	236,212	+0,9
226,60	149,15	24	7,573	+7,0	244,048	+3,3
339,10	261,65	42	7,877	+4,0	252,225	+3,4
564,10	486,65	78	8,087	+2,7	256,683	+1,8

Таблиця 4

**Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду перехідної частини мосту під час сумісної роботи з русловою частиною**

Table 4

**Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the bridge transition section under combined action with the river-span section**

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслової частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом M						
114,10	36,65	6	4,907	–	84,558	–
120,35	42,90	7	5,348	+9,0	95,670	+13,1
126,60	49,15	8	5,692	+6,4	107,502	+12,4
132,85	55,40	9	5,871	+3,2	117,258	+9,1

Продовження табл. 4  
Continuation of Table 4

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслової частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
139,10	61,65	10	5,930	+1,0	123,947	+5,7
145,35	67,90	11	5,926	>–0,1	127,946	+3,2
151,60	74,15	12	5,903	–0,4	129,127	+0,9
226,60	149,15	24	5,872	–0,5	123,339	–4,5
339,10	261,65	42	5,872	0	120,856	–2,0
564,10	486,65	78	5,872	0	119,022	–1,5
За позовжнім зусиллям N						
114,10	36,65	6	3,781	–	96,515	–
120,35	42,90	7	3,604	–4,7	94,792	–1,8
126,60	49,15	8	3,529	–2,1	91,469	–3,5
132,85	55,40	9	3,509	–0,6	86,852	–5,1
139,10	61,65	10	3,509	0	81,511	–6,2
145,35	67,90	11	3,510	>0,1	76,025	–6,7
151,60	74,15	12	3,507	>–0,1	74,205	–2,4
226,60	149,15	24	3,379	–3,7	86,513	+16,6
339,10	261,65	42	3,296	–2,5	95,052	+9,9
564,10	486,65	78	3,239	–1,7	99,751	+4,9

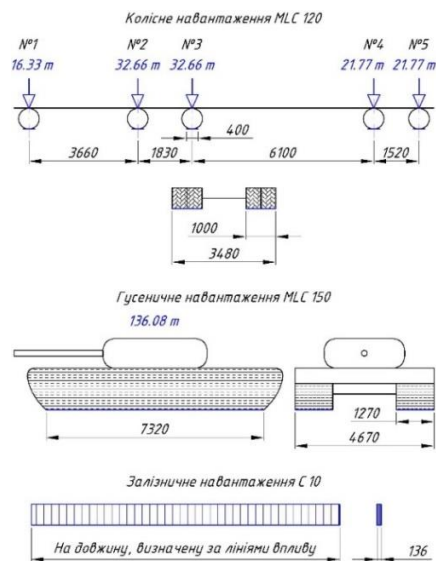


Рис. 4. Розрахункові моделі транспортних засобів

Fig. 4. Computational models of vehicles

Види та величини постійних і тимчасових навантажень подано відповідно у табл. 5 та 6.

Навантаження від сучасних поширених моделей локомотивів і піввагонів, як правило, не перевищує 7,5 т/п. м [9]. Водночас, відповідно до [3], характеристичне тимчасове вертикальне навантаження від рухомого складу залізниць класу СК для мостів, які розглядаються як тимчасові, становить С10 – 10 т/п. м. Тимчасове вертикальне навантаження від порожнього рухомого складу приймається на рівні 1,4 тс/м колії [4].

Коефіцієнт надійності за навантаженням для постійних навантажень прийнято відповідно до норм [3] як для суміщених мостів, він становить  $\gamma_f = 1,25$ . Коефіцієнти надійності та динамічності для колісного навантаження за класифікацією MLC прийнято відповідно до методики, визначеної для екіпажу НК згідно з [3].

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Гусенична модель навантаження в актуальних вітчизняних будівельних нормах відсутня. Однак з огляду на перевищення маси гусеничної моделі максимального значення колісної моделі НК–100 її прийнято з аналогічними правилами прикладання до споруди та з використанням відповідних коефіцієнтів за навантаженням.

Визначення коефіцієнтів для залізничного навантаження базується на довжині завантаження лінії впливу, яка залежить від довжини мосту. Оскільки розрахункові моделі мають

різну довжину, для спрощення прийнято середнє значення коефіцієнта  $\gamma_f = 1,15$ , що відповідає довжині завантаження  $\lambda = 50$  м. Для цієї ж довжини визначено коефіцієнт динамічності  $1+\mu$ .

Після визначення критичних місць розташування навантаження, виконується розстановка моделей колісного, гусеничного та залізничного транспорту. Окрім цього, варто звернути увагу на можливі додаткові зони прикладення тимчасового навантаження, які можуть впливати на оцінку просідання понтонних опор і не охоплюються методом аналізу ліній впливу.

Таблиця 5

## Нормативні та розрахункові значення постійних навантажень

Table 5

## Characteristic and design values of permanent loads

Елемент	Нормативне значення, т	Коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_f$	Розрахункове значення, т
Балки центрального прогону	7,02	1,25	8,78
Ребра, косинки, накладки центрального прогону	2,40		3,00
Настил центрального прогону	3,05		3,81
Прогін бокових проїздів	1,52		1,90
Носова секція понтона	4,00		5,00
Середня секція понтона	3,70		4,625
Кормова секція понтона	4,10		5,125

Таблиця 6

## Нормативні та розрахункові значення тимчасових навантажень

Table 6

## Characteristic and design values of temporary loads

Модель навантаження	Нормативне значення	Коефіцієнти надійності та динамічності	Розрахункове значення
Для всіх моделей, окрім моделей руслової частини як самостійної системи			
Колісне	Вісь 1	16,33 т	16,33 т
	Вісь 2	32,66 т	
	Вісь 3	32,66 т	
	Вісь 4	21,77 т	
	Вісь 5	21,77 т	
Гусеничне	–	136,08 т	136,08 т

Продовження табл. 6  
Continuation of Table 6

Модель навантаження		Нормативне значення	Коефіцієнти надійності, динамічності та інше	Розрахункове значення
Для всіх моделей, окрім моделей руслової частини як самостійної системи				
Залізничне	Повне завантаження	10,0 т/п м	$\gamma_f = 1,15;$ $1+\mu=1+\frac{14}{30+\lambda} \geq 1.15$	12,0 т/п м
	Порожній склад	1,4 т/п м	$\gamma_f = 1,0$	1,4 т/п м
Для моделей руслової частини як самостійної системи				
Колісне	Вісь 1	16,33 т × 1,024* =16,72 т	$\gamma_f = 1,0;$ $1+\mu=1$	16,72 т
	Вісь 2	32,66 т × 1,024* =33,44 т		33,44 т
	Вісь 3	32,66 т × 1,024* =33,44 т		33,44 т
	Вісь 4	21,77 т × 1,024* =22,29 т		22,29 т
	Вісь 5	21,77 т × 1,024* =22,29 т		22,29 т
Гусеничне	–	136,08 т × 1,024* =139,35 т	–	139,35 т
Залізничне	Повне завантаження	10,0 т/п м × 1,008* =10,08 т/п м	$\gamma_f = 1,15;$ $1+\mu=1+\frac{14}{30+\lambda} \geq 1.15$	12,1 т/п м
	Порожній склад	1,4 т/п м, × 1,008* = 1,41 т/п м	$\gamma_f = 1,0$	1,41 т/п м

\*Додатковий множник, визначений у табл. 2.

Розташування колісного та гусеничного навантаження на мосту встановлюється відповідно до положення максимальних ординат ліній впливу. Для залізничного навантаження критичні положення визначаються за максимальним сумарним значенням площ ліній впливу однознакових ділянок. На рис. 5 наведено приклад встановлення навантажень на критичних ділянках на основі ліній впливу.

На рис. 6 показано один із результатів розташування різних моделей навантаження на

критичних ділянках на прикладі варіанта 1.1. Навантаження № 8 та № 9, а відповідають випадкам додаткових перевірок, призначених для визначення максимальної просадки мосту, як було зазначено вище.

Додатково у табл. 7 наведено вплив порядку розташування понтонів у варіантах 1.1–1.4 на максимальні ординати ліній впливу в балках проїзної частини. У даному випадку найбільші значення параметрів ліній впливу спостерігаються при найбільшій кількості понтонів.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

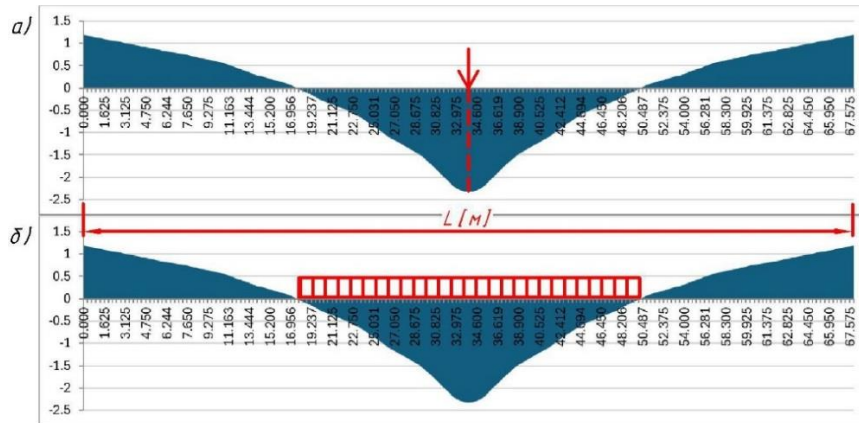


Рис. 5. Приклад завантаження ліній впливу зусилля  $N$  у балках проїзду варіанту 1,1 руслової частини мосту зосередженим (а) та розподіленим (б) навантаженням

Fig. 5. Example of loading the influence line of axial force  $N$  in the deck beams of variant 1.1 of the river-span section of the bridge with concentrated (a) and distributed (b) loads

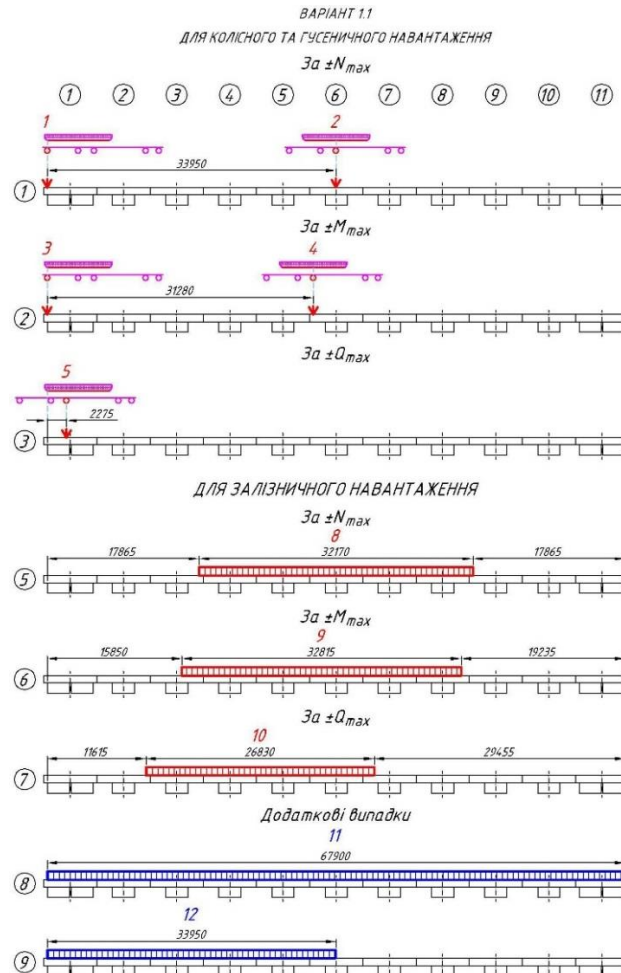


Рис. 6. Критичне та додаткове розташування моделей тимчасового навантаження для варіанта мосту 1,1, мм

Fig. 6. Critical and additional positions of variable load models for bridge variant 1.1, mm

**Максимальні ординати ліній впливу зусиль в балках проїзду  
варіантів руслової частини мосту**

Table 7

**Maximum ordinates of influence lines for internal forces  
in the deck beams of the river–span bridge variants**

№ варіанту	Ордината				Площа			
	$-N_{\max}$	$+N_{\max}$	$-M_{\max}$	$+M_{\max}$	$-N_{\max}$	$+N_{\max}$	$-M_{\max}$	$+M_{\max}$
1	2,327	2,170	4,798	5,678	34,262	22,729	50,227	81,435
2	2,309	2,390	5,349	5,609	34,570	26,315	58,557	80,848
3	2,327	2,631	5,887	5,622	33,695	30,188	67,331	78,048
4	2,617	3,145	7,062	6,277	40,025	39,094	87,999	91,771

У результаті визначені критичні місця та моделі завантаження дають змогу встановити діючі зусилля та напруження в балках проїзду або перенести навантаження на більш складні та точні розрахункові моделі, що забезпечує економію часу обчислень.

**Наукова новизна та практична  
значимість**

Наукова новизна роботи полягає в отриманні нових результатів на основі уточненої методики та підходів до визначення вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) мостів, які застосовуються для подолання водних перешкод в умовах бойових дій та інших кризових ситуацій. З урахуванням відсутності діючої методики перерахунку вантажопідйомності інвентарних наплавних мостових систем визначено та обґрунтовано основні етапи оцінювання несучої здатності конструкції за допомогою ліній впливу зусиль та методу скінчених елементів.

Визначено критичні довжини руслової та перехідної частин мосту як при їх спільній роботі, так і при самостійній роботі, які доцільно включати до розрахункової схеми під час проведення досліджень. Отримано та проаналізовано результати максимальних ординат ліній впливу зусиль  $N$  та  $M$  у балках проїзду руслової частини мосту для чотирьох варіантів влаштування понтонних опор. Визначено критичні та додаткові розташування моделей тимчасового колісного, гусеничного та залізничного наванта-

тажень для варіанта наплавного мосту. Наведено приклади завантаження ліній впливу зусилля  $N$  у балках проїзду варіанта мосту руслової частини зосередженим та розподіленим навантаженням. Визначено нормативні та розрахункові значення постійних і тимчасових навантажень.

Практична значимість роботи визначається можливістю використання отриманих результатів для визначення вантажопідйомності наплавного мосту НЖМ–56. Наведені максимальні ординати та однознакові площі ліній впливу можуть бути використані для руслової та перехідної частин мосту під час складання й вибору схеми мосту для подолання водної перешкоди.

**Висновки**

1. Запропонована методика включає в себе основні етапи для дослідження наплавної (понтонної) системи мосту, яку можна застосовувати для вибору схеми подолання водної перешкоди та визначення її вантажопідйомності. Вона дозволяє обґрунтовано визначати довжини руслової та перехідної частин мосту, а також варіант влаштування понтонних опор у розрахунковій схемі понтонного мосту.

2. Досліджено особливості конструкції наплавної системи мосту НЖМ–56, основні частини, можливі варіанти влаштування понтонних опор, варіанти розміщення тимчасових рухомих колісних, гусеничних та залізничних навантажень.

3. Застосування сучасного програмного забезпечення, що реалізує метод скінчених еле-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ментів, дозволяє відтворити роботу наплавного мосту та отримати значення напружено-деформованого стану, що забезпечує об'єктивне визначення вантажопідйомності мосту.

4. Застосування методики визначення ліній впливу дає змогу спростити перевірку балок проїзної частини аналітичним методом або перенести критичні положення транспортних навантажень у задані місця з метою прискорення

обчислень детальних, але ресурсоємних моделей мосту.

5. Отримані результати дозволяють забезпечити безпечний пропуск сучасного колісного, гусеничного та залізничних навантажень по інвентарній конструкції наплавного залізничного мосту НЖМ–56, яка запроєктована за старими нормами по навантаженню.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гернич М. В., Ключник С. В. Використання майна наплавного мосту НЖМ–56 зважаючи на виклики військового сьогодення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 22. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185>
2. ГСТУ 32.6.03.111-2002. *Експлуатація залізничних мостів. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів*. [Чинний 2002-04-01]. Київ : Мінтранс України, 2002. 382 с.
3. ДБН В.1.2-15:2009. *Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби*. [Чинний від 2010-03-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
4. ДБН В.2.3-19:2025. *Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування*. [Чинний від 2026-01-01]. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад та територій України, 2025. 127 с.
5. МР В.2.3-37641918-921:2021. *Методичні рекомендації з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів*. [Чинний від 2021-12-03]. Київ : ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури», 2021. 48 с.
6. МР В.2.3-37641918-940:2024. *Методичні рекомендації щодо проектування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів*. [Чинний 2025-01-03]. Київ : ДП «НІРІ», 2025. 58 с.
7. Перепелиця К. М., Ключник С. В. Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодовантажопідйомності. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2(110). С. 154–164. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332774>
8. Телов В. И., Коблов И. Т., Тараканов И. Н., Новиков Г. И. *Наплавной железнодорожный мост НЖМ–56*. Главное управление железнодорожных войск. Москва : Воениздат, 1977. 344 с.
9. ЦП-0093. *Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних мостах*. Наказ Укрзалізниці № 354-Ц від 10.06.2002 р. Головне управління колійного господарства Укрзалізниці, 2002. 301 с.
10. Chmielewski R., Piechota M., Bawiec B. Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert*. 2020. No. 11. P. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04>
11. *Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles* (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5). Brussels : NATO Standardization Office, 2017. 6 p.

К. М. PEREPELYTSIA<sup>1\*</sup>, D. S. SPIVAK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Fac. of Military Training of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DHT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 738 54 25, e-mail kirill\_perpelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237

<sup>2</sup>Research Center of the State Special Transport Services, Ukraine, tel. +38 (099) 200 07 64, e-mail d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

## Methodology for Evaluating the Load-Carrying Capacity of Standardized Pontoon Bridge Structures

**Purpose.** The objective of this study is to develop approaches for the objective investigation of the inventory structure of the NZhM–56 floating railway bridge. It involves selecting a computational model for the floating bridge to facilitate further substantiated research into load-carrying capacity and formulating recommendations

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

for the deployment of NZhM–56 equipment to accommodate railway, vehicular, and tracked loads. **Methodology.** Variational modeling of NZhM–56 floating (pontoon) bridges using diverse configurations (varying in length and number of pontoon supports) for analysis via the influence line method. Analysis of the obtained results and substantiation of the bridge crossing computational model proposed for further research. Application of software implementing the Finite Element Method (FEM) to conduct the investigations. **Findings.** Development of approaches for recalculating the load-carrying capacity of inventory floating (pontoon) bridge systems using the finite element method. The study identifies the specific length and assembly configuration of the NZhM–56 floating bridge that exerts the greatest impact on internal forces generated under live loads. This configuration is selected for further research and for providing substantiated recommendations regarding live load passage. Furthermore, the most critical (unfavorable) scenarios and positions for live load placement have been proposed to investigate the stress-strain state of the structure. **Originality.** The scientific significance of this work lies in the selection of a methodology for recalculating the load-carrying capacity of floating (pontoon) bridge systems, specifically focusing on the NZhM–56 bridge. A comprehensive investigation is conducted into the relationship between the critical length, the assembly configuration of the NZhM–56 bridge, and the magnitude of internal forces generated under live loads. Furthermore, the research focuses on the specific behavior of the transition section of the pontoon bridge, analyzed both as an independent subsystem and in its structural interaction with the river (main) span elements. **Practical value.** Definition of approaches and methodologies for recalculating the load-carrying capacity of inventory floating (pontoon) bridge systems, necessitated by contemporary challenges. The research is aimed at ensuring the safe passage of temporary railway, tracked, and wheeled loads over the NZhM–56 floating bridge. Furthermore, the study identifies specific features of investigating floating bridge systems through the application of software implementing the Finite Element Method (FEM).

**Keywords:** floating (pontoon) bridges; critical length; assembly scheme; overcoming water obstacles; transport infrastructure functioning; Influence line method; variational modeling of floating systems; Finite Element Method (FEM)

## REFERENCES

- Hernich, M. V., & Kliuchnyk, S. V. (2022). Use of property of floating bridge NZHM-56 considering today's military challenges. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 22, 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185> (in Ukrainian)
- Ekspluatatsiia zaliznychnykh mostiv. Pravyla vyznachennia vantazhopydionnosti metalevykh prohonovykh budov zaliznychnykh mostiv*, 382 HSTU 32.6.03.111-2002. (2002). (in Ukrainian)
- Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby*, 83 DBN V.1.2-15:2009. (2009). (in Ukrainian)
- Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia*, 127 DBN V.2.3-19:2025. (2025). (in Ukrainian)
- Metodychni rekomendatsii z vyznachennia vantazhopydionnosti avtodorozhnykh mostiv*, 48 MR V.2.3-37641918-921:2021. (2021). (in Ukrainian)
- Metodychni rekomendatsii shchodo proiektuvannia ta vlashtuvannia tymchasovykh avtomobilnykh dorih i mostiv*, 58 MR V.2.3-37641918-940:2024. (2025). (in Ukrainian)
- Perepelytsia, K. M., & Kliuchnyk, S. V. (2025). Research of Pontoon Bridge Elements in View of Modern Challenges in Terms of Load Capacity. *Science and Transport Progress*, 2(110), 154-164. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332774> (in Ukrainian).
- Telov, V. Y., Koblov, Y. T., Tarakanov, Y. N., & Novykov, H. Y. (1977). *Naplavnoi zheleznodorozhnyi most NZhM–56*. Moscow, Russia: Voennydat (in Russian)
- Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh mostakh*, 301 TsP-0093. (2002). (in Ukrainian)
- Chmielewski, R., Piechota, M., & Bawiec, B. (2020). Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert*, 1, 24-34. DOI: <https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04> (in English)
- Military load classification of bridges, ferries, rafts and vehicles (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5)*. (2017). Brussels: NATO Standardization Office (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2025

Рекомендовано до публікації: 21.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026