

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.873:624.5

П. А. ОВЧИННИКОВ¹, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}

¹Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 452 15 02, ел. пошта p.a.ovchynnykov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1046-803X

^{2*}Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПОНТОННО-КАНАТНОГО МОСТУ З ТОЧКИ ЗОРУ КОНЦЕПЦІЇ ТЕНСЕГРІТИ

Мета. Метою даної роботи є аналіз досвіду реалізації концепції тенсегрїті, а також дослідження вже побудованих конструкцій і таких, що наразі проєктуються за таким принципом. Передбачено також визначення основних ознак та характеристик тенсегрїті-конструкцій і розгляд запропонованої раніше конструкції понтонно-канатного мосту з точки зору даної концепції. На основі проаналізованих даних пропонується розробити альтернативні конструкції понтонно-канатного мосту. **Методика.** Аналіз літературних джерел, даних про побудовані та запроектовані мости та інші конструкції; аналіз та синтез елементів будівельних конструкцій. **Результати.** На основі результатів аналізу визначено основні ознаки тенсегрїті-конструкцій, а також принципи чисельного аналізу конструкцій для визначення деяких кількісних показників таких систем. Зроблено висновки про формальну неналежність до тенсегрїті-конструкцій як побудованих мостів і інших конструкцій, так і понтонно-канатного мосту. На основі задачі з пошуку архітектурних форм купольних систем через розрізання осесиметричних, запропоновано «первісну» симетричну конструкцію для понтонно-канатного мосту, що відповідає визначеним ознакам. За результатами дослідження існуючих кабельних і тенсегрїті-конструкцій запропоновано три альтернативні архітектурні форми для понтонно-канатного мосту. **Наукова новизна.** Виконано аналіз існуючих джерел, включаючи побудовані та проєктовані мости і споруди, що присвячені концепції тенсегрїті. Зроблено висновок про можливість і доцільність застосування даної концепції для запропонованого раніше понтонно-канатного мосту. Доведено, що в подальшому даний міст можна розглядати з точки зору тенсегрїті за умови введення деяких теоретичних припущень чи допоміжних елементів. **Практична значимість.** Для існуючої конструкції понтонно-канатного мосту, після погляду на неї з точки зору тенсегрїті та інших кабельних конструкцій, запропоновано альтернативні форми, що можуть мати додаткові переваги для конкретних умов проєктування чи будівництва.

Ключові слова: тенсегрїті; понтонно-канатний міст; порожниста мотузка, канатна ферма; пошук форми

Вступ

Тенсегрїті (ТГ) (поєднання натягуванням [*tensional integrity*] / стиск, що ширяє [*floating compression*]) – конструкційна та архітектурна концепція, що полягає у створенні системи окремих стиснених елементів всередині мережі розтягнутих, які і задають структуру таким чином, щоб стиснені елементи не контактували.

Відповідно, «чиста» тенсегрїті-структура – це така, що має наступні ознаки:

- елементи працюють на чистий стиск або чистий розтяг;
- стиснуті елементи не контактують між собою безпосередньо;

– попередній натяг тяжів забезпечує знакопостійність зусиль та конструкційну цілісність;

– конструкція є настільки жорсткою, щоб забезпечувати знакопостійність елементів під час прикладення навантажень;

– конструкція є безрозпірною і для забезпечення жорсткості не потребує зовнішніх в'язей.

При цьому варто зазначити, що за сімдесят років з часу виникнення концепції кількість тенсегрїті-конструкцій, що застосовують її в чистому вигляді і є реальними інженерними проєктами, а не мистецькими композиціями, залишається вкрай малою, незважаючи на те, що вони, теоретично, є одночасно легкими, жорсткими і економічними (Sultan, 2009).

Найближче всього до суми ознак підходять наступні споруди: міст Курілла в Австралії (рис. 1), що вважається найдовшим тенсергіті-

мостом у світі, маючи довжину 470 м; міст в Алмере, Нідерланди (рис. 2); дах стадіону Тропікана у США (рис. 3) тощо.



Рис. 1. Міст Курілла, що має 20 щогл і додатково 16 «ширяючих» стрижнів



Рис. 2. Міст Алмере – щогли розташовані по осі мосту і мають невеликі нахили в поперечному напрямку для забезпечення жорсткості



Рис. 3. Стадіон Тропікана – кожне внутрішнє кільце з'єднано із зовнішнім канатними елементами

Але навіть ці споруди багато авторів не відносять до ТТ через те, що граничні умови задані зовнішніми опорами або стисненими елементами, в них є елементи, що працюють на згин, або ж не виконується одна чи кілька з інших ознак (Gomez-Jauregui, Carrillo-Rodriguez, Machado, & Lastra-González, 2023).

Це достатньо просто пояснити тим, що в реальних інженерних конструкціях, на відміну від тих, де «архітектури більше, ніж інженерії», для їхньої оптимізації та забезпечення необхідної функціональності, доводиться поєднувати деякі функції елементів та запроваджувати певну синергію між концепціями і підходами (Micheletti, & Podio-Guidugli, 2022). Тобто, з

врахуванням економічних та технічних чинників сучасний підхід до інженерії майже не передбачає застосування якогось окремого підходу чи окремої концепції під час проектування і будівництва споруди (Банніков, & Гезенцвей, 2023).

З точки зору ТТ, деякі з таких конструкції можна винести в окремі групи. Так, загальна система, в якій у контакт входять k жорстких тіл, називається тенсергіті-системою k -го класу (Skelton, & Oliviera, 2009), але все одно для більшості конструкцій чистий принцип тенсергіті можна знайти лише в окремих ізольованих елементах і аж ніяк ні при погляді на загальну систему.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Так, Щогловий (Пілонний) міст в м. Пурмеренд в Нідерландах (рис. 4) є фактично варіацією вантового мосту; міст біля «Королівського доку Вікторія» у Великобританії (рис. 5) має згинані елементи, на які спираються проміжні пілони аналогічно мосту Курілпа, і фактично є шпренгельною системою; міст Фортсайд в Сті-

рлінгу, Шотландія (рис. 6) має суміщену функцію проїзної частини і нижнього поясу конструкції тощо. Фактично останні два мосту є варіацією канатної ферми. При цьому, всі вищенаведені мости загальноприйнятно все одно відносять до концепції ТГ, що зрозуміло, враховуючи їх характерні архітектурні форми.



Рис. 4. Щогловий міст – кожна щогла стоїть на окремій опорі та з'єднана вантовими елементами з проїзною частиною



Рис. 5. Royal Victoria dock bridge



Рис. 6. Forthside bridge

Таким чином, можна поставити питання про належність (або часткову належність, або належність аналогічну вищенаведеним прикладам) до тенсеріті, наприклад, вантових конструкцій, особливо вантових ферм; висячих конструкцій, особливо таких, що мають конструкції для підвищення жорсткості (зворотні кабелі, об'єднання кабелю з балкою жорсткості тощо); так звані інтрадозні мости тощо.

Окремо з точки зору концепції ТГ запропоновано розглянути понтонно-канатний міст, описаний в таких літературних джерелах (Овчинников, Кузьмінський, & Марочка, 2019; Овчинников, & Кузьмінський, 2020;

Овчинников, П. А., Кузьмінський, & Овчинникова, І. О., 2021). Такий міст, згідно з особливостями його конструкції, матиме розтягнутий кабель, що утримує окремі стійки, які стоять на опорах, причому, замість жорстких опор тут використані понтони (рис. 7). Вони повністю занурені у воду і, породжуючи постійну виштовхуючу силу, більшу необхідної, утримуються в одному положенні кабелем, що отримує таким чином попереднє розтягуюче напруження і підвищує жорсткість конструкції. Досвід застосування понтонних мостів показує їх доцільність у конкретних ситуаціях (Гернич, & Ключник, 2022).

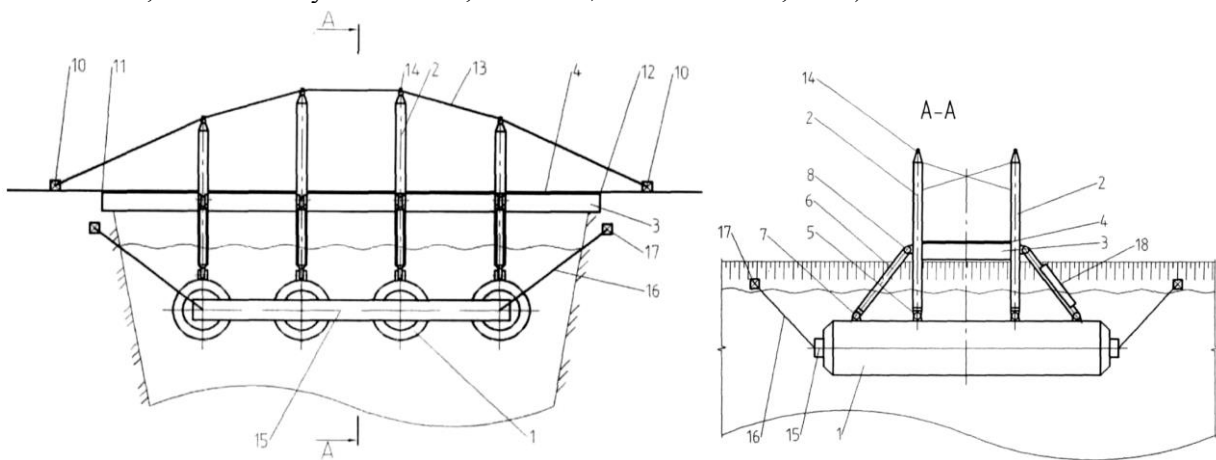


Рис. 7. Викопіювання з патенту на понтонно-канатний міст (Овчинников, & Кузьмінський, 2020)
(тут і далі всі елементи мосту показані умовно)

Мета

Метою роботи є аналіз статичних і розрахункових схем існуючих та проєктованих ТГ-конструкцій, принципи їх проєктування і застосування, визначення можливості їх застосування для конкретної конструкції понтонно-канатного мосту, а також розробка альтернативних варіантів конструкції або варіантів її оптимізації.

Методика

Для досягнення поставленої мети в статті розглянуто наукові роботи, присвячені проєктуванню та аналізу ТГ-конструкцій. Серед робіт виділено такі, увагу в яких приділено визначенню поняття тенсеріті через структурний аналіз, а також такі, що пропонують реальні будівельні конструкції за даним принципом. Серед останніх виділено окремі роботи, що займаються пошуком нових конструкцій, «з ну-

ля» або спираючись на знайдені ТГ-конструкції і модифікуючи їх, іноді таким чином, що конструкція перестає формально відповідати приведеним вище ознакам.

Однією з таких робіт є (Micheletti, & Cadoni, 2011), що присвячена знаходженню сферичних та інших осесиметричних ТГ-систем, які запропоновано «розрізати» по осі або по хорді, створюючи таким чином купольну систему, що потребує зовнішніх в'язей для стійкості і стабільності свого положення, і, формально, не може бути віднесена до ТГ, але зберігає багато її ознак та характерний зовнішній вигляд.

В першому наближенні розв'язавши зворотню задачу, можна знайти ТГ-фігуру, що буде «первісною» для понтонно-канатного мосту, що розглядається і аналізується надалі. Така конструкція, яку в пласкій постановці наведено на рис. 8, матиме всі ознаки тенсеріті і в цілому буде схожа на один з варіантів вантових або канатних ферм, запропонованих у 1960-х роках

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

і таких, що наразі використовується в будівельних конструкціях.

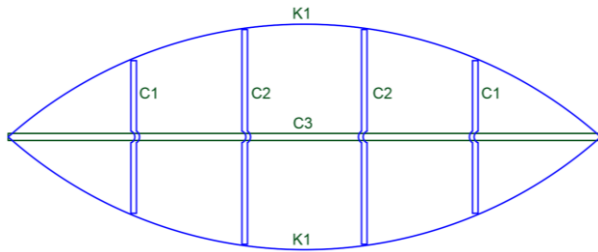


Рис. 8. «Первісна» конструкція для понтонно-канатного мосту

Також літературні джерела пропонують чисельний аналіз, що дозволяє визначити якісно приналежність конструкції до тенсегрїті, а також визначити деякі їх кількісні показники. Так, класичні ТГ-конструкції можуть передбачати «нескінченно малі механізми». Механізм називається нескінченно малим, якщо умова відсутності подовження обмежується виникненням нескінченно малих переміщень (Calladine, & Pellegrino, 1991). Відповідно, нескінченно малі механізми – це такі, у яких зміна довжини елемента при переміщенні відноситься до нижчого порядку, ніж порядок переміщення (Rhode-Barbarigos, Bel Hadj Ali, Motro, & Smith, 2012) (рис. 9), та такі, що мають жорсткість за рахунок стану «самонапруження», який утворюється з прикладенням попереднього напруження до елементів і до системи. За відсутності цього попереднього напруження жорсткість системи наближається до нульової (Sultan, 2009). В такому випадку ці конструкції будуть статично та механічно невизначуваними.

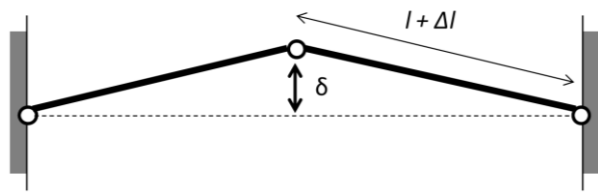


Рис. 9. Умовна схема нескінченно малого механізму

Таким чином, можливо виконати чисельний аналіз методом матричної декомпозиції, який підтвердить або спростує наявність та визначить кількість нескінченно малих механізмів та станів самонапруження в конструкції і таким чином належність конструкції до ТГ і наявність стабільної жорсткості (Gilewski, Kłowska, &

Obara, 2015, 2016). Великий перелік методик пошуку форми та пропозицій щодо конструювання ТГ-конструкцій наведено у роботі (Micheletti, & Podio-Guidugli, 2022).

До вже відомих ТГ-конструкцій мостів, крім тих, які приведені раніше, можна навести міст за схемою «порожньої мотузки» (*hollow rope*) (Rhode-Barbarigos, Bel Hadj Ali, Motro, & Smith, 2010, 2012). Такі конструкції матимуть від шести станів самонапруження, що може підвищити надійність конструкції при їх застосуванні (Іванова, Жабчик, Хозяїкіна, & Григор'єв, 2023).

Результати

За результатами аналізу існуючої літератури, а також вже збудованих або проєктованих конструкцій, можна стверджувати, що конструкції за принципом тенсегрїті або з частковим його застосуванням можуть мати деякі переваги, а саме:

- менша вага за рахунок виникнення лише осьових зусиль, що підвищує ефективність використання матеріалів;
- архітектурна привабливість за рахунок візуальної легкості конструкцій;
- легкість контролю зусиль в елементах;
- можливість монтажу «розгортанням» за рахунок шарнірності з'єднань.

В той же час такі конструкції мають деякі недоліки, наукова та інженерна робота над усуненням яких все ще активно ведеться, незважаючи на те, що скоро мине дев'яносто років від представлення перших прото-конструкцій:

- низька жорсткість через особливості конструкції та введення нескінченно малих механізмів;
- складність пошуку конструкційних та архітектурних форм;
- складність забезпечення «чистоти» принципу тенсегрїті в реальних проєктах (що, на думку автора, абсолютно не є важливим за умови саме практичного застосування);
- деяка складність розрахунку у зв'язку з нелінійністю роботи кабелів та великим ступенем невизначеності системи.

Крім цього, для даних систем може бути характерною збільшена кількість станів самонапруження, що збільшує надійність конструкції і забезпечує її подальше використання (хоча, можливо, і ускладнене, тобто за умови настан-

ня граничного стану II групи) у випадку відмови одного з елементів. З цієї точки зору для пошуку архітектурних форм понтонного мосту, що розглядається, варто розглядати конструкції, для яких вже визначено більшу кількість таких станів, або виконувати розрахунки пропонуваніх конструкцій для визначення їхньої кількості. З іншої сторони, необхідно виконувати розрахунки для визначення кількості нескінченно малих механізмів, адже для забезпечення жорсткості конструкції кожного з них необхідно вводити додатковий стан самонапруження та підбирати вірну схему попереднього напруження елементів конструкцій.

Проаналізувавши наведену раніше схему понтонно-канатного мосту (див. рис. 7), і порівнявши її з відомими ТГ-конструкціями, навіть без розрахунків можна зробити висновок, що такий міст не є чистою ТГ-конструкцією, але має деякі її ознаки. Крім того, для схеми понтонно-канатного мосту можна знайти «первісну» конструкцію, що повністю необхідним ознакам відповідатиме. Для даного мосту аналогія одного з засновників ТГ-теорії Річарда Бакмінстера Фуллера, що система тенсегріті подібна до надувної кулі, в якій газ під тиском (стиснуті стрижні) розпирає розтягнуту оболонку (розтягнуті кабелі) стає більш прямою, оскільки стрижні дійсно отримують свій напружений стан від дії Архімедової сили.

Порівнюючи і зіставляючи в подальшому ТГ та інші кабельні конструкції з конструкцією понтонно-канатного мосту, можна запропонувати декілька альтернативних або модифікованих конструкцій, пов'язаних із заміною розтягнутого кабелю на інші кабельні елементи, наприклад, такі, що наведені на рисунках нижче.

На рис. 10 наведено вигляд понтонно-канатного мосту з використанням «оберненої вантової» системи та «первісна» ТГ-система, що відповідає даній конструкції. В розглянутому та проаналізованому випадку кожна пара стійок матиме окремі канати, що забезпечують жорсткість їх положення на площині. Така конструкція матиме деякі переваги, наприклад, зменшення висоти стійок для невеликої довжини прогонів, збільшення надійності через дублювання елементів тощо. Проте існують і недоліки, пов'язані зі збільшенням кількості елементів і, відповідно, введенням додаткових вузлів перетину, кріплення тощо.

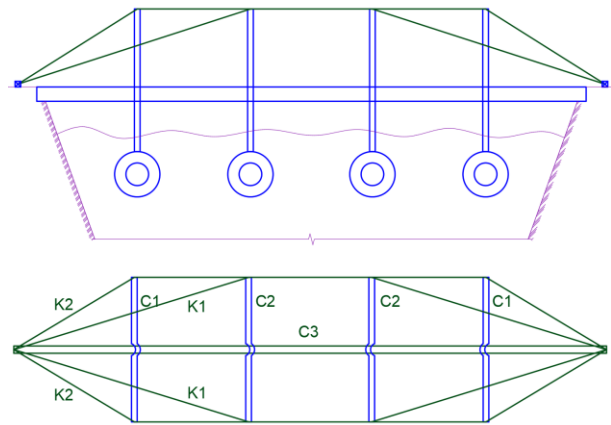


Рис. 10. Альтернативна конструкція з застосуванням вантової схеми

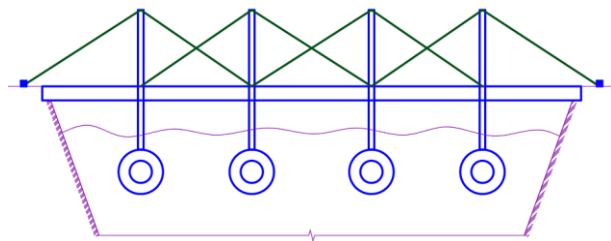


Рис. 11. Альтернативна конструкція з застосуванням вантової ферми

На рис. 11 зображено можливий розвиток попередньої системи з урахуванням ідей попередньо напружених канатних ферм або існуючої конструкції мосту в Алмере, який вже було згадано раніше. Така конструкція матиме менше складних вузлів для взаємоперетинів елементів, а також, при вірному проектуванні, не потребуватиме додаткових в'язей для об'єднання понтонів в даній площині.

На рис. 12 зображено один з варіантів об'єднання оригінальної конструкції понтонно-канатного мосту із конструкцією за принципом «порожнистої мотузки». Така конструкція вимагає розв'язання відносно складної задачі з пошуку конструкції (*form finding*), але може мати переваги, що проявляться у вигляді збільшеної надійності та, для другого випадку (рис. 12, б), у тому, що така конструкція, як і попередня (див. рис. 11), не потребує додаткових в'язей для утримання положення понтонів, причому як у вертикальній, так і у горизонтальній площинах. Крім того, для таких конструкцій було виконано розробки, що передбачають розгортання всієї конструкції з берега, що може спростити монтаж.

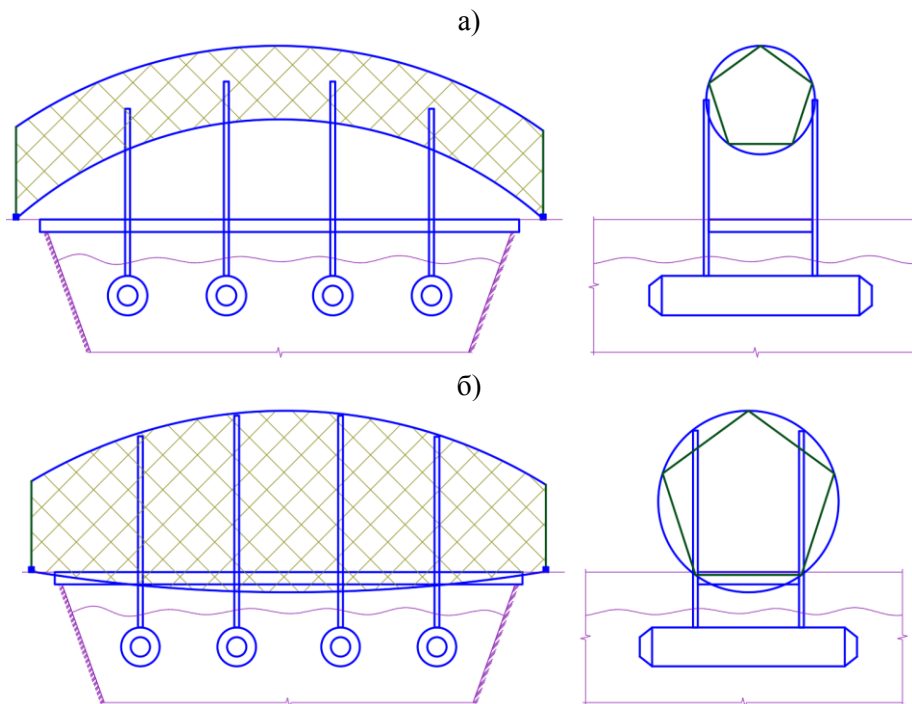


Рис. 12. Альтернативна конструкція із застосуванням схеми «порожнистої мотузки» на основі п'ятикутника. Система «порожнистої мотузки» показана умовно

Наукова новизна і практична значимість

Було виконано аналіз літературних джерел, що присвячені концепції тенсегрїті, а також проектуванню, розрахунку, чисельному аналізу ТГ-конструкцій. За результатами аналізу зроблено висновки щодо конструкції понтонно-канатного мосту і її відношення до даної концепції. Хоча сама конструкція не відповідає формальним ознакам, а при виконанні чисельного розрахунку, очевидно, не відповідатиме і кількісним ознакам ТГ-конструкцій, для неї можна знайти «первісну» форму, яка таким ознакам буде відповідати. Зроблено висновок, що, в подальшому, понтонно-канатний міст можна розглядати з точки зору ТГ за умови введення деяких теоретичних припущень чи допоміжних елементів.

Для існуючої конструкції понтонно-канатного мосту, після погляду на неї з точки зору ТГ та інших кабельних конструкцій, запропоновано альтернативні форми, що можуть мати додаткові переваги для конкретних умов проектування чи будівництва.

Також подано аргументи щодо недоцільності «пуризму» концепцій при практичному підході до цивільної інженерії.

Висновки

На основі аналізу літературних джерел виділено основні характеристики та ознаки конструкцій, виконаних за принципом тенсегрїті. Враховуючи переваги цих конструкцій та досвід їх будівництва, прийнято, що дана концепція є перспективною для подальшого розвитку і застосування при будівництві мостів.

Розглянуто запропонований раніше понтонно-канатний міст з врахуванням ТГ-концепції і зроблено висновок про належність його конструкції до ТГ-систем та про можливість в подальшому розглядати даний міст як ТГ-систему, вводячи так звану «первісну» конструкцію від існуючої.

Спираючись на виконані дослідження, запропоновано альтернативи до конструкції понтонно-канатного мосту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Calladine, C., & Pellegrino, S. (1991). First-order infinitesimal mechanisms. *International Journal of Solids and Structures*, 27, 505-515.
- Gilewski, W., Kłosowska, J., & Obara, P. (2015). Applications of Tensegrity Structures in Civil Engineering. *Procedia Engineering*, 111, 242-248.

- Gilewski, W., Kłosowska, J., & Obara, P. (2016). Verification of Tensegrity Properties of Kono Structure and Blur Building. *Procedia Engineering*, 153, 173-179.
- Gomez-Jauregui, V., Carrillo-Rodriguez, A., Manchado, C., & Lastra-González, P. (2023). Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review. *Applied Sciences*, 13, 8669.
- Micheletti, A., & Cadoni, D. (2011). Design of Single-Layer Floating-Compression Tensegrities. *Conference: CSMA-2011*.
- Micheletti, A., & Podio-Guidugli, P. (2022). Seventy years of tensegrities (and counting). *Archive of Applied Mechanics*, 92, 2525-2548.
- Rhode-Barbarigos, L., Bel Hadj Ali, N., Motro, R., & Smith, I. (2010). Designing tensegrity modules for pedestrian bridges. *Engineering Structures*, 32, 1158-1167.
- Rhode-Barbarigos, L., Bel Hadj Ali, N., Motro, R., & Smith, I. (2012). Design Aspects of a Deployable Tensegrity-Hollow-rope Footbridge. *International Journal of Space Structures*, 27, 81-96.
- Skelton, R., & Oliveira, M. (2009). *Tensegrity Systems*. New York: Springer.
- Sultan, C. (2009). Tensegrity Structures: Sixty Years of Art, Science, and Engineering. In: *Advances in Applied Mechanics* (eds. H. Aref & E. van der Giessen), 43, 69-145. Burlington: Academic Press.
- Банніков, Д. О., & Гезенцевей, Ю. І. (2023). Оцінка якості проектування конструктивних рішень сталевих будівель і споруд, *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 30-36.
- Гернич, М. В., & Ключник, С. В. (2022). Використання майна наплавного мосту НЖМ-56 зважаючи на виклики військового сьогодення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 22, 27-32.
- Іванова, Г. П., Жабчик, К. С., Хозяйкіна, Н. В., & Григор'єв, О. Є. (2023) Проблема прогнозування живучості стрижневих конструкцій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 95-101.
- Овчинников, П. А., & Кузьмінський, В. П. (2020). *Понтонно-канатний міст* (патент 121809 МПК Е01D 15/14 (2006.01), UA 121809 С2). Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
- Овчинников, П. А., Кузьмінський, В. П., & Марочка, В. В. (2019). *Удосконалення конструкції капітальних понтонних мостів*. Тези доповідей І Міжнародної науково-технічної конференції «Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт», 22.
- Овчинников, П. А., Кузьмінський, В. П., & Овчинникова, І. О. (2021). *Нова конструкція понтонного мосту*. Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 187-188.

P. A. OVCHYNNYKOV¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

^{1*}Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 452 15 02, e-mail p.a.ovchynnykov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1046-803X

^{1*}Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

SUBSTANTIATION OF THE PONTOON-CABLE BRIDGE STRUCTURE FROM THE TENSEGRITY CONCEPT POINT OF VIEW

Purpose. The purpose of this work is to conduct an analysis of the tensegrity concept implementation, as well as the study of already built structures and those that are currently being designed according to this principle. Also to determine main features and characteristics of tensegrity structures and to consider the previously proposed structure of the pontoon-cable bridge from the point of view of this concept. Based on the analyzed data, it is proposed to develop alternative designs of the pontoon-cable bridge. **Methodology.** Analysis of literary sources, data on constructed and designed bridges and other structures; analysis and synthesis of building structures elements. **Findings.** Based on the studied data, the main features of tensegrity, as well as the principles of numerical analysis of structures to calculate some quantitative indicators of such systems, were determined. Conclusions were made about the formal non-compliance of both the built bridges and other structures, as well as the pontoon-cable bridge with tensegrity concept. Based on the task of finding architectural forms of dome systems through cutting axisymmetric ones, an "antiderivative" symmetrical structure for a pontoon-cable bridge is proposed, which will meet the specified characteristics. Based on the study of existing cable and tensegrity structures, three alternative architectural

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

forms for the pontoon-cable bridge were developed. **Originality.** Analysis of existing sources, including constructed and designed tensegrity bridges and other structures, was conducted. A summary about the feasibility and usefulness of this approach for a previously proposed pontoon-cable bridge has been made. It was concluded that, in the future, this bridge can be considered from the tensegrity point of view, provided that the introduction of some tolerances or auxiliary elements were made. **Practical value.** For the existing structure of the pontoon-cable bridge, after considering it from the tensegrity and other cable structures' point of view, alternative forms are proposed that may have additional advantages for specific design or construction conditions.

Keywords: tensegrity; pontoon-cable bridge; hollow rope; cable truss; form finding

REFERENCES

- Calladine, C., & Pellegrino, S. (1991). First-order infinitesimal mechanisms. *International Journal of Solids and Structures*, 27, 505-515. (in English)
- Gilewski, W., Kłosowska, J., & Obara, P. (2015). Applications of Tensegrity Structures in Civil Engineering. *Procedia Engineering*, 111, 242-248. (in English)
- Gilewski, W., Kłosowska, J., & Obara, P. (2016). Verification of Tensegrity Properties of Kono Structure and Blur Building. *Procedia Engineering*, 153, 173-179. (in English)
- Gomez-Jauregui, V., Carrillo-Rodríguez, A., Machado, C., & Lastra-González, P. (2023). Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review. *Applied Sciences*, 13, 8669. (in English)
- Micheletti, A., & Cadoni, D. (2011). Design of Single-Layer Floating-Compression Tensegrities. *Conference: CSMA-2011*. (in English)
- Micheletti, A., & Podio-Guidugli, P. (2022). Seventy years of tensegrities (and counting). *Archive of Applied Mechanics*. 92, 2525-2548, (in English)
- Rhode-Barbarigos, L., Bel Hadj Ali, N., Motro, R., & Smith, I. (2010). Designing tensegrity modules for pedestrian bridges. *Engineering Structures*, 32, 1158-1167. (in English)
- Rhode-Barbarigos, L., Bel Hadj Ali, N., Motro, R., & Smith, I. (2012). Design Aspects of a Deployable Tensegrity-Hollow-rope Footbridge. *International Journal of Space Structures*, 27, 81-96. (in English)
- Skelton, R., & Oliveira, M. (2009). *Tensegrity Systems*. New York: Springer. (in English)
- Sultan, C. (2009). Tensegrity Structures: Sixty Years of Art, Science, and Engineering. In: *Advances in Applied Mechanics* (eds. H. Aref & E. van der Giessen), 43, 69-145. Burlington: Academic Press. (in English)
- Bannikov, D. O., & Hezentsvei, Yu. I. (2023). Otsinka yakosti proiektuvannia konstruktyvnykh rishen stalevykh budivel i sporud, *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 30-36. (in Ukrainian)
- Hernych, M. V., & Kliuchnyk, S. V. (2022). Vykorystannia maina naplavnoho mostu NZhM-56 zvazhaiuchy na vyklyky viiskovoho sohodennia. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 22, 27-32. (in Ukrainian)
- Ivanova, H. P., Zhabchuk, K. S., Khoziaikina, N. V., & Hryhoriev, O. Ye. (2023) Problema prohnouzuvannia zhyvuchosti stryzhnevnykh konstruksii. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 95-101. (in Ukrainian)
- Ovchynnykov, P. A., & Kuzminskyi, V. P. (2020). *Pontonno-kanatnyi mist* (patent 121809 MPK E01D 15/14 (2006.01), UA 121809 C2). Kyiv: DP «Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti». (in Ukrainian)
- Ovchynnykov, P. A., Kuzminskyi, V. P., & Marochka, V. V. (2019). *Udoskonalennia konstruksii kapitalnykh pontonnykh mostiv*. Tezy dopovidei I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Transportni sporudy: stan, problemy zberezhennia, remont», 22. (in Ukrainian)
- Ovchynnykov, P. A., Kuzminskyi, V. P., & Ovchynnykova, I. O. (2021). *Nova konstruksiiia pontonnoho mostu*. Materialy 81 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu», 187-188. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 01.03.2024.

Прийнята до друку 04.04.2024.