

УДК 624.87:624.042-047.37

К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ^{1*}, С. В. КЛЮЧНИК²

^{1*}Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 738 54 25, ел. пошта kirill_perepelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодо вантажопідйомності

Мета. Основною метою цієї роботи є: дослідження сучасних вимог до наплавних засобів із подолання водних перешкод; адаптація нормативного гусеничного навантаження до стандарту динамічних ефектів гусеничних та колісних військових навантажень країн НАТО; моделювання елементів понтонного мосту НЖМ–56 за допомогою програмного забезпечення для дослідження його під дією сучасного навантаження; дослідження напружено-деформованого стану елементів мосту для встановлення його вантажопідйомності. **Методика.** У роботі проаналізовано сучасні вимоги за вантажопідйомністю до понтонних систем з огляду на виклики сьогодення, із використанням досвіду країн НАТО з військової класифікації вантажопідйомності штучних споруд. Визначено внутрішні зусилля в елементах понтонного мосту під дією сучасного рухомого навантаження за методом ліній впливу. Застосовано програмне забезпечення, що реалізує метод скінченних елементів, для дослідження понтонного мосту. **Результати.** Досліджено вимоги сучасного стандарту країн НАТО щодо військових навантажень. Проведено адаптивний перерахунок моделі гусеничного навантаження, під пропуск якого була спроектована конструкція до тієї, що відповідає стандарту військових навантажень країн НАТО. Отримано результати внутрішніх зусиль у балках прогонової будови мосту. **Наукова новизна.** Відтворено елементи моделі понтонного мосту, який застосовують для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії РФ, за допомогою програмного забезпечення, що дозволяє дослідити роботу понтонної системи (наявного ресурсу), а установити реальну вантажопідйомність мосту з урахуванням вимог стандарту країн НАТО за навантаженням. Адаптовано вітчизняне гусеничне навантаження до вимог країн НАТО за класифікацією військових транспортних засобів. **Практична значимість.** Установлення вантажопідйомності елементів понтонного мосту дасть змогу раціонально використовувати наявний ресурс, здійснювати пропуск сучасного навантаження відповідно до викликів сьогодення, а також оптимізувати та модернізувати конструкції мосту. Визначення відповідності класифікації вітчизняного навантаження вимогам країн НАТО допомагає забезпечити пропуск наявної техніки по штучних спорудах, класифікованих за сучасними стандартами.

Ключові слова: наплавні (понтонні) мости; вантажопідйомність; подолання водних перешкод; функціонування транспортної інфраструктури; Military Load Classification (MLC); метод ліній впливу; моделювання наплавних систем; метод скінченних елементів

Вступ

Унаслідок повномасштабної збройної агресії зс РФ проти України зруйновано велику кількість штучних споруд, які входять до складу транспортної системи, деякі з них уже відновлені підрозділами сил безпеки й оборони України та продовжують функціонувати [6]. Пошкоджені об'єкти на деокупованій території підлягають відбудові, але виконання робіт у районах, де рівень небезпеки з боку ворога не спадає, є недо-

цільним. Для відновлення транспортного сполучення застосовують понтонні системи, наведення дублювальних мостів під час технічного прикриття важливих об'єктів національної транспортної інфраструктури [4], що також є актуальним способом подолання водних перешкод в умовах війни [9] та інших кризових ситуаціях [10].

Сучасні вимоги до понтонних систем за вантажопідйомністю продиктовані потребою сьогодення щодо пропуску вітчизняної, а також наданої іноземними партнерами військової техніки

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

підвищеної маси з необхідністю забезпечити її мобільність в умовах бойових дій.

Інженерні та понтонно-мостові підрозділи мають на озброєнні штатні засоби для подолання водних перешкод, після повномасштабного вторгнення зс рф їх чисельність була доповнена засобами, наданими надані країнами-партнерами [1], а також наплавними системами, використаними військами ворога та залишеними на території України під час відступу (трофейні мости). [7]. Рациональне та надійне застосування цих засобів для подолання водних перешкод можливе за умови ретельного дослідження їх технічного стану та вантажопідйомності, на основі яких можна отримати реальні рекомендації із врахуванням потреби в пропуску заданого навантаження на визначеній ділянці.

У чинному нормативному документі [5] не встановлено моделі тимчасового гусеничного навантаження для розрахунку елементів мостових конструкцій. Практичний досвід і нагальна необхідність із пропуску через мости сучасної гусеничної військової техніки вказують на важливість специфіки такого виду тимчасового навантаження та перспективне зростання його маси. Останнім документом, який визначає особливості гусеничного навантаження, є СНиП 2.05.03–84 (Мости та труби), але сьогодні він нечинний. Ним встановлене максимальне нормативне гусеничне навантаження НГ–60, прийняте за моделлю (рис. 1).

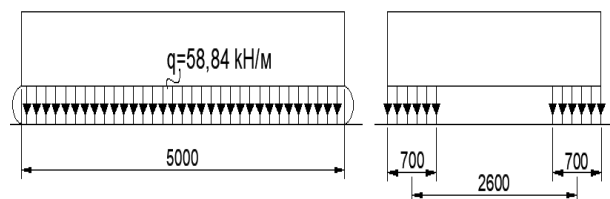


Рис. 1. Гусеничне навантаження НГ–60

Fig. 1. Tracked loader NG-60

У країнах-членах НАТО запроваджена військова класифікація вантажопідйомності [12], що поділяє одиниці військової техніки на класи, номери яких відповідають фактичній вазі із урахуванням лінійних розмірів бази автомобіля, а також його ширини і висоти.

Встановити значення вантажопідйомності понтонної системи, а також надати рекомендації щодо організації пропуску навантаження по ній

можна за допомогою методу ліній впливу із застосуванням еквівалентного навантаження, а також за допомогою імітаційного моделювання з використанням програмного забезпечення, що реалізує метод скінченних елементів.

Мета

Основною метою цієї статті є: визначення внутрішніх зусиль у головних балках прогонової будови для встановлення вантажопідйомності понтонного мосту наявного матеріального ресурсу, який використовують для подолання водних перешкод в умовах війни та для забезпечення логістичного зв'язку; аналіз тимчасового нормативного навантаження, що актуально для застосування під час проведення розрахунку вантажопідйомності елементів понтонного мосту; вивчення класифікації військової техніки за вантажопідйомністю, яку використовують в країнах членах НАТО, а також проведення перерахунку моделі вітчизняного навантаження на модель класу MLC зі встановленням її адаптованого значення.

Методика

Із початком повномасштабного вторгнення зс рф в Україну інженерні підрозділи організували переправи через водні перешкоди для забезпечення діяльності сил безпеки та оборони в наданні відсічі збройній агресії та підтриманні логістичного зв'язку країни. Більшість наявних засобів для подолання водних перешкод, які використовують сьогодні, спроектовані в середині минулого століття згідно з нормами за навантаженням, що діяли на той час. З урахуванням реального досвіду застосування понтонних систем мостів, наведених за викликами сьогодення, та нетипових схем збирання [2] слід зазначити, що умови війни спричинили потребу в забезпеченні підвищеної пропускної спроможності та вантажопідйомності під час подолання водних перешкод підрозділами. Це потребує встановлення та наукового обґрунтування реального значення вантажопідйомності штатних засобів для подолання водних перешкод.

Використовувана в країнах-членах НАТО військова класифікація навантаження мостів, промів, плотів та транспортних засобів визначена, стандартизована та описана в [12]. Цим докуме-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нтом встановлено 32 стандартні класи (16 гусеничних і 16 колісних транспортних засобів) для використання в проєктуванні, випробуванні та застосуванні військових мостів. Числове значення, яке відображає вантажопідйомність мосту та відповідність транспортного засобу MLC, містить значення маси транспортного засобу з урахуванням його геометрії (довжини і ширини), його використовують для оцінки здатності військового транспортного засобу переходити через штучну споруду як засіб для подолання перешкоди безпечно та без її пошкодження. Цей нормативний документ дозволяє керівнику під час планування переміщення особового складу організувати раціональне використання наявних засобів для подолання перешкод, де це необхідно, та надати вказівки щодо порядку проведення необхідної передислокації.

Загальну процедуру випробувань штучних споруд у країнах-членах НАТО проводять для встановлення їх вантажопідйомності за [11] (Тристоронній кодекс проєктування та випробування військового мостового обладнання). Випробування на міцність (рис. 2) проводять із перевантаженням на 30 та 50 % від нормативного робочого навантаження, а також випробовують на необхідну кількість переїздів (рис. 3).



Рис. 2. Випробування на міцність елементів мосту

Fig. 2. Strength testing of bridge elements



Рис. 3. Випробування мосту на циклічність

Fig. 3. Cycling test of the bridge

Порядок розрахунку значення MLC військового транспортного засобу наведено в стандарті [12], відповідно до якого початковим етапом є розрахунок згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що створює транспортний засіб у прогонах від 1 до 100 м. Наступним етапом є визначення приблизного значення MLC шляхом лінійної інтерполяції між кривими одиничного згинального моменту (рис. 4) гіпотетичних транспортних засобів у точці, яка дає найбільше значення MLC.

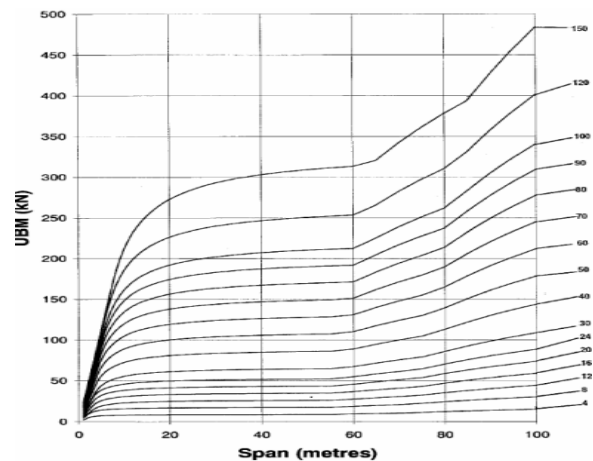


Рис. 4. Графік залежності одиничних згинальних моментів (вісь Y) у прогонах від 1 до 100 м (вісь X) для отримання значення MLC

Fig. 4. Graph of the dependence of unit bending moments (Y-axis) in runs from 1 to 100 m (X-axis) to obtain the MLC value

Якщо значення MLC для військового транспортного засобу включає в себе не лише його вагу, а й геометричні розміри, то слід порівняти

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

фактичну ширину транспортного засобу з шириною гіпотетичного транспортного засобу, чий MLC найближчий, та за необхідності застосувати коефіцієнт корекції розміру транспортного засобу за допомогою графіка корекції ширини (рис. 5), нахил лінії на графіку 6/25,4 (6 % = 25,4 см).

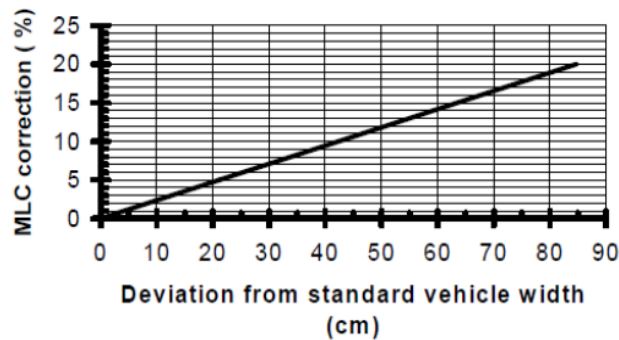


Рис. 5. Графік корекції ширини транспортного засобу

Fig. 5. Graph of vehicle width correction

Результати

Для отримання адаптованого значення MLC моделі транспортного засобу, що відображає гусеничну модель максимального гусеничного навантаження НГ–60 за вітчизняними нормами (рис. 1), необхідно провести розрахунок за описаною методикою відповідно до стандарту [12].

Отримати значення згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що виникає від моделі гусеничного навантаження НГ–60, запропоновано з дослідження розрахункової схеми річкової частини (вивідний паром) наплавного залізничного мосту НЖМ–56 довжиною 37,5 м, який складається із шести секцій металевих прогонових будов автомобільного проїзду на плавних опорах (рис. 6).

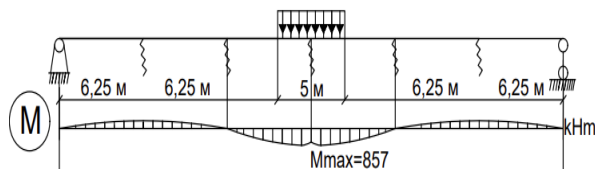


Рис. 6. Розрахункова схема прогонової будови автомобільного проїзду наплавного мосту НЖМ–56

Fig. 6. Design scheme of the roadway span structure of the NZhM-56 pontoon bridge

З аналізу вигляду епюри згинального моменту та максимального його значення слід зробити висновок, що сприйняття та розподіл тимчасового навантаження відбувається в тому числі за рахунок пружної роботи плавних опор, отже, отримане значення максимального згинального моменту не актуальне для визначення значення MLC транспортного засобу порівняно з класичною прогоновою будовою на двох статичних опорах. Для отримання значення згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що виникає від моделі гусеничного навантаження НГ–60, обираємо розрахункову схему прогону наявних на довготривалому зберіганні та часто вживаних для відновлення транспортних об'єктів прогонових будов, що виготовлені зі зварних широкополічних двотаврових балок довжиною 18,53 м [3] (рис. 7).

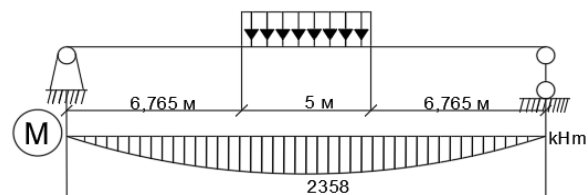


Рис. 7. Розрахункова схема прогонової будови, виготовленої зі зварних широкополічних двотаврових балок

Fig. 7. Design diagram of a span structure made of welded wide-beam double-tab beams

Із значення згинального моменту $M = 2\,358 \text{ kN}\cdot\text{m}$, що виникає в прогоні довжиною 18,53 м від тимчасового навантаження НГ–60 (рівномірно розподіленої сили $q = 117,72 \text{ kN/m}$), отримуємо одиничний момент, що дорівнює 127,25 кН. За допомогою графіка залежності (рис. 4) встановлюємо приблизне значення MLC шляхом лінійної інтерполяції між кривими одиничного згинального моменту. Значення MLC гіпотетичного транспортного засобу перебуває в межах між MLC 60 та MLC 70, характеристики яких відповідно до [12] зазначено на рис. 8. Значення одиничних згинальних моментів згідно з рис. 4 для MLC 60 становить 115 кН, для MLC 70 – 135,5 кН.

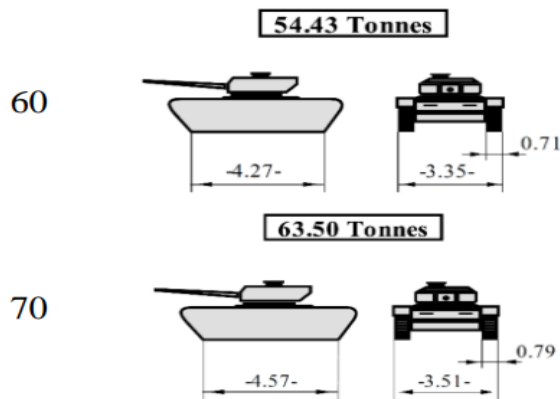


Рис. 8. Геометричні та вагові характеристики MLC 60 та MLC 70

Fig. 8. Geometric and weight characteristics of the MLC 60 and MLC 70

Для встановлення остаточного значення MLC сформуємо таке рівняння:

$$\frac{135,5 - 115}{70 - 60} = \frac{127,25 - 115}{MLC - 60};$$

$$(135 - 115)(MLC - 60) = (127,25 - 115)(70 - 60);$$

$$MLC \approx 66.$$

На основі відомих значень ширини транспортних засобів MLC 60 та MLC 70 встановлюємо, що ширина MLC 64 становить 3,45 м, а ширина гіпотетичного транспортного засобу становить 3,3 м. Для отримання остаточного значення необхідно застосувати коефіцієнт корекції розміру транспортного засобу (рис. 5):

$$k = 1 + \left[\frac{6\%}{25,4 \text{ см}} \times \frac{100 \text{ см}}{1 \text{ м}} \times (3,45 \text{ м} - 3,3 \text{ м}) \times \frac{1}{100\%} \right] = 1,0345.$$

Отже, модель вітчизняного гусеничного навантаження НГ-60 відповідає значенню MLC гіпотетичного транспортного засобу із урахуванням коефіцієнта корекції розміру ТЗ становить MLC 68 (рис. 9).

Сьогодні для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії важливу роль відіграють наявні вітчизняні наплавні системи мостів, проте під час їх застосування необхідно зважати на виклики за вантажопідйомністю мостів, пов'язані з наданням сучасної військової техніки країнами-партнерами, яку класифікують за стандартами НАТО.

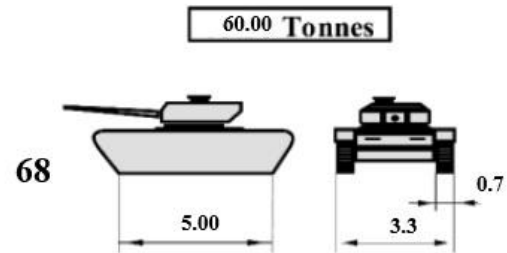


Рис. 9. Геометричні та вагові характеристики гіпотетичного транспортного засобу MLC 68

Fig. 9. Geometric and weight characteristics of the MLC 68 hy-potential vehicle

Для проведення аналізу на міцність переправи елементів наплавного мосту НЖМ-56 створимо модель руслової частини автодорожнього наплавного мосту в комплексі ЛІРА (рис. 10).

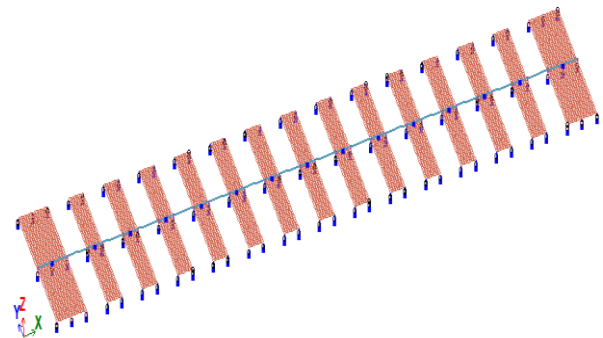


Рис. 10. Модель руслової частини наплавного мосту НЖМ-56

Fig. 10. Model of the channel part of the NZhM-56 pontoon bridge

Модель наплавного мосту довжиною 106,25 м відповідно до технічної документації [8] становлять 4 двотаврові балки № 36, що виготовлені зі сталі М16С автодорожнього проїзду, представлені нерозрізною системою та задані стрижнями однією лінією вздовж мосту. Приєднання балок виконано стрижнями в місцях згідно з технічною документацією [8]. Прикріплення виконує тільки функцію передачі навантаження та має велику жорсткість 1 000 ГПа із поперечним розміром 10×10 см (рис. 11).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

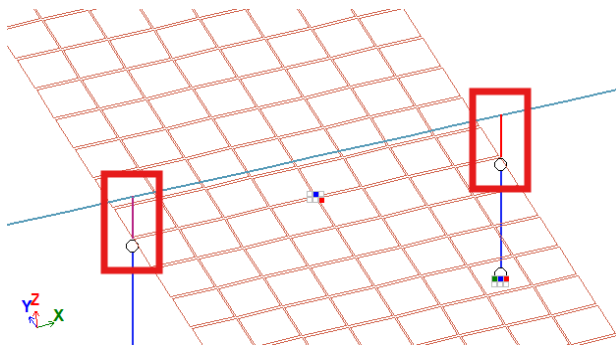


Рис. 11. Прикріплення балок до понтонів

Fig. 11. Attaching beams to pontoons

Понтонна опора складається з кормових і середніх секцій. Секції виконано з пластинчастих елементів висотою 135 см. Модуль деформації перерізу призначено як для сталі, що не враховує порожній простір всередині них. У такому випадку жорсткість понтонів завищена, але дозволяє в деякій мірі компенсувати завищене продавлювання в зоні прикріплення балок через те, що фактично 4 балки прогонової будови розподілені в перерізі мосту рівномірно та не передають тиск в одну й ту саму точку.

Виконано закріплення кожної секції понтонної опори в їхніх центрах уздовж осі Y мосту та додатково заборонене переміщення вздовж осі X у центральній понтонній опорі мосту (рис. 12). Це дозволяє стабілізувати модель для коректного завершення розрахунку.

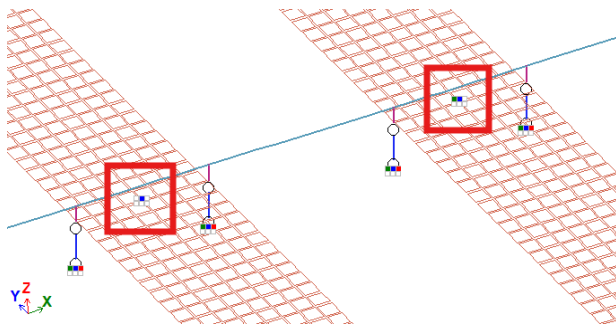


Рис. 12. Просторове закріплення понтонних опор мосту

Fig. 12. Spatial anchoring of the bridge piers

Імітацію плавучості понтонних опор підтверджено та реалізовано за допомогою спираючись на стрижні (рис. 13). Перевірку моделі виконано на основі порівняння результатів осідання під час натурних випробувань однієї понтонної опори

згідно з технічною документацією [8] із моделлю ЛПА. Осідання середньої секції понтонної опори за технічною документацією становить 16 см, за результатами моделі ЛПА було отримано результат 15,8 см. Відхилення складає 1,25 % та повністю збігається з результатом у 15,8 см (рис. 14), отриманим у дослідженні [7].

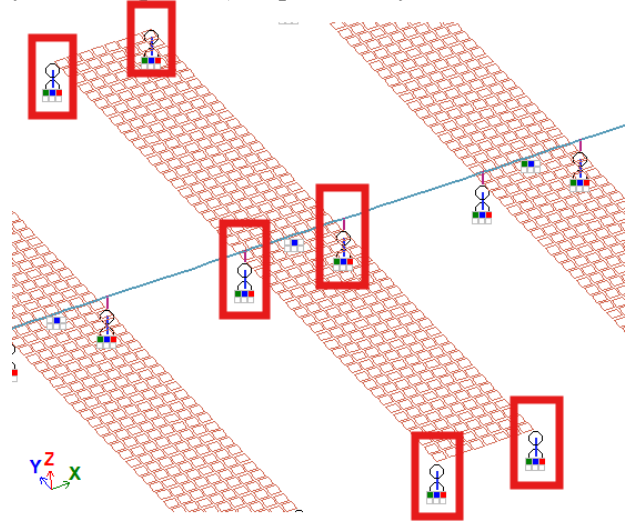


Рис. 13. Прикріплення понтонів до стрижнів, що імітують плавучість моделі

Fig. 13. Attaching pontoons to rods that simulate model buoyancy

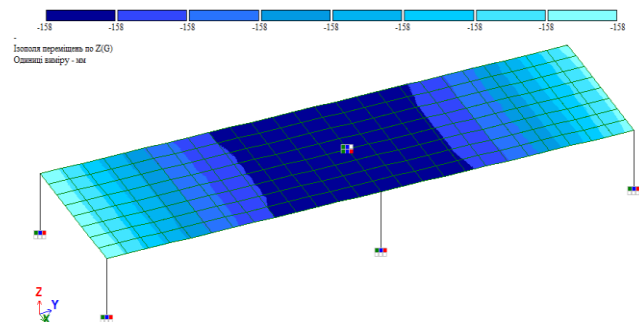


Рис. 14. Результати осідання середньої секції понтонної опори

Fig. 14. Settlement results of the middle section of the pontoon support

Ключовими факторами в налаштуванні правильної роботи стрижнів, що імітують плавучість опор, виступають висота стрижня, модуль пружності та розмір поперечного перерізу. Висота стрижнів становить 1 м. Модуль пружності стрижня E_b розраховуємо за формулою:

$$E_b = \frac{S \times \gamma_w}{n_w}, \quad (1)$$

де S – площа контакту понтонної опори з водою; γ_w – питома густина води; n_w – кількість заданих стрижнів. Кількість заданих стрижнів має бути такою, щоб якнайкраще відобразити суцільність контакту грані з водою: для квадратної чи прямокутної площини контакту мінімальна кількість стрижнів має становити не менше 4. У нашому випадку взято 6 і 9 стрижнів для двосекційної понтонної опори та двосекційної здвоєної понтонної опори відповідно з метою уникнення прогину від навантаження в середині опори. Оскільки модуль пружності для стрижнів розраховують на 1 м^2 , то поперечний переріз взято відповідно $100 \times 100 \text{ см}$, отже, модуль пружності стрижнів становитиме 76,52 та 102 кПа для двосекційної понтонної опори та двосекційної здвоєної понтонної опори відповідно. Граничні умови стрижнів установлені таким чином, щоб вони могли вільно обертатись у точках закріплення, для чого додано шарніри, водночас для нижніх кінців стрижнів заборонено переміщення за всіма осями.

Для отримання результатів ліній впливу було досліджено топологію руху одиничного навантаження по точках стрижнів балок (рис. 15). До постійних навантажень було віднесено та задано: для балок прогонових будов – 1,874 кН/м; для кормових секцій понтонної опори – 1,718 кПа; для середніх секцій понтонної опори – 1,551 кПа.

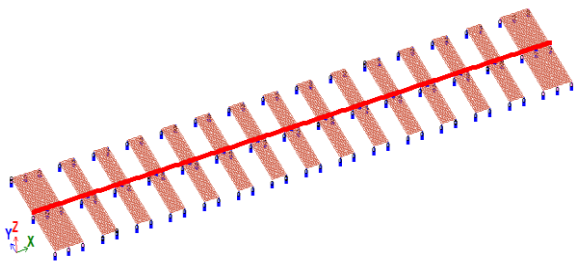


Рис. 15. Топологія руху одиничного навантаження

Fig. 15. Topology of unit load movement

Для дослідження вантажопідйомності елементів мосту було використано схему тимчасового навантаження за моделлю MLC 60 та MLC 70 згідно з [12] MLC 68 як модель гіпотетичного вітчизняного гусеничного транспортного засобу, як результат перерахунку моделі НГ–60 за методикою [12].

Для отримання результатів розрахунку в ЛПРА та подальшого їх обчислення в Mathcad основну увагу було зосереджено на трьох елементах у балках перевірки перерізів із:

- найбільшим згинальним моментом в прогонах між понтонними опорами (результати позовжніх зусиль відсутні);
- найбільшим згинальним моментом на ділянках над понтонними опорами та позовжньою силою при ньому;
- найбільшим позовжнім зусиллям на ділянках над понтонними опорами та згинальним моментом при ньому.

Найбільш навантажені елементи виявились на ділянках передостанніх опор (№ 2, № 14) (рис. 16).

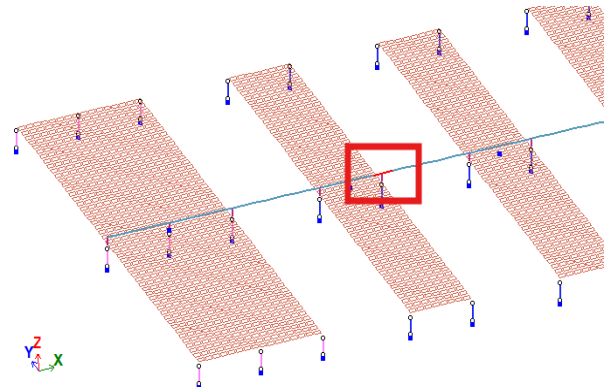


Рис. 16. Положення найбільш навантажених елементів балок прогонової будови

Fig. 16. Position of the most loaded elements of the girder beams of the span structure

Для подальшого визначення напружень було експортовано отримані результати ліній впливу (рис. 17) та імпортовано в програму Mathcad із подальшим розрахунком.

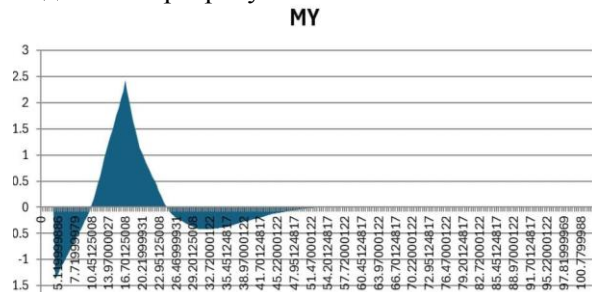


Рис. 17. Лінія впливу максимального згинального моменту в прогонах між понтонними опорами

Fig. 17. The line of influence of the maximum bending moment in the spans between pontoon supports

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

За правилами завантаження ліній впливу, постійні навантаження помножують на площі ділянок які дають найбільше значення зусиль. Під час цього розрахунку було допущено декілька спрощень:

– тимчасове навантаження встановлюють суворо посередині над максимальною ординатою. Якщо навантаження в цьому випадку виступає за межі розрахункової моделі, то його зміщують так, щоб воно повністю стало на модель;

– власну вагу понтонів вважають розподіленою на повну довжину мосту, тобто лінію впливу.

Враховуючи те, що всі навантаження є рівномірно розподіленими, визначення зусиль виконуємо за формулою (2):

$$S = q \times \omega, \quad (2)$$

де q – значення розподіленого навантаження; ω – площа ділянки лінії впливу під розподіленим навантаженням.

Отримані значення за розрахунками зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Значення внутрішніх зусиль

Table 1

Value of internal efforts		
№	Параметр	Значення
1	Розподілене навантаження від транспорту на ділянку навантаження [кН/м]	1 17,72
2	Зусилля максимального згинального моменту в прогонах між понтонами [кН·м]	1 096,104
3	Зусилля максимального згинального моменту над понтонами [кН·м]	601,30
4	Зусилля поздовжньої сили за максимального згинального моменту над понтонами [кН]	–1 753,68
5	Зусилля максимальної поздовжньої сили над понтонами [кН]	–1 839,34
6	Зусилля згинального моменту за максимальної поздовжньої сили над понтонами [кН·м]	501,08

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

№	Параметр	Значення
Визначення зусиль від власної ваги конструкції мосту		
7	Розподілена вага понтонів на міст [кН/м]	12,32
8	Максимальне напруження в прогонах між понтонами за максимального моменту [МПа]	398,09
9	Максимальне напруження над понтонами за максимального моменту [МПа]	307,06
10	Максимальне напруження над понтонами за максимальної поздовжньої сили [МПа]	222,32

Порівняння результатів розрахованих напружень у балках автомобільної прогонової будови зведено до табл. 2.

Таблиця 2

Значення напружень у балках та вертикальних осідань мосту

Table 2

Values of stresses in beams and vertical settlements of the bridge			
Ділянка завантаження	MLC60	MLC68 (НГ–60)	MLC70
За максимального згинального моменту в прогоні між понтонами [МПа]	377,40	398,09	429,65
За максимального згинального моменту на ділянці над понтонами [МПа]	292,78	307,06	331,12
За максимального поздовжнього зусилля на ділянці над понтонами [МПа]	205,67	222,32	241,23
Максимальне вертикальне осідання мосту [м]	0,62	0,69	0,75

Наукова новизна та практична значимість

Проведено моделювання елементів понтонного мосту, який використовують для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії рф. Отримана модель дозволяє дослідити його роботу під дією сучасного навантаження та встановити можливість його пропуску, а також за потреби виконати оптимізацію та модернізацію конструкції.

Модель може бути використана під час виконання завдань з логістичного забезпечення та технічного прикриття об'єктів інфраструктури. Перерахунок нормативного гусеничного навантаження за стандартами країн НАТО дозволяє адаптувати його до сучасної класифікації за навантаженням.

Висновки

Проаналізовано застосування наявної понтонної системи мосту, досліджено військову класифікацію транспортних засобів країн НАТО, створено модель понтонного мосту та досліджено його роботу під дією сучасного навантаження. За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Застосування понтонних систем мостів в умовах сьогодення в ході відсічі збройної агресії рф відіграє значну роль для підтримання логістичного забезпечення та технічного прикриття об'єктів інфраструктури.

2. Для застосування наданих іноземними партнерами засобів із подолання водних перешкод необхідно використовувати сучасну класифікацію країн НАТО за вантажопідйомністю військових транспортних засобів.

3. Отримане значення MLC моделі нормативного вітчизняного гусеничного навантаження дозволяє адаптувати його до подолання водних перешкод за допомогою сучасних засобів.

4. Визначення напружено-деформованого стану конструкції за допомогою використання сучасних інструментів дозволяє оцінити її несну здатність з урахуванням вимог із пропуску сучасного навантаження.

5. Аналіз отриманих значень напружень у балках прогонової будови та максимальних вертикальних осідань мосту, що є обмежувальними характеристиками несної здатності конструкції, дозволяє надати рекомендації щодо пропуску необхідного навантаження, а також визначити подальші напрями для дослідження системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Браун С. Як понтони можуть допомогти Україні обійти мінні поля, окопи та танкові пастки. *Kyiv Post. Ukraine's global voice*. 2023. URL: <https://www.kyivpost.com/uk/analysis/20652>
2. 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>
3. Гернич М. В., Ключник С. В. Сталезалізобетонні прогонові будови мостів для постконфліктного відновлення зруйнованої транспортної інфраструктури. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. № 19. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872>
4. Горбатюк Ю. М., Ярмолюк В. М., Артем'єв М. С. (2014) Застосування наплавних мостів на сучасному етапі будівництва Збройних Сил України. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 5. С. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2014/40389>
5. ДБН В.1.2-15:2009 (2009). *Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи* [Чинний від 01-03-2010]. Київ : Мінрегіонбуд України, 83 с.
6. Козацький С. ДССТ відновлює зруйнований залізничний міст на дільниці Київ – Коростень. *Militaryni*. 2022. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/dsst-vidnovlyuye-zrujnovanyj-zaliznychnyj-mist-na-dilnytsi-kyiv-korosten/>
7. Перепелиця К. М., Ключник С. В. Використання наплавних (понтонних) мостів для технічного прикриття транспортних об'єктів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315301>
8. Телов В. И., Коблов И. Т., Тараканов И. Н., Новиков Г. И. *Наплавной железнодорожный мост НЖМ56*. Главное управление железнодорожных войск, 1977. 344 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Українські військові навели понтонну переправу на Курському напрямку. *АрміяInform*. 2025. URL: <https://armyinform.com.ua/2025/03/21/ukrayinski-vijskovi-navely-pontonnu-perepravu-na-kurskomu-napryamku/>
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. Hornbeck B., Kluck J., Connor R. Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. *Defense Technical Information Center*. 2005.
12. *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.

K. M. PEREPELYTSIA^{1*}, S. V. KLIUCHNYK²

^{1*}Dep. of Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 738 54 25, e-mail kirill_perepelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237

²Dep. «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Research of pontoon bridge elements in view of modern challenges in terms of load capacity

Purpose. The main purpose of this work is to study the current requirements for floating means for overcoming water obstacles; adaptation of the normative tracked load to the standard of dynamic effects of tracked and wheeled military loads of NATO countries; modeling of the elements of the pontoon bridge NZhM-56 using software to study it under the influence of modern load; study of the stress-strain state of the bridge elements to determine its carrying capacity. **Methodology.** The paper analyzes the current load capacity requirements for pontoon systems, taking into account the challenges of today, using the experience of NATO countries in the military classification of the load capacity of artificial structures. The internal forces in the elements of a pontoon bridge under the influence of a modern moving load are determined by the method of lines of influence. Software that implements the finite element method was used to study the pontoon bridge. **Findings.** The requirements of the modern NATO standard for military loads were investigated. An adaptive recalculation of the tracked load model, for which the structure was designed, was carried out to meet the NATO military load standard. The results of internal forces in the beams of the bridge span structure were obtained. **Originality.** The elements of the model of a pontoon bridge used to overcome water obstacles during the repulsion of the armed aggression of the Russian Federation were reproduced using software that allows to study the operation of the pontoon system (available resource) and to establish the real load capacity of the bridge, taking into account the requirements of the NATO standard for loading. The domestic tracked load was adapted to the requirements of NATO countries according to the classification of military vehicles. **Practical value.** Determination of the load capacity of pontoon bridge elements will allow rational use of the available resource, passage of modern loads in accordance with the challenges of today, as well as optimization and modernization of bridge structures. Determining the compliance of the domestic load classification with the requirements of NATO countries helps to ensure the passage of existing equipment through artificial structures classified according to modern standards.

Keywords: pontoon bridges; load capacity; overcoming water obstacles; functioning of transport infrastructure; Military Load Classification (MLC); method of influence lines; modeling of pontoon systems; finite element method

REFERENCES

1. Braun, S. (2023). Yak pontony mozhut dopomohty Ukraini obiiyti minni polia, okopy ta tankovi pastky. *Kyiv Post Ukraine's global voice*. Retrieved from <https://www.kyivpost.com/uk/analysis/20652> (in Ukrainian)
2. 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)
3. Hernich, M., Klutchnik, S., & Spivak, D. (2021). Composite reinforced concrete bridge girders for post-conflict reconstruction of the destroyed transport infrastructure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 19, 28-37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872> (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Gorbatyuk, Y. M., Yarmolyuk, V. M., & Artemyev, M. S. (2014). Application of floating bridges at the present stage of the armed forces of Ukraine. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 29-34. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2014/40389> (in Ukrainian)
5. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy*, 83 DBN V.1.2-15:2009. (2009). Kyiv: Minreghionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
6. Kozatskyi, S. (2022). DSST vidnovliuie zruinovanyi zaliznychnyi mist na dilnytsi Kyiv-Korosten. *Militarnyi*. Retrieved from <https://mil.in.ua/uk/news/dsst-vidnovlyuye-zruinovanyj-zaliznychnyj-mist-na-dilnytsi-kyiv-korosten/> (in Ukrainian)
7. Perepelytsia, K. M., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Use of floating (pontoon) bridges for the engineering cover of transport facilities. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 63-70. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315301> (in Ukrainian)
8. Telov, V. I., Koblov, I. T., Tarakanov, I. N., & Novikov, G. I. (1977). *Naplavnoy zheleznodorozhnyy most NZhM56. Glavnoe upravlenie zheleznodorozhnykh voysk*. (in Russian)
9. Ukrainski viiskovi navely pontonnu perepravu na Kurskomu napriamku. (2025). *ArmijaInform*. Retrieved from <https://armyinform.com.ua/2025/03/21/ukrayinski-vijskovi-navely-pontonnu-perepravu-na-kurskomu-napryamku/> (in Ukrainian)
10. 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)
11. Hornbeck, B., Kluck, J., & Connor, R. (2005). Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. *Defense Technical Information Center*. DOI: <https://doi.org/10.21236/ada476104>
12. *Military load classification of bridges, ferries, rafts and vehicles* (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5). (2017). NATO Standardization Office. (in English)

Надійшла до редколегії: 27.02.2025

Прийнята до друку: 25.06.2025