

УДК 519.87:[625.022:624.272]

Д. С. СПІВАК^{1*}, С. В. КЛЮЧНИК²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, 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, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

Методика визначення ефективних параметрів трубобетонних балкових ферм з їздою зверху

Мета. У статті розглянуто методику пошуку ефективних розмірів головних розрізних балкових ферм із використанням трубобетону із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини. Основною метою роботи є розробка алгоритму, який дозволяє визначити оптимальні геометричні та конструкційні параметри таких ферм на основі комплексного врахування впливу матеріалів, навантажень і роботи елементів конструкції. **Методика.** Дослідження ґрунтується на чисельному моделюванні із застосуванням програмних комплексів Mathcad та ЛІРА–САПР. У його межах реалізовано метод рівномірного пошуку, що забезпечує генерацію всіх можливих комбінацій параметрів ферм, їх аналіз та фільтрацію відповідно до критеріїв ефективності. Основну увагу зосереджено на верхньому поясі ферм, виконаному з трубобетону, що дозволяє максимально реалізувати несну здатність трубобетонних елементів. Для розрахунків узяті нормативні навантаження АК, НК, СК, а також проведено перевірку умов роботи трубобетонних елементів згідно з положеннями Єврокоду 4. **Результати.** Розроблений алгоритм дозволяє автоматично генерувати, перевіряти та фільтрувати варіанти з урахуванням меж несної здатності. Перевірка розрахункових результатів підтвердила їхню відповідність нормативним вимогам та ефективне використання матеріалів. Середній час розрахунку одного варіанту достатній для визначення ефективних трубобетонних перерізів, але не є граничним показником і свідчить про наявність потенціалу для подальшої оптимізації та прискорення алгоритму. **Наукова новизна.** Автори розробили методику пошуку оптимальних параметрів трубобетонних розрізних балкових ферм із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини. Уперше запропоновано деталізовану багаторівневу структуру розрахунку трубобетонних ферм за нормативними навантаженнями ДБН, при цьому розрахунок трубобетонних елементів здійснено відповідно до положень Єврокодів. **Практична значимість.** Розроблено адаптивний інструмент, призначений для оптимізації трубобетонних фермових конструкцій у мостобудуванні. Запропонований підхід сприяє зменшенню матеріаломісткості та забезпечує раціональне використання трубобетону в елементах головних балкових ферм.

Ключові слова: трубобетон; сталезалізобетонна балкова ферма; метод рівномірного пошуку; ефективні параметри; параметричний аналіз

Вступ

Застосування трубобетону в мостобудуванні є поширеною практикою, передусім у склепінні аркових прогонових будов. Трубобетонні фермові мости використовують рідше, однак за останні 15 років реалізовано кілька значних проєктів, зокрема міст Ганхайзі (Ganhaizi Bridge, рис. 1, а) [8] завдовжки 1 611 м та міст Кеку (Keku Bridge, рис. 1, б) [14] завдовжки 6 431 м – найдовший трубобетонний міст у світі.

Заповнення сталевих труб бетоном сприяє підвищенню несної здатності та надійності мостових конструкцій. Трубобетон виявляє найкращі механічні властивості під час роботи на

стиск, тому його застосування у верхніх поясах ферм є найбільш доцільним. Крім того, трубобетонні елементи характеризуються підвищеною загальною стійкістю, а також кращою здатністю сприймати місцеві згинальні навантаження. Тому трубобетон може суттєво вплинути на визначення параметрів головних ферм, якщо вони не продиктовані певними обмеженнями чи умовами проєктування [13, 15].

Проведений у статті [8] аналіз свідчить про недостатній рівень дослідженості ефективних параметрів ферм з урахуванням багатофакторного впливу. Необхідність пошуку раціональних схем трубобетонних ферм з їздою зверху зумовлена не лише потребою у більш деталь-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ному вивченні ролі трубобетону в таких системах, а й важливістю виявлення закономірностей в умовах дії численних змінних.

a – a



б – б



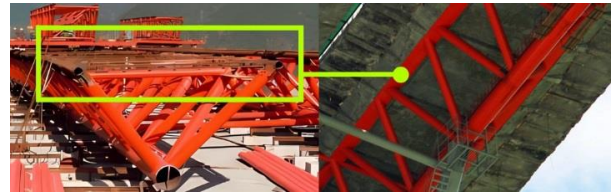
Рис. 1. Трубобетонні ферменні мости:
a – міст Ганхайзі; *б* – міст Кеку

Fig. 1. Concrete-filled steel tube truss bridges:
a – Ganhaizi Bridge; *b* – Keku Bridge

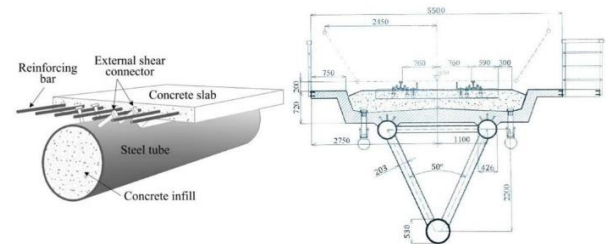
Прогонові будови з наскрізними фермами є складними просторовими системами, у яких головні елементи сприймають значні зусилля від дії статичних та динамічних навантажень. З огляду на це, а також інші конструкційні та експлуатаційні переваги, для зменшення зусиль передбачають монолітну залізобетонну плиту проїзної частини, яка працює спільно з фермою (рис. 2). У деяких випадках під плиту укладають металевий профільований лист, який також виконує функцію незнімної опалубки (рис. 2, *в*).

Фермові прогони можуть мати розташування проїзної частини як зверху, так і знизу конструкції. За умови достатньої будівельної висоти перевагу надають варіанту їзди зверху. Проте для великих прогонів будівельна висота може виявитися зовеликою, що ускладнює розміщення конструкції в межах потрібних габаритів. У таких випадках доцільніше застосовувати ферми з розташуванням проїзної частини знизу, що дозволяє зменшити будівельну висоту конструкції [3].

a – a



б – б



в – в



Рис. 2. Види конструкції верхнього пояса в трубобетонних фермах їздою зверху:

a – об'єднання верхнього пояса ферми в рівні залізобетонної плити [11]; *б* – накладення залізобетонної плити на пояс ферми [5, 10];
в – з'єднання заповнення решітки з незнімною опалубкою з профільованих листів [16]

Fig. 2. Types of upper chord construction in concrete-filled steel tube trusses with top-deck traffic:

a – integration of the truss upper chord with the level of the reinforced concrete slab [11]; *b* – placement of the reinforced concrete slab on top of the truss chord [5, 10];
c – integration of the lattice infill with permanent profiled sheet formwork [16]

Для класичних ферм з їздою знизу навантаження передається на вузли ферми, а в мостах з їздою зверху навантаження часто передається на верхній пояс ферм між вузлами, викликаючи додаткові згинальні моменти. Найпоширенішим варіантом компонування трубобетонних фермових мостів є розміщення проїзної частини над прогоновою будовою. У цьому випадку залізобетонну плиту або інтегрують у верхній пояс ферм, формуючи єдиний монолітний елемент, або укладають безпосередньо на верхні пояси. У другому випадку це спричиняє виник-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нення більш виражених згинальних моментів у панелях.

Сучасні фермові мости зазвичай мають трикутну решітку з висхідними та низхідними розкосами, розташованими під кутом $40\text{--}60^\circ$ до горизонталі [6]. Подібний діапазон нахилу спостерігається і для пустотілих, і для заповнених бетоном розкосів у наявних трубобетонних фермах.

Більшість збудованих трубобетонних фермових прогонів виконано за нерозрізною системою. Нерозрізні ферми характеризуються певними економічними перевагами, зокрема зменшеними витратами металу та підвищеною жорсткістю. Водночас розрізна система конструкції залишається актуальним об'єктом дослідження завдяки її гнучкості в проектуванні, а також простоті виготовлення та монтажу.

Трубобетонні мости в Україні не є популярним рішенням, натомість кількість сталезалізобетонних мостів значна. Аналіз статистичних даних щодо використання сталезалізобетонних прогонових будов із наскрізними фермами в Україні, наведених в [1], указує на такі тенденції:

- у розрізних системах з їздою знизу переважно перекриті середні та великі прогони. Варіанти з їздою зверху застосовують здебільшого для середніх прогонів, вони зазвичай охоплюють менші відстані, ніж конструкції з їздою знизу. Водночас наведені дані не дозволяють зробити однозначний висновок щодо переваг того чи іншого компонування;

- у нерозрізних системах спостерігається протилежна закономірність: ферми з їздою зверху застосовують частіше, вони, як правило, характеризуються нижчим рівнем споживання сталі порівняно з фермами з їздою знизу. Проте найдовший зафіксований прогін було перекрито саме фермою з їздою знизу.

З огляду на переваги трубобетону як конструкційного матеріалу, зокрема його економічності, а також зважаючи на поточний стан трубобетонних ферм як у конструкційному плані, так і в аспекті їх практичного застосування в Україні, постає необхідність у визначенні ефективних параметрів таких конструкцій. Це своєю чергою сприятиме кращому розумінню особливостей проектування та використання трубобетонних ферм і дозволить чіткіше окрес-

лити межі ефективних розмірів для конкретних умов проектування.

Для дослідження цього питання у статті [8] було запропоновано та обґрунтовано метод рівномірного пошуку і розрахунку варіантів балкових трубобетонних ферм з їздою зверху. Об'єктом дослідження виступають головні балкові ферми з їздою зверху, для яких далі детально розглянуто алгоритм застосування запропонованого методу.

Мета

Основною метою статті є розробка та демонстрація алгоритму пошуку ефективних розмірів розрізних головних ферм із трикутною решіткою та використанням трубобетону.

Методика

Конструкційна схема досліджуваної прогонової будови (рис. 3) передбачає наявність залізобетонної плити проїзної частини та пласкої ферми з трикутною формою решітки. Ферма складається з елементів верхнього та нижнього поясів, а також елементів, що утворюють решітку. До останніх належать вертикальні стрижні, які виконують функцію крайніх стійок, та похилі стрижні, що відіграють роль розкосів. Усі зазначені елементи беруть участь у спільній роботі конструкційної системи, що зумовлює відповідний підхід до її розрахунку.

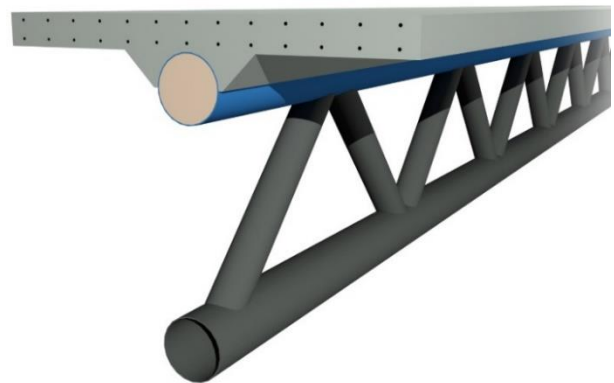


Рис. 3. Конструкція досліджуваної прогонової будови

Fig. 3. Structural configuration of the investigated bridge span structure

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Одним із ключових питань під час компонування прогонової будови з їздою зверху є вибір кількості головних ферм у поперечному перерізі мосту. У розрахунковій моделі передбачено можливість двох і більше площин ферм у межах одного прогону. Для забезпечення їх сумісної просторової роботи необхідно гарантувати стійкість площин ферм у напрямку, перпендикулярному до їхньої площини. У межах цього дослідження цей аспект не розглянуто, а умовно взято, що необхідна просторова жорсткість досягається завдяки застосуванню горизонтальних та/або нахилених до горизонту поперечних в'язей, а також залізобетонної плити проїзної частини.

На основі аналізу мостових конструкцій та особливостей трубобетону в розрахунках взято, що бетонування виконано лише для стиснених елементів труб верхнього пояса. Заповнення розкосів не передбачено не лише через технологічні труднощі, а й з огляду на конструкційну специфіку системи, яка полягає в досягненні граничного стану міцності переважно в з'єднаннях між елементами, а не в самих розкосах [7]. Бетонування нижнього пояса зазвичай застосовують лише в нерозрізних прогонах, де на опорах виникають стискальні зусилля. У розрізних прогонах бетонування розтягнутих поясів не забезпечує істотних переваг, за винятком певного підвищення жорсткості та міцності вузлів на продавлювання.

Як зазначено у [8], метод рівномірного пошуку є доволі ресурсоемним із точки зору обчислювальних витрат, однак забезпечує повне охоплення всіх можливих комбінацій параметрів, включених до розрахунку. Методика дослідження умовно структурована на три рівні: «групи блоків дій», «блоки дій» та окремі «дії» (рис. 4). Загальна схема дослідження містить кілька груп дій (рис. 5), зокрема групи № 1–5 формують основний розрахунковий модуль, у межах якого генеруються всі можливі комбінації параметрів: зокрема геометричних характеристик фермових схем, поперечних перерізів елементів і фізико-механічних властивостей матеріалів. У групі № 6 реалізується етап фільтрації отриманих варіантів ферм згідно із заданими критеріями та здійснюється обробка результатів розрахунків.



Рис. 4. Організація позначень рівнів схеми дослідження

Fig. 4. Notation system for the levels in the research scheme



Рис. 5. Схема групи дій дослідження

Fig. 5. Scheme of research action groups

Основна ідея розрахунку полягає у визначенні об'ємів витрат матеріалів шляхом підбору перерізів елементів верхнього пояса ферми, виконаного з класичного трубобетону круглого перерізу. Оптимізаційна завдання зводиться до вибору таких варіантів конструкційного рішення, які характеризуються найнижчими оцінками (балами), що своєю чергою відповідає мінімальним витратам матеріалів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Урахування всіх факторів у межах одного розрахунку є складним завданням, тому в цьому дослідженні увагу зосереджено на окремому аспекті, який дозволяє встановити чіткі обмеження для варіативності заданої форми ферм. Інакше кажучи, за межами обраного підходу не передбачено розширення простору можливих конфігурацій. Найбільш доцільним у цьому контексті є виконання розрахунків за першою групою граничних станів, яка, згідно з українськими нормативними документами, належить до основного типу розрахункових умов.

Метод дослідження базується на чисельному моделюванні та автоматизованій обробці результатів із використанням програмних комплексів ЛІРА–САПР та Mathcad. У середовищі Mathcad виконано основні розрахункові операції, зокрема формування варіантів, створення розрахункового файлу з варіантами для пошуку ліній впливу в ЛІРА–САПР, підбір перерізів

елементів та обробка отриманих результатів. У комплексі ЛІРА–САПР здійснено завантаження розрахункового файлу, проведення розрахунків і експорт результатів ліній впливу для подальшої обробки в Mathcad.

У зв'язку з тим, що групи дій виконують послідовно й упорядковують так, щоб уникати взаємного перетину, подальший аналіз кожної з них можна здійснювати окремо.

Група дій № 1. У межах цієї групи здійснюють формування розрахункового файлу для програмного комплексу ЛІРА–САПР (рис. 6). ЛІРА–САПР підтримує введення вихідних даних у текстовому режимі за допомогою файлів формату txt. Такий файл складається з так званих «документів», кожен із яких має свій номер і відповідає певному типу даних, зокрема координат вузлів, номерів елементів, типів шарнірних з'єднань тощо [2].

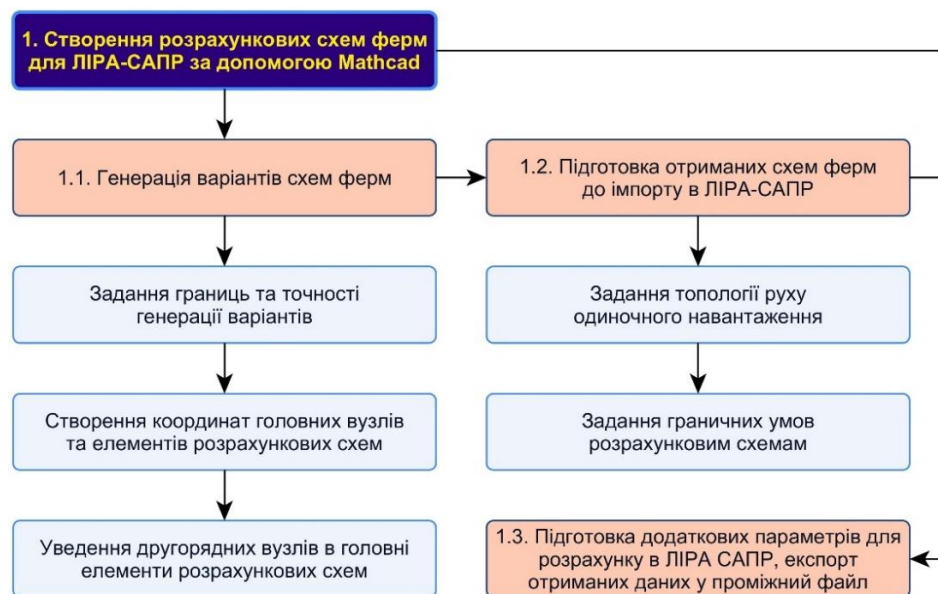


Рис. 6. Дії створення розрахункових схем ферм для ЛІРА–САПР за допомогою Mathcad

Fig. 6. Steps for creating truss calculation models for LIRA–SAPR using Mathcad

Формування файлу txt здійснюють у середовищі Mathcad на основі попередньо визначених генеральних розмірів ферм. На цьому кроці визначають форму решітки, головні розміри схем: розрахункову довжину, висоту ферми та довжину панелі.

Оскільки подальший розрахунок варіантів передбачає побудову ліній впливу в програмному комплексі ЛІРА–САПР, необхідно врахо-

увати особливості структури вхідних даних, зокрема:

1. Для забезпечення достатньої точності визначення зусиль не лише згинального моменту M та поперечної сили Q , але й у деяких випадках нормальної сили N , необхідно розбивати головні елементи ферми на декілька частин, умовно названих другорядними елементами. Створено геометричні схеми ферми, які містять

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

розкоси, стійки та підвіски, і виконано різну кількість поділів головних елементів. На рис. 7, а та б наведено приклади для порівняння результатів розрахунків у разі розділення на 8 та 320 другорядних елементів відповідно.

Аналіз показав, що розбиття на 8 елементів забезпечує оптимальну точність для зусиль M_y та N , оскільки в разі подальшого збільшення кількості елементів до 320 різниця між результатами не перевищує 0,42 %.

Водночас для визначення поперечної сили Q_z потрібна значно більша деталізація. Зокрема, щоб досягти похибки менше 1 %, необхідно застосовувати понад 300 другорядних елементів для кожного стрижня, що суттєво збільшує обчислювальне навантаження. У дослідженні встановлено, що в разі розбивання на 8 елементів похибка для Q_z становить майже 8 %, що не перевищує загальноприйнятого граничного значення 10 %. Тому для компонентів Q_z було впроваджено правило округлювання, яке детальніше розглянуто в групі дій № 4.

Для підтвердження достовірності розрахунків модель із розбиттям на 8 елементів додатково перевірено в середовищі програмного комплексу Selena, зокрема для компоненти M_y , як показано на рис. 7, в.

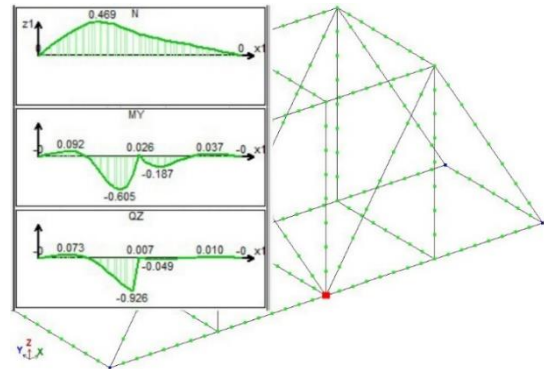
2. Нумерацію вузлів не задають вручну, а формують автоматично в порядку появи вузлів у текстовому розрахунковому файлі. Водночас елементи (стрижні) у файлі задають з прив'язкою до вже присвоєних номерів вузлів.

3. У середовищі Mathcad реалізовано функції імпорту та експорту даних для окремих форматів, однак відсутня можливість прямого експорту результатів у формат txt із записом у конкретний рядок. Така функціональність є необхідною для уникнення додаткової обробки об'ємних таблиць результатів, які містять порожні комірки, що потребують заповнення нульовими значеннями, спричиняючи додаткові витрати часу та обчислювальних ресурсів. Із метою оптимізації цього процесу реалізовано проміжний етап запису результатів у файл формату Excel, використання якого дозволяє точно визначати адресу комірки для розміщення даних. Після цього виконують імпорт файлу Excel, а далі – експорт отриманих даних до файлу txt.

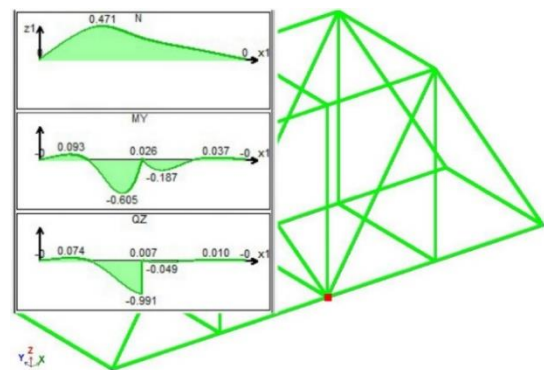
4. У процесі імпорту файлу формату txt програмний комплекс ЛІРА-САПР може видавати

помилку через надмірну довжину окремих рядків даних. Щоб уникнути цього обмеження, впроваджено розбиття рядків, у кожному з яких не перевищено умовну межу в 30 числових значень.

а – а



б – б



в – в

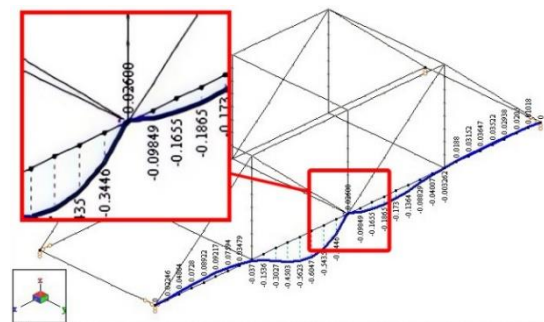


Рис. 7. Результати ліній впливу зусиль залежно від точності розділення головних елементів на:

а – 8 другорядних елементів;
б – 320 другорядних елементів; в – 8 другорядних елементів у програмі Selena для зусилля M_y

Fig. 7. Influence line results of forces depending on the subdivision accuracy of main elements into:

а – 8 secondary elements; б – 320 secondary elements;
в – 8 secondary elements in the Selena software for the bending moment M_y

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Група дій № 2. Особливе місце у функціоналі програмного комплексу ЛІРА–САПР посідає побудова ліній впливу – діаграм, які відображають зміну зусиль або переміщень у заданому елементі конструкції залежно від положення одиничного рухомого навантаження. Побудову таких діаграм здійснюють за допомогою відповідного функціонального модуля, у якому задають траєкторію руху навантаження та обирають цільовий параметр, наприклад, згинальний момент або нормальну силу.

У процесі створення розрахункових схем у середовищі Mathcad визначають саме ті зусилля, лінії впливу яких підлягають розрахунку

та подальшому експорту з ЛІРА–САПР. З урахуванням напрямку дії навантаження та узятій в ЛІРА–САПР системи координат виконують розрахунки та експорт значень згинальних моментів M_y , поперечних сил Q_z та поздовжніх зусиль N .

Кінцевою метою вказаної послідовності дій є перенесення результатів розрахунку ліній впливу до середовища Mathcad для подальшої обробки (рис. 8). Приклад побудованих розрахункових схем, згенерованих у Mathcad та завантажених до ЛІРА–САПР, наведено на рис. 9.



Рис. 8. Дії розрахунку схем ферм у ЛІРА–САПР та занесення результатів ліній впливу в Mathcad

Fig. 8. Steps of truss model calculation in LIRA–SAPR and input of influence line results into Mathcad

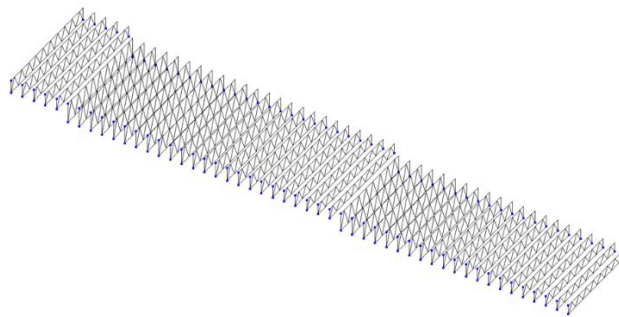


Рис. 9. Приклад створених у Mathcad 50 розрахункових схем ферм та імпортованих у ЛІРА–САПР

Fig. 9. Example of 50 truss calculation models created in Mathcad and imported into LIRA–SAPR

Група дій № 3. Ця група дій передбачає визначення постійних і тимчасових вертикальних навантажень (рис. 10). У дослідженні розглянуто три моделі тимчасових навантажень, що базуються на положеннях Державних будівельних норм України, від рухомого складу автодо-

рожніх мостів (моделі АК і НК) та рухомого складу залізничних мостів (модель СК). Відповідно визначення розрахункових значень навантажень також здійснено за вимогами чинних ДБН.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Рис. 10. Дії визначення постійних і тимчасових вертикальних навантажень

Fig. 10. Steps for determining dead loads and temporary vertical loads

До основних постійних навантажень, які враховують у розрахунках, належать власна вага ферми, залізобетонної плити проїзної частини та її покриття. Власну вагу ферми враховують на етапі підбору кожного окремого поперечного перерізу: для попередньо взятого варіанту перерізу визначають його вагу, після чого обчислюють відповідні зусилля – нормальну силу N , згинальний момент M та поперечну силу Q згідно з положеннями будівельної механіки. Отримані зусилля від власної ваги додають до основних розрахункових зусиль, попередньо визначених для тимчасових і решти постійних навантажень.

Група дій № 4. Загальну структуру цього етапу представлено на рис. 11. Насамперед виконують редагування, фільтрування, розділення та структурування отриманих даних ліній впливу з програмного комплексу ЛІРА–САПР. Із загального масиву даних виокремлюють зусилля N , M , та Q_z відповідно до попередньо заданих параметрів у розрахунковому файлі задачі. Далі ці дані проходять фільтрацію з метою визначення максимальних та мінімальних значень для кожного перерізу додаткового елемента.

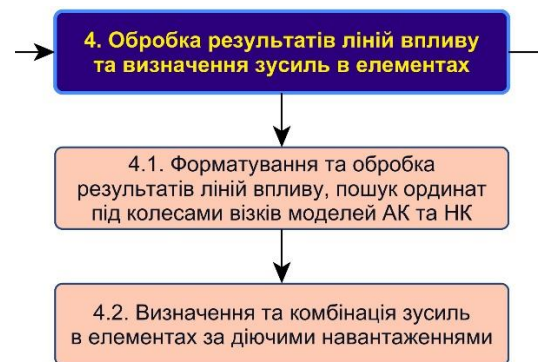


Рис. 11. Дії обробки результатів ліній впливу та визначення зусиль в елементах

Fig. 11. Steps for processing influence line results and determining forces in elements

Для визначення зусиль під колісними навантаженнями моделей АК та НК, згідно з принципами розрахунку за лініями впливу, необхідно визначити ординати під точками прикладання зосередженого навантаження. Але в процесі пакетного експорту даних із ЛІРА–САПР втрачається інформація про геометричну форму лінії впливу для кожного елемента. Тому для вирішення цього питання застосовано аналітичні формули, що описують зусилля згідно з положеннями будівельної механіки. Форми ліній впливу подано в табл. 1.

Таблиця 1

Форми лінії впливу зусиль у верхньому поясі

Table 1

Shapes of influence lines for forces in the upper chord

№ з/п	Вид зусилля	Форма лінії впливу	Розташування колісного навантаження
1	N	Трикутник на розрахункову довжину прогону з максимальною ординатою посередині	На максимальній ординаті розташована найближча до центра вісь візка
2	M_y	Трикутник на довжину панелі з максимальною ординатою посередині	На максимальній ординаті розташована найближча до центра вісь візка
3	Q_z	Трикутник на довжину панелі, помножену на відношення максимальної ординати до 1. Положення максимальної ординати з краю визначеної довжини	На максимальній ординаті розташована крайня вісь візка

Група дій № 5. У межах цієї групи дій ц середовищі Mathcad реалізовано алгоритм підбору параметрів перерізів і матеріалів (рис. 12), які підлягають перевірці та аналізу відповідно до вимог нормативних документів Єврокоду.

Зазначені документи офіційно впроваджені для використання в Україні та забезпечують сучасну, науково обгрунтовану й конкурентоспроможну методологію розрахунку трубобетонних елементів [8].



Рис. 12. Дії визначення матеріалів та підбору перерізів трубобетонних елементів за Єврокодами

Fig. 12. Steps for determining materials and selecting cross-sections of concrete-filled steel tube elements according to Eurocodes

Для розрахунку трубобетонних елементів у мостових конструкціях рекомендовано застосовувати Єврокод 4, частину 2, яка в Україні імплементована як ДСТУ–Н Б EN 1994–2:2012 «Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів» [4]. Варто зазначити, що хоча вказаний нормативний документ має офіційний статус, його чинна редакція містить помилки у формулах та рекомендованих значеннях, які можуть призводити до неправильних результатів. У зв'язку з цим доцільно здійснювати перевірку

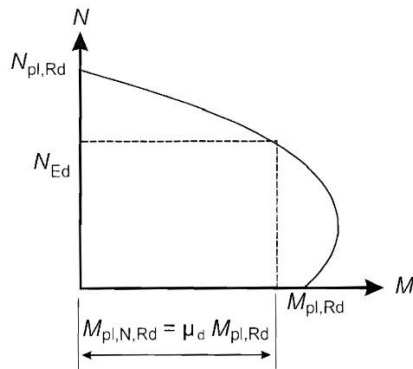
положень української версії з оригінальним текстом Єврокоду.

Розрахунок за методом Єврокоду враховує ефекти другого порядку, що виникають під час пластичної поведінки елемента внаслідок деформацій, спричинених прикладеними навантаженнями. Основною і завершальною перевіркою трубобетонних перерізів є оцінка опору елемента за умови спільної дії осьового стиску та одноосового згину. У межах цієї перевірки передбачено побудову кривих взаємодії між осьовою силою та згинальним моментом

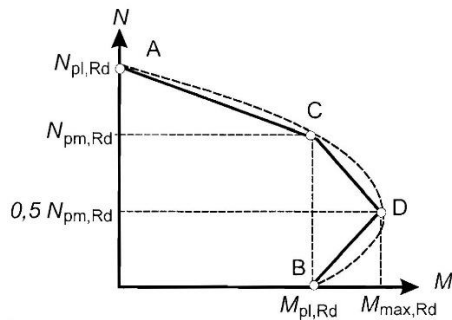
ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

(рис. 13, а). Криву взаємодії побудовану на основі чотирьох характерних точок можна подавати в спрощеному вигляді (рис. 13, б).

а – а



б – б



в – в

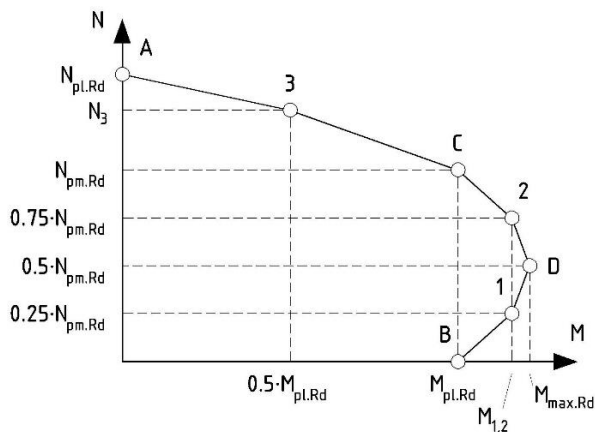


Рис. 13. Варіанти кривої взаємодії сумісного стиску та одноосового згину:
а – гладка форма; б – спрощена форма;
в – розширена спрощена форма

Fig. 13. Variants of the interaction curve for combined compression and uniaxial bending:
а – smooth form; б – simplified form;
с – extended simplified form

У наукових публікаціях [9, 12] пропонувано введення додаткової точки на відрізку А–С з метою підвищення точності апроксимації кривої. У межах цього дослідження також було прийнято рішення розмістити додаткову точку на відрізку А–С та додаткові точки на відрізках С–D та D–B (рис. 13, в). Такий підхід дозволяє більш точно відтворити допустиму область несної здатності елемента та підвищити точність визначення найефективніших поперечних перерізів під заданими значеннями внутрішніх зусиль.

Відповідно до положень п. 6.7 [4] розроблено алгоритм визначення поперечного перерізу трубобетонного елемента, що наведений на рис. 14. Геометричні параметри перерізів задають попередньо: передбачена можливість довільної генерації розмірів із заданою дискретністю та варіаціями, або використання стандартного сортаменту труб. Фізико-механічні характеристики матеріалів також задають наперед та відповідно до нормативних значень, наведених у ДБН або Єврокодах.

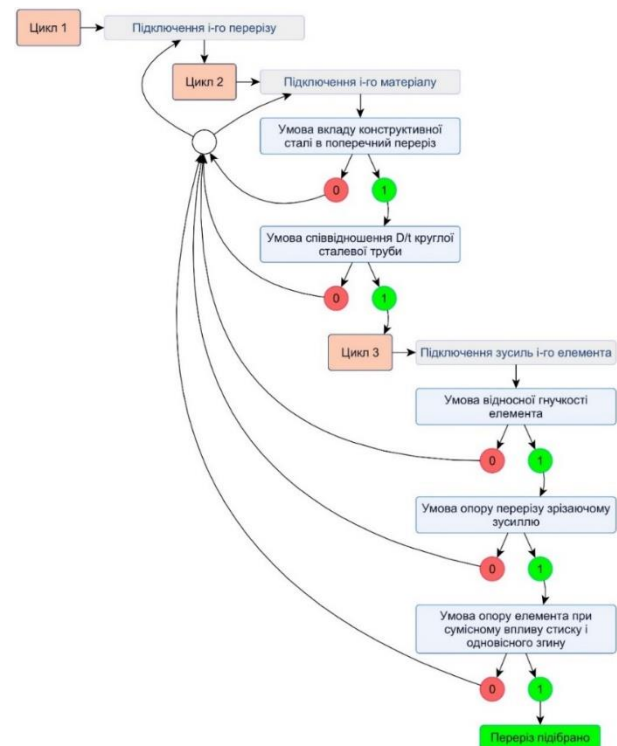


Рис. 14. Загальна схема ітераційного процесу пошуку ефективного перерізу для елемента

Fig. 14. General scheme of the iterative process for finding the efficient cross-section of an element

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Група дій № 6. Це завершальна група дій, яка відповідає фінальному етапу, передбаченому схемою дослідження (рис. 15). Результати, отримані на стадії підбору трубобетонних перерізів, підлягають подальшому аналізу з метою визначення оптимальних геометричних та конструкційних параметрів трубобетонних ферм.

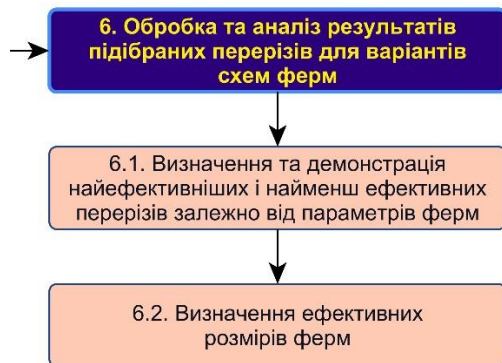


Рис. 15. Дії обробки та аналізу результатів підібраних перерізів для варіантів схем ферм

Fig. 15. Steps for processing and analyzing results of selected cross-sections for truss model variants

Результати

Для реалізації створеного алгоритму сформовано послідовність дій, що потребують ручного виконання:

1. Введення діапазону варіантів схем ферм, що підлягають генерації, для формування розрахункового документа у форматі txt та подальшого розрахунку в програмному комплексі ЛІРА–САПР.

2. За потреби – очищення раніше сформованих файлів-шаблонів, які використовують для запису нових даних.

3. Гортання документа Mathcad до розділу, в якому виконують функцію запису отриманих даних до розрахункового файлу у форматі txt для ЛІРА–САПР. На цьому етапі також здійснюють згаданий вище проміжний експорт та імпорт даних за допомогою файлу Excel.

4. Перевірка повноти записаних даних у файл формату txt, імпорт цього файлу до ЛІРА–САПР та запуск повного розрахунку шляхом активації відповідної команди – «Ви-

конати повний розрахунок».

5. Після успішного завершення розрахунку в ЛІРА–САПР виконують збереження результатів ліній впливу у форматі csv за допомогою функції створення документації і таблиць у модулі «Таблиці системи МОСТ».

6. Повернення до документа Mathcad, імпорт отриманого файлу csv з результатами ліній впливу та гортання документа до розділу, де відбувається фінальне виведення розрахункових результатів.

З урахуванням необхідності прямого втручання в керування процесом середній час виконання повного розрахунку десяти схем ферм у перерахунку на один варіант становив 2,5 хвилини. З огляду на наявний потенціал алгоритму, існують перспективи його подальшого вдосконалення з метою підвищення ефективності та скорочення часу обчислень.

Фінальним результатом підбору перерізів є узагальнена форма, у якій наведено геометричні характеристики перерізів, фізико-механічні властивості сталевих і бетонних матеріалів із відповідним позначенням їхніх класів, а також значення зусиль, що діють у заданому елементі конструкції (рис. 16).

Для візуальної перевірки передбачено відображення кривої взаємодії та відповідних зусиль. На рис. 17 представлено діаграму отриманих результатів для довільно обраного елемента. Вертикальна лінія $M_{pl.n.Rd}$ виконує функцію додаткового обмеження граничного згинального моменту на рівні дії поздовжнього зусилля N_{Ed} . Згідно з вимогами п. 6.7.3.6 [4], величина $M_{pl.n.Rd}$ завжди є меншою за фактичне значення граничного моменту, що відповідає рівню зусилля N_{Ed} .

Багаторазова перевірка фінальних та проміжних результатів, зокрема кривої взаємодії та умов перевірки відповідно до вимог Єврокоду, підтвердила достовірність отриманих результатів. Реалізований алгоритм розрахунку та задані навантаження забезпечили майже повне використання несної здатності трубобетонних елементів, що виявилось в наблизенні розрахункових зусиль до граничних значень кривої взаємодії.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

EN_AK_max_planes_1 =					
1	2	3	4	5	
"Group #"	"D [м]"	"t [м]"	"Площа сталі [м ²]"	"Площа бетону [м ²]"	
5	0.1	0.005	0.00149	0.00636	
5	0.2	0.005	0.00306	0.02835	
5	0.1	0.005	0.00149	...	
6	7	8	9	10	11
"Label"	"Оцінка"	"Group №"	"f.y [кПа]"	"f.yd [кПа]"	"t.min [мм]"
"Personal"	0.01342	1	235000	235000	0
"Personal"	0.03336	1	355000	355000	0
"Personal"	0.01342	1	235000	235000	...
12	13	14	15	16	17
"t.max [мм]"	"Grade, S"	"Label"	"Group #"	"f.ck [кПа]"	"f.cd [кПа]"
40	235	"EN, S235"	1	20000	13333.33333
40	355	"EN, S355"	1	25000	16666.66667
40	235	"EN, S235"	1	20000	...
18	19	20	21	22	23
"f.cm [кПа]"	"E.cm [кПа]"	"Grade, C"	"Label"	"Оцінка"	"Назва групи"
28000	30000000	20	"EN, C20/25"	0.91087	"Верхній пояс"
33000	31000000	25	"EN, C25/30"	1.27174	"Верхній пояс"
28000	30000000	20	"EN, C20/25"	0.91087	...
24	25	26	27	28	29
"№ групи елементів"	"№ варіанту"	"Глобальний № елементу"	"Номер перерізу"	"Елемент пройшов = NaN."	"Категорія дороги"
1	1	1	1	NaN	"Іа - 8 смуг"
1	1	5	2	NaN	"Іа - 8 смуг"
1	1	1	1	NaN	...
30	31	32	33		
Кількість основних смуг руху"	"Основні + додаткові смуги"	"M.Ed"	"N.Ed"		
8	10	1.58457	20.37599		
8	10	67.87138	22.02674		
6	8	3.40718	...		

Рис. 16. Результати визначення трубобетонних перерізів для довільних 3 елементів

Fig. 16. Results of determining concrete-filled steel tube cross-sections for three arbitrary elements

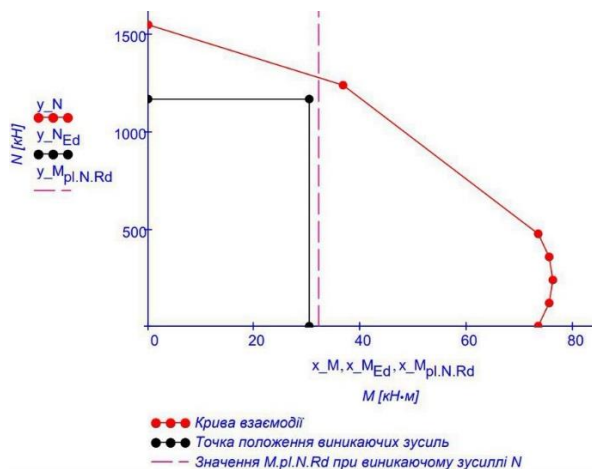


Рис. 17. Результат кривої взаємодії для одного з розрахованих елементів

Fig. 17. Interaction curve result for one of the calculated elements

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено методику пошуку оптимальних параметрів трубобетонних розрізних балкових ферм із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини, що забезпечує комплексне врахування геометричних, конструкційних характеристик і матеріалів. Наведе-

но алгоритм, реалізований із використанням програмних середовищ Mathcad та ЛІРА-САПР, дозволяє автоматизувати процес підбору перерізів фермових елементів із трубобетону, забезпечуючи при цьому обґрунтованість та повноту варіантів. Уперше запропоновано деталізовану багаторівневу структуру розрахунку трубобетонних ферм за нормативними навантаженнями ДБН, яка забезпечує достовірне чисельне моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням нормативних вимог Єврокодів.

Створено адаптивний інструмент для оптимізації фермових конструкцій у галузі мостобудування, що дозволяє скоротити витрати матеріалів та забезпечити ефективне використання трубобетону в конструкціях головних балкових ферм.

Висновки

У роботі представлено алгоритм та структуру його реалізації для пошуку раціональних трубобетонних перерізів, призначених для елементів верхнього пояса балкових ферм. Особливістю досліджуваної конструкції є верхнє розташування проїзної частини та використан-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ня трикутної решітки. На основі розробленої методики можна сформулювати такі висновки:

1. На цьому рівні розрахунків із комбінуванням Державних будівельних норм України та Єврокодів не було виявлено суперечностей між ними. Крім того, Єврокоди адаптовані в Україні як національні стандарти, що дає можливість їх вільного застосування для проектування трубобетонних конструкцій на відміну від інших зарубіжних нормативів.

2. У середовищі Mathcad розроблено автоматизований алгоритм для пакетного обчислення групи варіантів схем. Поєднання Mathcad із програмним комплексом ЛІРА–САПР забезпечило ефективний інструмент для геометричного та чисельного моделювання, що зменшує потребу у втручанні користувача в ітеративні і трудомісткі етапи розрахунків.

3. Для забезпечення більшої практичності розрахунків враховано моделі автомобільного навантаження АК, НК, а також залізничного навантаження СК з урахуванням різних конфігурацій прогонових будов – кількості площин ферм у складі прогону та кількості смуг руху.

4. Реалізований алгоритм розрахунку та застосовані навантаження забезпечили майже повне використання несної здатності трубобетонних елементів, що виявилось в наблизенні значень зусиль до граничних значень кривої взаємодії.

5. За прямого втручання в керування процесом середній час виконання повного розрахунку десяти варіантів ферм становив 2,5 хвилини на один варіант. З огляду на потенціал алгоритму існує можливість його подальшого вдосконалення з метою підвищення ефективності та пришвидшення обчислень.

6. Створена форма для виконання розрахунків є доступною для використання і внесення модифікацій і може бути адаптована до конкретних інженерних задач у межах проектування розрізних ферм. Такий підхід підвищує практичну цінність запропонованого рішення. Автоматизовані алгоритми подібного типу є невід'ємною частиною сучасного проектування, забезпечують виконання рутинних розрахунків та дозволяють зосередитись на більш творчих завданнях.

7. На цьому етапі методика побудована таким чином, що дозволяє врахувати всі можливі комбінації ферм і перерізів. Подальше уточнення алгоритму сприятиме звуженню вибірки прийнятних варіантів схем ферм. Наразі одним із пріоритетних чинників такого звуження є відсутність визначення фактичної жорсткості ферми після підбору перерізів, що створює передумови для перерозподілу напружено-деформованого стану конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балабух Я. А. Ефективність сталезалізобетонних автодорожніх мостів. *Дороги і мости*. 2010. Вип. 12. С. 16–23.
2. Городецкий А. С., Евзеров И. Д., Мельников С. Л., Мексименко В. П. *Програмний комплекс «ЛІРА-Windows»*. Київ : НДІАСБ, 1997. 658 с.
3. Гулага Б. І, Лобач Р. Б. Можливість використання структурних конструкцій для прогонових будов автодорожніх мостів. *Секція «Мости, конструкції та будівельна механіка» Збірник наукових праць 83-ї міжнародної студентської наукової конференції* (Харків, 12–16 квітня 2021 року). ХНАДУ. Харків, 2021. С. 106–119.
4. *ДСТУ-Н Б EN 1994-2:2012 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів (EN 1994-2:2005, IDT)*. [Чинний від 01.07.2013]. Київ, 2013. 120 с.
5. Корнієв М. М. *Сталеві мости: теоретичний та практичний посібник з проектування* : у 3 т. Київ : Вид-во «Ультрадрук», 2018. Т. 3. 542 с.
6. Радкевич А. В., Лісняк М. О., Горбатюк Ю. М., Лихопьок П. А. *Відновлення штучних будов*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2018. 406 с.
7. Співак Д. С., Ключник С. В. Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність конструктивних параметрів. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 1 (109). С. 152–169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/324909>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. Співак Д. С., Ключник С. В. Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з іздою зверху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 105–112.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524>
9. Albareda-Valls A., Maristany Carreras J., Calderón Valdiviezo L., Muñoz Blanc C. Implementación del efecto de pandeo en el método simplificado del ec4-1-1 para secciones tubulares mixtas. *Hormigón y Acero*. 2019. Vol. 70. Iss. 288. P. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2019.001>
10. Cho J., Moon J., Ko H.-J., Lee H.-E. Flexural strength evaluation of concrete-filled steel tube (CFST) composite girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 151. P. 12–24.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.038>
11. Ganhaizi Bridge. *HighestBridges.com*. URL: https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge (in English)
12. Ketema E., Taye S. Design chart procedures for polygonal concrete-filled steel columns under uniaxial bending. *SINET: Ethiopian Journal of Science*. 2006. Vol. 29. Iss. 1. P. 1–16.
DOI: <https://doi.org/10.4314/sinet.v29i1.18255>
13. Long Y.-L., Zeng L., Gardner L., Wade M. A. A new model for calculating the elastic local buckling stress of steel plates in square CFST columns. *Thin-Walled Structures*. 2022. Vol. 171. P. 108756.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108756>
14. Pu B., Zhou X., Liu Y., Liu B., Jiang L. Mechanical behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss bridge in the negative moment region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8. Iss. 5. P. 795–814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.002>
15. Schnabl S., Jelenić G., Planinc I. Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 115. P. 252–262.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.035>
16. 好消息！你们去川藏北线看红叶的路上，汶马高速这座桥合龙_澎湃号·政务_澎湃新闻.
URL: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2597829

D. S. SPIVAK^{1*}, S. V. KLIUCHNYK²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, 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, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

Methodology for Determining the Effective Parameters of Concrete-Filled Steel Tube Beam Trusses with Top-Deck Traffic

Purpose. This article presents a methodology for determining the effective dimensions of main beam trusses with triangular lattices and top-deck traffic arrangement using concrete-filled steel tubes. The aim of the study is to develop an algorithm that enables identification of optimal geometric and structural parameters of such trusses based on comprehensive consideration of material properties, loads, and structural element behavior. **Methodology.** The research is based on numerical modeling using Mathcad and LIRA–CAD software packages. Within its framework, a uniform search method is implemented, which ensures the generation of all possible combinations of truss parameters, their analysis, and filtering according to efficiency criteria. Special emphasis is placed on the upper chord of the trusses, made of concrete-filled steel tubes, which allows for maximum utilization of the load-bearing capacity of these elements. The calculations incorporate standard Ukrainian loads (AK, NK, CK), and verification of the operating conditions of concrete-filled steel tube elements is performed in accordance with Eurocode 4 provisions. **Results.** The developed algorithm facilitates automatic generation, verification, and filtering of variants considering load-bearing capacity limits. The validation of calculation results confirmed their compliance with regulatory requirements and effective material use. The average computation time per variant is sufficient for determining efficient concrete-filled steel tube cross-sections but is not a limiting factor and indicates potential for further optimization and acceleration of the algorithm. **Originality.** The authors propose a methodology for searching optimal parameters of segmented concrete-filled steel tube beam trusses with triangular lattices and top-deck traffic layout. For the first time, a detailed multi-level calculation structure of concrete-filled steel tube trusses under regulatory loads according to Ukrainian codes (DBN) is introduced, with element design carried out in

accordance with Eurocodes. **Practical value.** The study develops an adaptive tool aimed at optimizing concrete-filled steel tube truss structures in bridge engineering. The proposed approach contributes to reducing material consumption and ensures rational use of concrete-filled steel tubes in the elements of main beam trusses.

Keywords: concrete-filled steel tube; composite reinforced concrete beam truss; uniform search method; effective parameters; parametric analysis

REFERENCES

1. Balabuh, Ya. (2010). Efficiency of steel-reinforced road bridges. *Roads and Bridges*, 12, 16-23. (in Ukrainian)
2. Gorodetskiy, A. S., Yevzerov, I. D., Melnikov, S. L., & Meksimenko, V. P. (1997). *Programniy kompleks «LIRA-Windows»*. Kiïv: NDIASB (in Russian)
3. Gulaga, B. I., & Lobach, R. B. (2021, April). Mozhlyvist vykorystannya strukturnykh konstrukcij dlya progonovykh budov avtodorozhnix mostiv. In *Sekciya «Mosty, konstrukciyi ta budivel'na mexanika» Zbirnyk naukovykh prac 83-yi mizhnarodnoyi studentskoyi naukovoï konferenciyi* (pp. 106-119). XNADU. Kharkiv. (in Ukrainian)
4. Yevrokod 4. *Proektuvannya stalezalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 2. Zahalni pravyla i pravyla dlia mostiv (EN 1994-2:2005, IDT). 120 DSTU-N B EN 1994-2:2012*. (2013). Kyiv. (in Ukrainian)
5. Korniiiev, M. M. (2018). *Stalevi mosty: Teoretychnyi i praktychnyi posibnyk z proektuvannya* (Vols. 1-3). (Vol. 3). Kyiv: Vyd-vo «Ultradruk». (in Ukrainian)
6. Radkevych, A. V., Lisniak, M. O., Horbatiuk, Yu. M., & Lykhopiok, P. A. (2018). *Vidnovlennia shchuchnykh budov*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
7. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2025). Influence of Materials and Scale Factor on Failure of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness of Design Parameters. *Science and Transport Progress*, 1(109), 152-169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/324909> (in Ukrainian)
8. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top. *Science and Transport Progress*, 1(105), 105-112. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524> (in Ukrainian)
9. Albareda-Valls, A., Maristany Carreras, J., Calderón Valdiviezo, L., & Muñoz Blanc, C. (2019). Implementación del efecto de pandeo en el método simplificado del ec4-1-1 para secciones tubulares mixtas. *Hormigón y Acero*, 70(288), 21-33. DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2019.001> (in English)
10. Cho, J., Moon, J., Ko, H.-J., & Lee, H.-E. (2018). Flexural strength evaluation of concrete-filled steel tube (CFST) composite girder. *Journal of Constructional Steel Research*, 151, 12-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.038> (in English)
11. Ganhaizi Bridge. *HighestBridges.com*. Retrieved from https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge (in English)
12. Ketema, E., & Taye, S. (2006). Design chart procedures for polygonal concrete-filled steel columns under uniaxial bending. *SINET: Ethiopian Journal of Science*, 29(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4314/sinet.v29i1.18255> (in English)
13. Long, Y.-L., Zeng, L., Gardner, L., & Wadee, M. A. (2022). A new model for calculating the elastic local buckling stress of steel plates in square CFST columns. *Thin-Walled Structures*, 171, 108756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108756> (in English)
14. Pu, B., Zhou, X., Liu, Y., Liu, B., & Jiang, L. (2021). Mechanical behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss bridge in the negative moment region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(5), 795-814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.002> (in English)
15. Schnabl, S., Jelenić, G., & Planinc, I. (2015). Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 252-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.035> (in English)
16. 好消息！你们去川藏北线看红叶的路上，汶马高速这座桥合龙_澎湃号·政务_澎湃新闻. Retrieved from https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2597829 (in Chinese)

Надійшла до редколегії: 10.02.2025

Прийнята до друку: 13.06.2025