

УДК 624.21.09-047.44:[624.012.4:624.014.2]

Д. С. СПІВАК^{1*}, С. В. КЛЮЧНИК²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

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

Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху

Мета. У роботі передбачено висвітлити та обґрунтувати необхідність пошуку раціональних схем конструкцій решітчастих трубобетонних мостів з їздою зверху на основі аналізу останніх досліджень та нормативних документів. **Методика.** Проаналізовано актуальні наукові дослідження для визначення сучасного стану розвитку трубобетонних решітчастих конструкцій. Наведено методи поліпшення конструкцій. Проаналізовано комбінації заповнення елементів решіток бетоном, варіанти перерізів елементів решіток, їхні переваги та недоліки. Розглянуто стан будівельних норм України та інших країн з метою визначення можливих варіантів проєктування трубобетонних мостових конструкцій. Через відсутність детальних досліджень із цього питання визначено доцільність реалізації оптимізаційних досліджень для зазначених конструкцій та необхідні для цього кроки. **Результати.** Оптимізація конструкцій трубобетонних мостів є актуальним напрямом досліджень, проте вимагає багатокомплексного підходу та використання сучасних комп'ютерних потужностей. Запропоновано метод лінійної оптимізації та визначено його загальні кроки для пошуку економічних моделей. З'ясовано, що база українських ДБН у сфері трубобетонних конструкцій є обмеженою, але може бути розширена за рахунок використання європейських стандартів та інших міжнародних нормативних документів. **Наукова новизна.** Висвітлено необхідність глобального розвитку та вдосконалення трубобетонних решіток прогонових будов мостів. Акцентовано увагу на перевагах цього напрямку, який сприяє прийняттю рішень на етапі вибору типу мосту та детального проєктування решітчастих трубобетонних мостів. Запропоновано методику пошуку оптимальних решіток, у яку можна інтегрувати наявні методи поліпшення конструкції та вимоги нормативних документів. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані для поліпшення конструкцій трубобетонних мостів на етапі проєктування. Оптимізування решіток може сприяти підвищенню ефективності будівництва та надійності цього виду мостових споруд.

Ключові слова: трубобетон; трубобетонні мостові конструкції; композитні решітчасті мости; ферма з їздою зверху; оптимізація

Вступ

Композитний матеріал трубобетон давно зарекомендував себе як головний несний елемент для прийняття екстремальних навантажень. Понад 30 років його використовують у мостобудівництві, особливого поширення він набув у Китаї, що підтверджено історією та досвідом будівництва більше ніж двох сотень мостів. Серед них переважають саме аркові, що підкреслює одну з найвигідніших умов використання, де несний елемент працює переважно на осьовий стиск [2].

Зміни також торкнулися класичних фермових прогонових будов. Загальновідомо, що решітчасті конструкції мають чудове співвідношення несної здатності та власної ваги, а також

хороші економічні показники в цілому. Механізм передачі навантаження в цій конструкції також простий та ефективний: згинальний момент від навантаження перетворюється на осьові сили верхніх та нижніх поясів. Тому заповнення поясів бетоном є хорошим конструктивним рішенням: бетонне осердя поліпшує стійкість сталевих труб до вигину, а заливання бетону в розтягнуті пояси дає переваги для застосування попереднього напруження. Такі рішення призводять до збільшення загальної жорсткості фермових конструкцій та меншої висоти ферми, тим самим скорочують витрату матеріалів [10].

Композитні фермові конструкції з трубобетонними поясами вперше розробив L. Y. Zhang (1999), їх схему показано на рис. 1. [4]. Прогін містить трикутне розташування труб у перерізі

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

та залізобетонну плиту проїзду. Типовим інженерним застосуванням цієї конструкції є міст Сянцзяба (Xiangjiaba, рис. 2, *a*), Зідонг (Zidong, рис. 2, *б*) та Ганхайзі (Ganhaizi, рис. 2, *в*) [4].

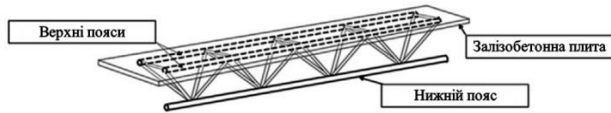
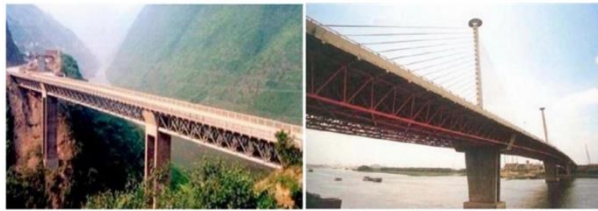


Рис. 1. Композитна труботонна ферма

Fig. 1. Composite pipe and concrete truss

Сьогодні найдовшою конструкцією у світі з використанням композитної ферми залишається міст Ганхайзі. Він збудований у 2012 році, має довжину 1 811 метрів, складається з 36 прогонів, найбільший із яких становить 62,5 метри.



в) міст Ганхайзі (Ganhaizi Bridge)

Рис. 2. Решітчасті мости з трикутним перерізом розташування труботонних поясів

Fig. 2. Lattice bridges with a triangular cross-section of the arrangement of pipe concrete belts

Просторові решітки часто застосовують у мостах з обмеженими вимогами до висоти прогонів, тому в них задіяні більш складні з'єднання, які мають забезпечити легкий монтаж конструкції та задовольняти усім необхідним граничним умовам. У такому випадку литі сталеві з'єднання (рис. 3, *a*) часто є хорошою альтернативою зварним.

Труботонні ферми з іздою зверху мають більше варіацій поперечних перерізів. Трикутний переріз (рис. 4, *a*) є найпростішим поперечним перерізом, що складається з двох верхніх та од-

ного нижнього пояса. Його зазвичай використовують у малопрогонових мостах у діапазоні довжин прогонів 40–60 м. Трапецієподібний переріз (рис. 4, *б*) складається з трьох верхніх поясів і двох нижніх. Чотири частини одинарної ферми, з'єднані горизонтальними елементами, утворюють просторову систему стабільною як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках, що частіше використовують на автомобільних дорогах із наявністю більше ніж дві смуги руху.

a – a



б – б



Рис. 3. Вузол об'єднання елементів решітки в нижньому поясі дворівневого пішохідно-автомобільного мосту р. Незенбах (Nesenbach) у Німеччині:

a – литий вузол з'єднання елементів;
б – загальний вигляд мосту

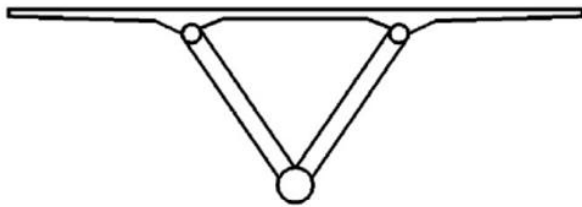
Fig. 3. The grid element connection unit in the lower girders of the two-level pedestrian and highway bridge on the Nesenbach River in Germany:

a – cast element connection unit;
b – general view of the bridge

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Прикладом економічної переваги композитної ферми є експеримент [4], у якому було виконано порівняння трубобетонних ферм мостів Зідонг та Сянцзяба з конструкцією, яку часто використовують у Китаї, а саме залізобетонною балкою коробчастого перерізу. Для мосту Зідонг витрата сталі між композитною фермою та бетонною коробчастою балкою становить 1,11:1, але коефіцієнт використання бетону становить 0,57:1. Аналогічні співвідношення сталі та бетону для мосту Сянцзяба спостерігалися зі значеннями 1,09:1 та 0,47:1 відповідно. Тому використання трубобетонних ферм замість залізобетонних балок значно полегшує конструкцію та зменшує собівартість за матеріалами.

a – a



б – б

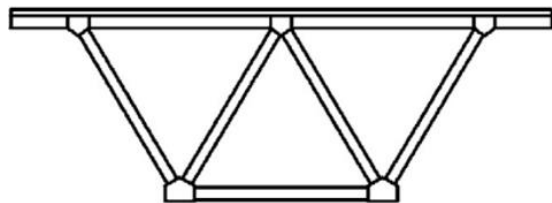


Рис. 4. Поперечні перерізи ферми із їздою зверху: *a* – трикутний переріз; *б* – трапецієподібний переріз

Fig. 4. Cross-sections of a truss with a ride on top: *a* – triangular section; *b* – trapezoidal section

Елементи решітки зазвичай складаються з круглих або прямокутних перерізів. У наш час круглий переріз елементів став більш популярним через високу ефективність утримання бетону та його сумісну роботу. Однак у такій структурі є недоліки. Вузол об'єднання елементів (рис. 3) із круглих труб дуже складний. Потрібне точне різання на кінцях елементів та значні зварювальні роботи або окреме лиття вузлів (рис. 4, *б*), що призводить до збільшення техніко-економічних витрат. І навпаки, прямокутні з'єднання забезпечують просту геометрію, оскільки для підготовки кінців елемента потрібні

тільки прямі розрізи. Така конструкція більш економічна ніж з'єднання з круглих труб.

У пустотних елементах ферм найслабшим місцем є з'єднання, схильні до статичного та втомного руйнування. Для вирішення цих проблем розроблені різні конструктивні рішення, що дозволяють повною мірою використовувати композиційні рішення в першому випадку та оптимізацію конструкції в стикі у другому. Для прямокутних та круглих перерізів це класичний порожній перетин з бетонним наповненням, а для прямокутних можливе посилення сталевим ребром, що додатково позначають як PBL (німецькою Perfobond Leister) (рис. 5).

a – a



б – б



Рис. 5. Вузли об'єднання трубобетонних елементів круглого (*a*) та прямокутного (*б*) перерізу

Fig. 5. Joints of pipe concrete elements of circular (*a*) and rectangular (*b*) cross-section

Зазвичай такі ребра вздовж перерізу мають отвори для поліпшення зчеплення з бетоном. На рис. 6 і 7 представлено типове інженерне застосування моста з композитних ферм із використанням прямокутних елементів, посиленних PBL.

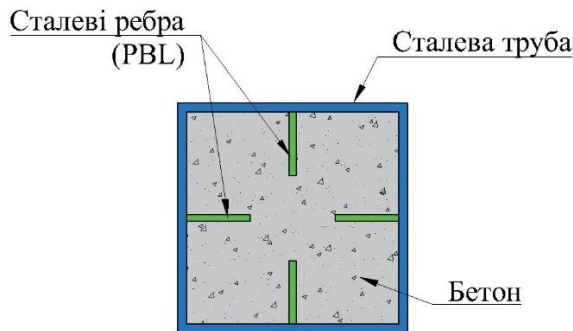


Рис. 6. Посилення прямокутного трубобетонного перерізу сталевими ребрами з отворами

Fig. 6. Reinforcement of a rectangular pipe-concrete section with steel ribs with holes



Рис. 7. Реальне застосування посилення ребрами конструкції мосту

Fig. 7. Real application of rib reinforcement of a bridge structure

Поперечні розміри елементів у звичайних сталевих фермах часто визначають умови міцності вузлів їх об'єднання. У такому випадку елементи проєктують для досягнення пікового стану руйнування у вузлах через наявність згинальних моментів, а не через руйнування пояса, тому елементи решіток інколи мають нераціональні витрати ресурсів [9]. Заповнення вузлів бетоном ефективно знижує концентрацію напруги та поліпшує жорсткість, що призводить до збільшення втомної довговічності та граничної несної здатності, а водночас відкриває можливість до зменшення розмірів постійних перерізів у поясах.

Відомо, що міцність решітки не задовольняється міцністю поясів, адже часто стиснуті елементи в решітках, наприклад, розкоси, мають першочерговий граничний стан за стійкістю. У цьому напрямі виконано лабораторні експерименти в [11], де наповнені бетоном та армовані трубчасті решітки у ґратчастих фермах випробувані статичними та циклічними навантажен-

нями. Автори виявили, що втомна міцність трубобетонних в'язів була майже у два рази вищою, ніж у пустотілих варіантах.

Існують випадки, коли для будівництва прогонових будов, зокрема аркових, використовують вторинні труби, що дозволяє істотно зменшити споживання матеріалів. Оскільки процеси демонтажу елементів, відновлення та транспортування впливають на навколишнє середовище, повторне використання не завжди може бути кращим порівняно з новим будівництвом. Залежно від умов будівництва можливі випадки комбінування вторинних та нових труб для будівництва прогону з трубобетону [8].

У випадку додавання до ферми залізобетонної плити поліпшуються характеристики конструкції на вигин. Наявність бетонної плити досліджено в роботі [5], де додатково розглянуто параметри кінця зсуву ферми, кута між розкосом і поясом у разі їхнього заповнення бетоном. Результати показали, що і заповнення бетоном труб, і бетонна плита значно поліпшили характеристики ферми на вигин. На основі цього дослідження та чинних нормативних документів були запропоновані та перевірені спрощені моделі трубобетонних ферм.

Трубобетон як композитний матеріал має недоліки, спричинені взаємодією між бетоном та сталлю, що особливо спостерігається в разі граничних навантажень або згині елементів. Результати дослідження Юн Хуей Хуанг та ін. [3] підтверджують це, дефекти поверхні контакту між сталевією трубою та бетонним осердям істотно впливають на граничну несну здатність ферм CFST. Гранична несна здатність протестованих моделей зі стовідсотковим розділенням в зоні контакту матеріалів нижча ніж із повністю склеєними варіантами. При розділенні контакту по його глибині на 10 та 20 % результати показали зменшення граничної несної здатності на 18 та 37,7 % відповідно. Тому важливо уникати проблеми розділення матеріалів у зоні контакту по глибині у фермових трубобетонних конструкціях.

Загалом використання трубобетону у фермах та його наявний «асортимент» перерізів демонструє кращі показники міцності на розтяг порівняно з пустотілими варіантами. Тому постає питання раціональності та економічності його ви-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

користання в певній схемі решітки, запровадження нетипових рішень в умовах будівництва. Вирішення цього питання дозволить пришвидшити впровадження композитної конструкції трубобетонних мостів в межах України та доповнити галузь знань за її межами.

Мета

Для кращого розуміння вибору конструкції, визначення пошуку раціональних схем решіток відповідно до певних умов у роботі передбачено висвітлити поточний стан конструювання решічастих трубобетонних мостів.

Методика

Аналіз наукових джерел та нормативних документів крізь призму останніх досліджень мостових решічастих трубобетонних прогонових будов потребує визначення багатьох параметрів для оптимізації геометричних змінних. Методика поєднання сфери наукових досліджень та правил нормативних документів дозволяє якісніше виявити корисні моделі конструкцій для їхнього практичного використання. Вищенаведений огляд актуальних проблем та поліпшення конструкцій, а також огляд нормативних документів щодо їхнього проектування дозволяє акцентувати доцільність подальшого розвитку цього питання.

Через відсутність прецедентів дослідження мостових трубобетонних прогонових будов, використання методу лінійної оптимізації допоможе створити підґрунтя для виділення більш вузьких векторів розвитку на шляху до визначення оптимальних варіантів конструкцій.

Результати

Стан нормативних документів. Розглянемо нормативну базу України. Найбільш розгорнута інформація згадка про бетононаповнені сталеві труби наявна в ДБН В.2.6–160:2010 «Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення». Проте документ містить лише загальні принципи конструювання для стиснутих елементів, що можна охарактеризувати як відсутність власних норм розрахунку у сфері мостобудівництва.

Набагато краще ситуація постає з використанням Єврокоду. Єврокод 4 пропонує достатньо розгорнуту інформацію та підхід до проектування стискальних та згинальних трубобетонних елементів. Завдяки напряму державної політики на інтеграцію з Євросоюзом маємо компліментовану версію у вигляді ДСТУ–Н Б EN, що робить проектування трубобетонних конструкцій доступнішим.

Відомо також про китайські, японські та американські норми з цього напряму. Китайські DBJ/T13–51–2020 та японські «Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures» 2008 року є окремими документами, а американські є складовою частиною документа з проектування сталевих конструкцій ANSI/AISC 360–16. Різниця між ними, включаючи Єврокод 4, полягає в методах розрахунків або модифікації цих методів та мірі врахування особливостей мостобудівного напряму. Точність цих методів у наш час описують шляхом порівняння результатів лабораторних або математичних експериментів із теоретичними розрахунками цих зразків у багатьох дослідженнях. Спостерігається, що на точність методів розрахунку впливають не тільки їхній підхід, а також закладені в них додаткові коефіцієнти надійності [1]. Тому кінцева модель може суттєво відрізнитись відповідно до використаних норм.

Оптимізація решіток трубобетонних ферм. Конструктивна та архітектурна оптимізація є предметом досліджень понад чотири десятиліття. У галузі мостобудування проведено численні дослідження щодо мінімізації обсягу роботи, ваги та вартості конструкцій. Низка досліджень стосується оптимізації фермових, вантових, підвісних та аркових мостів, що вказує на складність цих систем [7].

Необхідність пошуку раціональних схем трубобетонних решічастих будов із їздою зверху полягає не тільки в більш детальному вивченні ролі трубобетону в решітках прогонових будов мостів, а й у виявленні певних закономірностей для їхнього подальшого аналізу. Цей процес потребує оцінювання результатів розрахунків із комбінацією багатьох змінних, для чого необхідно володіти знаннями багатьох тонкощів у конструюванні. Метою подібного завдання є виявлення певних моделей, які задовольняють

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

експлуатаційні вимоги з мінімальними витратами матеріалів та праці.

За останні 20 років технології реалізації оптимізаційних процесів стали достатньо потужними. Комп'ютерні процеси створення та обчислення розрахункових моделей конструкцій спрощуються, точність результатів розрахунків підвищується, швидкість обробки результатів прискорюється. Особливої уваги варти саме продукти програмного забезпечення, які роблять наведені процеси комфортнішими та зрозумілішими. З іншої сторони, без навичок програмування, а саме готового програмного середовища, неможливо перетворювати великі чисельні дані у візуальну модель із подальшим розрахунком методом скінченних елементів.

Якщо не брати до уваги естетичність конструкції, питання оптимальних схем трубобетонних решіток може бути вирішене звичайними розрахунковими методами та інструментами шляхом аналізу певних об'ємів даних. Через недостатню практику проектування решіток різних форм та їх комбінацій є сенс проаналізувати головні параметри форм конструкції та перерізи елементів взагалі. Тоді сформується точне уявлення про поведінку решіток з урахуванням переваг трубобетону та відмінність роботи цих конструкцій від аналогів зі сталевими пустотними елементами. Подібних результатів можна досягти простим, але доволі об'ємним методом порівняно з наявними – методом звичайного перебору (рівномірного пошуку). Цей метод вимагає визначення усіх пов'язаних змінних параметрів та обмежень. Увесь процес можна описати такими кроками:

1. Розглянути всі можливі варіанти поєднання типів решіток, їхніх геометричних характеристик та перерізів елементів відповідно.
2. Виділити ті варіанти, які задовольняють певним умовам та критеріям.
3. Довести, що інших рішень для цих умов немає.

Наведені вище кроки приховують безліч нюансів та деталей. Перший крок передбачає аналіз та врахування актуальних найновіших досліджень. Другий крок – виявлення граничних умов та точності розрахунків, уточнення максимумів та мінімумів, перевірка моделей та їхнє

порівняння відповідно до актуальних нормативних документів. Третій крок допомагає переконатись, що за заданими умовами та останніми дослідженнями показані вичерпні результати, висвітлити значимість та переваги варіантів трубобетонних прогонових будов з їздою зверху.

Наукова новизна та практична значимість

Проведений аналіз засвідчує необхідність глобального розвитку та поліпшення структур трубобетонних решіток для прогонових будов мостів.

Розвиток цього напрямку має вагомими перевагами для прийняття рішень у першу чергу на етапі вибору типу мосту та для детального проектування решітчастих трубобетонних мостів надалі.

Висновки

Сьогодні, актуальним та перспективним напрямом розвитку решітчастих трубобетонних конструкцій залишається доповнення нормативних документів розрахунками, які краще відображають результати експериментальних випробувань та реальних умов їхньої експлуатації. Головними причинами цього є відкриті питання оптимальних схем конструкцій, поліпшення контакту бетонного осердя та сталевий оболонки, простих та надійних комбінацій сучасних способів поліпшення конструкцій. За допомогою апаратного та програмного забезпечення невисокого рівня можливо реалізувати оптимізаційні роботи різної складності, що буде використано для подальших досліджень. Виявлення кращих моделей трубобетонних решіток ґрунтується на достатньо досліджених недоліках, що підтверджено впевненим використанням таких конструкцій у складних, характерних сфері мостобудівництва, умовах.

Пошук оптимізованих решіток із різними структурними рішеннями передбачає більш детальне визначення їхніх позитивних якостей. У подальшому на основі отриманих результатів із цієї тематики заплановано формування більш докладного ланцюга кроків до проєктування решітчастих трубобетонних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ляхоцький В. О., Комісаренко І. М. Деякі методи розрахунку трубобетонних несучих елементів круглого перерізу. *Зб. матеріалів 84-ї міжнар. студент. наук. конф. ун-ту. Секція : Мости, конструкції та будівельна механіка* (Харків, 11-15 квіт. 2022 р.). ХНАДУ. Харків, 2022. С. 100–107.
2. Співак Д. С. Питання довговічності мостових аркових прогонових будов із трубобетону. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»* (Дніпро, 19–20 жовт. 2022 р.). Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро, 2022. С. 41–43.
3. Yong-Hui Huang, Ai-Rong Liu, Ji-Yang Fu, Yong-Lin Pi, Experimental investigation of the flexural behavior of CFST trusses with interfacial imperfection. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 137. P. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.009>
4. Tian Z., Liu Y., Jiang L., Zhu W., Ma Y. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 6. Iss.1. P. 94–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001>
5. Chen B., Sheng Y., Fam A., Wei J. Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. *Thin-Walled Structures*. 2017. Vol. 110. P. 35–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.016>
6. *Ganhaizi Bridge*. URL: https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge
7. Korus K., Salamak M., Jasiński M. Optimization of geometric parameters of arch bridges using visual programming FEM components and genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112465>
8. Brütting J., Vandervaeren C., Senatore G., De Temmerman N., Fivet, C. Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 215. P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827>
9. Huang W., Fenu L., Chen B., Briseghella B. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 141. P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020>
10. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 152. P. 607–618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.035>
11. Sakai Y., Hosaka T., Isoe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. Vol. 60. Iss. 3–5. P. 683–699. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00136-6)

D. S. SPIVAK^{1*}, S. V. KLIUCHNYK²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38(099) 200 07 64, e-mail d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

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

Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top

Purpose. The paper aims to highlight and substantiate the need to find rational design schemes for lattice tube concrete bridges with a ride on top based on the analysis of recent research and regulatory documents. **Methodology.** The current scientific research is analyzed to determine the current state of development of pipe concrete lattice structures. Methods for improving structures are presented. Combinations of filling the grating elements with concrete, variants of cross-sections of the grating elements, their advantages and disadvantages are analyzed. The state of building codes of Ukraine and other countries is considered in order to determine possible options for the design of pipe concrete bridge structures. Due to the lack of detailed research on this issue, the feasibility of implementing optimization studies for these structures and the steps necessary for this are determined. **Findings.** The optimization of pipe-concrete bridge structures is a relevant area of research, but it requires a multicomponent approach and the use of modern computer facilities. The method of linear optimization is proposed and its general steps for finding economic models are determined. It was found that the base of Ukrainian SCSs in the field of pipe and concrete

structures is limited, but can be expanded by using European standards and other international regulations. **Originality.** The necessity of global development and improvement of pipe concrete gratings of bridge spans is highlighted. Attention is focused on the advantages of this area, which contributes to decision-making at the stage of selecting the type of bridge and detailed design of pipe-concrete lattice bridges. A methodology for finding the optimal grids is proposed, which can integrate existing methods of structural improvement and the requirements of regulatory documents. **Practical value.** The results of the study can be used to improve the design of pipe concrete bridges at the design stage. Optimization of gratings can help to increase the efficiency of construction and reliability of this type of bridge structure.

Keywords: tubular concrete; tubular concrete bridge structures; composite lattice bridges; truss with a ride on top; optimization

REFERENCES

- Liakhotskyi, V. O., & Komisarenko, I. M. (2022, April). Deiaki metodyky rozrakhunku trubobetonnykh nesuchykh elementiv kruhloho pererizu. *Zbirnyk naukovykh prats 84-yi mizhnarodnoi naukovo konferentsii studentiv universytetu. Sektsiia: Mosty, konstruksii ta budivelna mekhanika* (pp. 100-107). KHNADU. Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
- Spivak, D. S. (2022, October). The issue of durability of span structures of concrete filled steel tube arch bridges. *Materialy VIII Mizhnarodnoi nauково-praktychnoi konferentsii «Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka»* (pp. 41-43). Ukraine state University of Science and Technology. Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
- Huang, Y.-H., Liu, A.-R., Fu, J.-Y., & Pi, Y.-L. (2017). Experimental investigation of the flexural behavior of CFST trusses with interfacial imperfection. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 52-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.009> (in English)
- Tian, Z., Liu, Y., Jiang, L., Zhu, W., & Ma, Y. (2019). A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(1), 94-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.001> (in English)
- Chen, B., Sheng, Y., Fam, A., & Wei, J. (2017). Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 110, 35-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.016> (in English)
- Ganhaizi Bridge*. Retrieved from https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge (in English)
- Korus, K., Salamak, M., & Jasiński, M. (2021). Optimization of geometric parameters of arch bridges using visual programming FEM components and genetic algorithm. *Engineering Structures*, 241, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112465> (in English)
- Brütting, J., Vandervaeren, C., Senatore, G., De Temmerman, N., & Fivet, C. (2020). Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming. *Energy and Buildings*, 215, 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827> (in English)
- Huang, W., Fenu, L., Chen, B., & Briseghella, B. (2018). Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 241-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.020> (in English)
- Huang, W., Lai, Z., Chen, B., & Yao, P. (2017). Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*, 152, 607-618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.035> (in English)
- Sakai, Y., Hosaka, T., Isoe, A., Ichikawa, A., & Mitsuki, K. (2004). Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3-5), 683-699. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(03\)00136-6](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(03)00136-6) (in English)

Надійшла до редколегії: 120.11.2023

Прийнята до друку: 19.03.2024