

УДК 624.014:624.21

Абрамов В. М., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), Україна*

АНАЛІЗ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ І ПРОЄКТУВАННЯ ДОРОЖНІХ СПОРУД ІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Анотація

Вступ. Для удосконалення методики проєктування, зокрема в частині розрахунку, об'єктів транспортного будівництва з металевих гофрованих конструкцій (МГК) зі збільшеним розміром отвору (малих мостів і шляхопроводів аркової форми, водопропускних труб під дорожнім насипом), ще порівняно нових в нашій країні, важливо мати більше уявлень про особливості існуючих підходів і їхній вплив на результати.

Проблематика. Чинні в нашій країні норми з проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу [1] містять методику аналітичного розрахунку таких споруд тільки у формі круглих труб діаметром до 6 м і вона потребує удосконалення, а споруди інших форм і розмірів цим документом рекомендовано розраховувати методом скінчених елементів (МСЕ). Удосконалювати і доповнювати існуючу нормативну аналітичну методику розрахунку споруд з МГК доцільно маючи більше уявлень про особливості існуючих підходів.

Мета і завдання. Проаналізувати деякі існуючі підходи до розрахунків аркових (та інших) дорожніх споруд з МГК, які прийнято у відповідних нормах і науково-технічній літературі і показати особливості їхнього впливу отримані результати з наданням пропозицій щодо практичного використання різних підходів ті вихідних передумов розрахунку.

Методи досліджень і результати. Розрахунково-теоретичним шляхом проаналізовано особливості впливу різних підходів і вихідних передумов на результати розрахунку дорожніх споруд з МГК, зокрема аркових. Надано пропозиції стосовно вибору підходів, прийняття найбільш адекватної і одночасно простої зрозумілої розрахункової схеми реальної споруди для подальшого удосконалення і доповнення існуючої нормативної методики.

Висновки. Надано характеристику основних з існуючих підходів до розрахунків дорожніх споруд з МГК, встановлено, як вони впливають на отримані результати. На числових прикладах показано наскільки можуть відрізнятися результати розрахунку залежно від прийнятих підходів і вихідних передумов і рівня їх адекватності реальній споруді. Надано й обґрунтовано окремі відповідні пропозиції щодо прийняття підходів до розрахунків і проєктування, які можуть бути корисні під час робіт з удосконалення існуючої нормативної методики.

Ключові слова: автомобільна дорога, арка, міст, несна здатність, опір ґрунту, розрахункова модель, споруди з МГК.

Вступ

Вважаючи на те, що фактично завжди розраховується спрощена модель реальної споруди, тобто її розрахункова схема або модель, тому важливо, щоб рівень адекватності розрахункової моделі відносно реальної споруди був найбільшим. Існують різні підходи до розрахунку споруд з МГК під дорожнім насипом, важливою особливістю яких є сумісна робота гнучких конструкцій і ґрунту. Ґрунт для таких споруд є не тільки основою, а й чинником обмеження деформацій та забезпечення потрібної несної здатності системи «споруда-ґрунт». Ці підходи складаються зі поєднання теоретичних, експериментальних та емпіричних даних.

Для удосконалення чинної нормативної методики розрахунку дорожніх споруд з МГК важливо переглянути і проаналізувати підходи і вихідні передумови, які прийнято в інших існуючих аналогічних нормативних документах, довідниках і науково-технічній літературі.

У роботі [2] було розглянуто методику і один з прикладів розрахунку аркової споруди з МГК, які містяться у довіднику США і Канади [3], наведено її коротку характеристику та порівняння результатів розрахунку за цією методикою і за способом, який викладено у [2, 4].

У даній роботі більш детально розглянуто і проаналізовано методику [3] з порівнянням її основних підходів і вихідних розрахункових передумов з деякими підходами нормативної методики [1] і пропозицій з розрахунку аркових дорожніх споруд з МГК [2, 4].

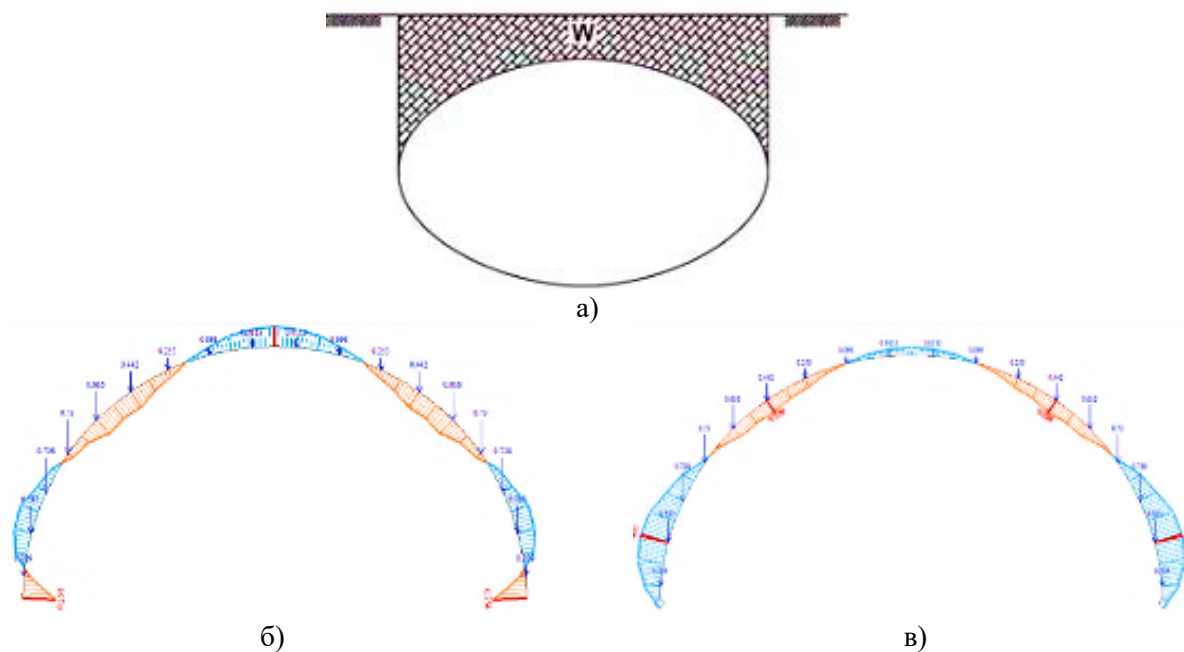
Основна частина

Оскільки спочатку (у кінці 19 століття) дорожні водопропускні споруди з МГК були тільки у формі круглих труб діаметром 1 – 2 м і інколи до 3 м, дослідження і розроблення методів розрахунку виконували саме для таких труб [1]. Сучасний відповідний довідник США і Канади [3], також містить методику розрахунку дорожніх споруд з МГК, яка базується на даних досліджень круглих труб діаметром до 3 м і яку певним чином удосконалено і пристосовано для розрахунків споруд більших розмірів і різних форм отвору, у тому числі й аркової. Процес розрахунку за цим документом складається з визначення наступних параметрів:

- мінімальної висоти засипки над спорудою;
- потрібного ущільнення ґрунту засипки;
- проектного тиску ґрунту на споруду;
- кільцевого (повздожнього) зусилля в стінках споруди;
- стискаючого напруження в стінках;
- мінімальної потрібної жорсткості споруди;
- міцності з'єднань гофрованих конструкцій.

Визначемо деякі із цих параметрів за методикою [3], проаналізуємо з порівнянням з методикою [1] і пропозиціями до складання методики з розрахунку аркових споруд з МГК [2, 4].

Згідно з методикою довідника [3] навантаження на споруду з МГК (у тому числі й аркову) від вертикального тиску ґрунту засипки приймають з урахуванням маси ґрунту не тільки вище, а й нижче рівня верху споруди, у межах всього контуру фігури «W» (рис. 1).



- б) епюра моментів (максимальне значення 2,54 кНм) від маси ґрунту тільки нижче рівня верху споруди при жорсткому обпиранні;
- в) епюра моментів (максимальне значення 3,00 кНм), за шарнірного обпирання.

Рисунок 1 — Схема до визначення навантаження на споруду з МГК від маси ґрунту за методикою [3]

При врахуванні маси ґрунту в межах контуру фігури «W», наприклад, для напівкруглої арки радіусом 3 м з гофрами 152,4 мм × 50,8 мм × 7 мм (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина

металу) при засипки висотою, наприклад, 1,3 м і 5,0 м ґрунтом з питомою вагою 18 кН/м^3 за даними розрахунків максимальний згинальний момент збільшується порівняно з навантаженням тільки від ґрунту вище верху споруди, залежно від умов обпирання і висоти засипки:

— для безшарнірної арки (із жорстким закріпленням п'ят) на 11,4 % за висоти засипки 1,3 м і на 3 % за висоти засипки 5 м;

— для двохшарнірної арки (з шарнірним закріпленням п'ят) на 15,8 % за висоти засипки 1,3 м і на 3,5 % за висоти засипки 5 м.

Дані, які наведено, показують, що вплив навантаження від ґрунту нижче верху споруди значно знижується з підвищенням висоти засипки.

У методі граничних станів, який використовують у будівельному проєктуванні в нашій країні із середини минулого століття, можливі відхилення фактичного значення навантаження на конструкції, зокрема і від тиску ґрунту, компенсуються коефіцієнтом надійності за навантаженням. Згідно з [1] цей коефіцієнт для розглянутої споруди дорівнює 1,3, тобто розрахункове навантаження (а відповідно також і внутрішні зусилля від нього у межах пружності) приймають зі збільшенням його характеристичного (нормативного) значення на 30 %, що перевищує вказане раніше підвищення моменту від навантаження за схемою на **рис. 1, а** [3] (у разі урахування ґрунту нижче рівня верху склепіння).

За методикою довідника [3] експлуатаційну придатність дорожніх споруд з МГК оцінюють за критерієм міцності саме гофрованих конструкцій. Міцність вважають забезпеченою, якщо розрахункові напруження в стінках споруди від внутрішніх зусиль (згинального моменту і повздовжньої сили) не перевищують граничного значення, яке відповідає переходу до появи в якомусь перерізі конструкції пластичних деформацій і пластичного шарніру. Вплив ґрунту дорожнього насипу, який оточує споруду, на її напружено-деформований стан визначають у цій методиці шляхом використання відповідних коефіцієнтів, які зменшують зусилля в конструкціях та їхні деформації. Перевіряють розрахунком також міцність з'єднань гофрованих елементів і згинальна жорсткість (прогин) споруди. Методика [3] доповнюється числовими прикладами розрахунку споруд різних форм отвору, зокрема й арочної. При цьому приймається питома вага ґрунту 22 кН/м^3 і модуль його деформації 12 МПа. Додаються також таблиці зі значеннями мінімальної і максимальної висоти засипки споруди залежно від її геометричних параметрів.

Згідно з даними табл. НС-9 розділу 6 довідника [3] для аркової споруди з вказаними раніше розмірами (радіус 3 м, гофри $152,4 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм} \times 7 \text{ мм}$) максимальна висота засипки складає 13 м. При цьому, вважаючи на основну розрахункову умову у цієї методики, напруження в стінках арки не перевищують допустимого значення і, як наслідок, споруда повинна знаходитися в стані статичної рівноваги.

Враховуючи те, що навантаження від транспортних засобів за висоти засипки більше 10 м втрачає своє практичне значення внаслідок його «розсіювання» в ґрунті (розподілення під кутом 30° від вертикалі), за висоти засипки 13 м ґрунтом з питомою вагою 22 кН/м^3 (як прийнято у [3]) вертикальне навантаження, рівномірно розподілене вздовж прогону, без урахування незначної частини впливу ґрунту нижче рівня верху споруди (збільшення величини моменту всього на 1,47 % порівняно з моментом від висоти засипки 13 м тільки над спорудою) і без урахування дуже незначного, за вказаної висоти засипки, впливу тимчасового навантаження (автомобіля вагою 300 кН [3]) з урахуванням власної ваги конструкцій дорівнює $286,4 \text{ кН/м}^2$.

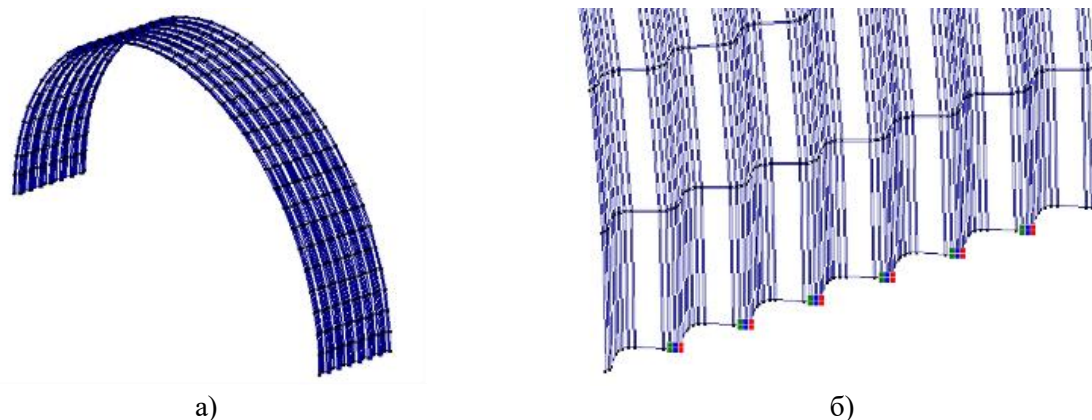
На відміну від [3] згідно з нормами [1] і методикою, запропонованою у [2, 4], постійне розрахункове навантаження на споруду, яка розглядається, приймають тільки від засипки вище верху споруди ґрунтом з питомою вагою для типового проєктування 18 кН/м^2 і з відповідним коефіцієнтом надійності.

Перевіримо несну здатність розглянутої споруди з використанням підходів і вихідних передумов, прийнятих у відповідних нормах нашої країни [1] і в методиці, яку запропоновано і викладено у [2, 4]. У цьому разі розрахункова схема, яку наведено у [2, 4], буде мати інші деякі параметри внаслідок того, що у споруди з обпиранням за схемою, наведеною у [3], максимальні переміщення стінок арки і максимальний згинальний момент виникає в стінках і визначається кутовою координатою, близько 25° від рівня п'ят.

Перерахунок розглянутої аркової споруди за іншими підходами і вихідними передумовами [1, 2, 4] виконано шляхом чисельного моделювання за МСЕ з урахуванням вказаних раніше параметрів форми гофрів.

Шляхом числового моделювання (за МСЕ) роботи розглянутої арки з гофрованого металу з урахуванням форми гофрів (без прийняття умовної прямокутної форми перерізу елементів арки еквівалентної згинальної жорсткості) отримано результати, викладені нижче.

Модель арки зібрано з пластинчастих елементів, а її обпирання прийнято нежорстким (проміжним між жорстким і шарнірним), наближеним до схеми арки відповідно до параметрів гофрів і конструкції опорного вузла, які показано у [3]. При цьому нежорстке закріплення п'ят у схемі арки моделювалося накладанням зв'язків (усуненням можливості лінійних й кутових переміщень) за всіма напрямками тільки у вузлах на вершинах (гребнях) хвиль гофрів зовнішнього боку (рис. 2).

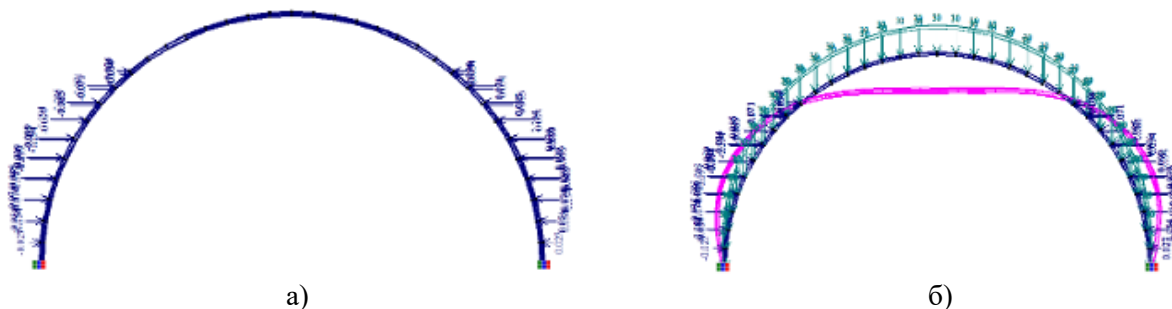


- а) розрахункова модель аркової споруди з МГК;
б) збільшене зображення опорного вузла з розміщенням зв'язків для нежорсткого закріплення.

Рисунок 2 — Розрахункова модель аркової споруди з МГК

Звичайним підбором встановлено, що гранична допустима величина прогину даної арки від дії рівномірно розподіленого вздовж прогону навантаження за критерієм не перевищення напруженнями в конструкціях граничного значення (розрахункового опору металу конструкцій 230 МПа, як у прикладі розрахунку такої арки у [3], складає 53 мм з максимальним горизонтальним переміщенням стінок 36 мм.

Опір ґрунту з модулем деформації 30 МПа (мінімально допустимим за нормами [1]) змодельований прикладанням горизонтальних сил у відповідних вузлах моделі, які визначали пропорційними переміщенням цих вузлів (прийнятих за даними про переміщення вузлів моделі арки за МСЕ з використанням ПК ЛІРА САПР), згідно з методикою [2, 4] (рис. 3).



- а) схема моделювання опору ґрунту прикладанням сил, пропорційних переміщенням;
б) схема роботи арки при дії тиску ґрунту — вертикального активного та горизонтального пасивного опору переміщенням в допустимому деформованому стані.

Рисунок 3 — Схема моделювання опору ґрунту прикладанням сил, пропорційних переміщенням

Несну здатність даної арки в системі «споруда-грунт» визначено як величину навантаження на арку, яке відповідає умовам не перевищення прогином визначеної допустимої величини (53 мм) при пов'язаних з прогином величинах переміщень стінок та пропорційних переміщень стінок, силах опору ґрунту [2, 4] і не перевищення напруженнями в конструкціях розрахункового опору металу (230 МПа). Визначено таким чином, що несна здатність складає 300 кН/м^2 , що має досить малу, допустиму у практичних розрахунках розбіжність (2,4 %) із розрахунковим навантаженням ($307,7 \text{ кН/м}^2$) на арку від засипки висотою 13 м ґрунтом з питомою вагою 18 кН/м^3 , від власної ваги конструкцій та тимчасового навантаження за схемою НК-100 з коефіцієнтами надійності 1,3, 1,05 і 1,1, відповідно для маси ґрунту, власної ваги конструкцій і розрахункового тимчасового навантаження НК-100.

Результати розрахунку розглянутої арки за різних закріплень п'ят (жорсткому, шарнірному і нежорсткому (приблизно проміжному між жорстким і шарнірним), які змодельовані накладанням відповідних зв'язків в опорних перерізах арки) показують, що, за інших рівних умов, найбільш раціональним за критерієм найменших напружень у стінках арки є нежорстке закріплення, змодельоване усуненням можливості лінійних й кутових переміщень за всіма напрямками тільки у вузлах моделі арки на вершинах (гребенях) хвиль гофрів зовнішнього боку (рис. 2). Порівняно з таким нежорстким обпиранням п'ят (яке близьке до конструкції опорного вузла, показаного у [3]) напруження за жорсткого і шарнірного обпирання більше, відповідно на 14,3 % і на 4,8 % (рис. 4 – 6).

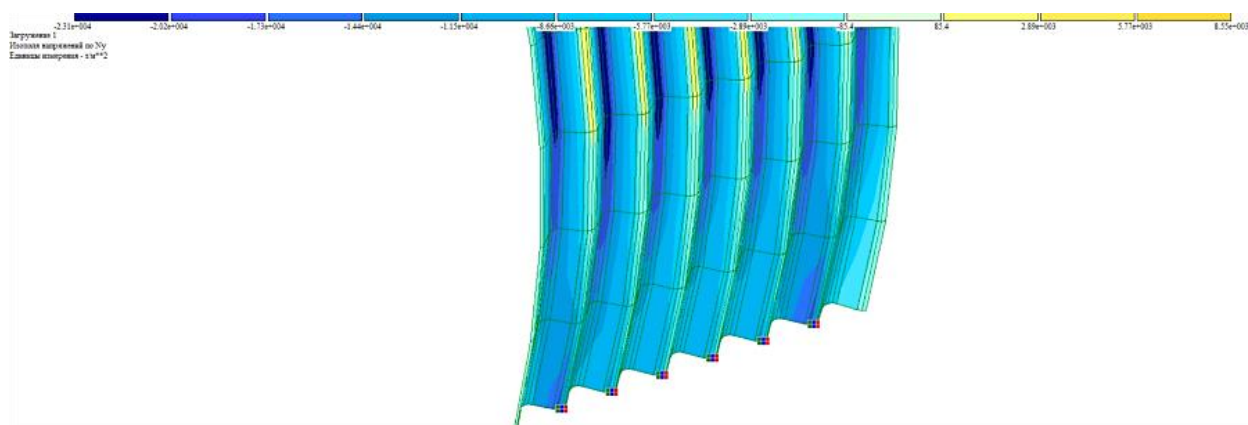


Рисунок 4 — Напруження (ізополя) за нежорсткого закріплення п'ят (максимальне значення – 231 МПа)

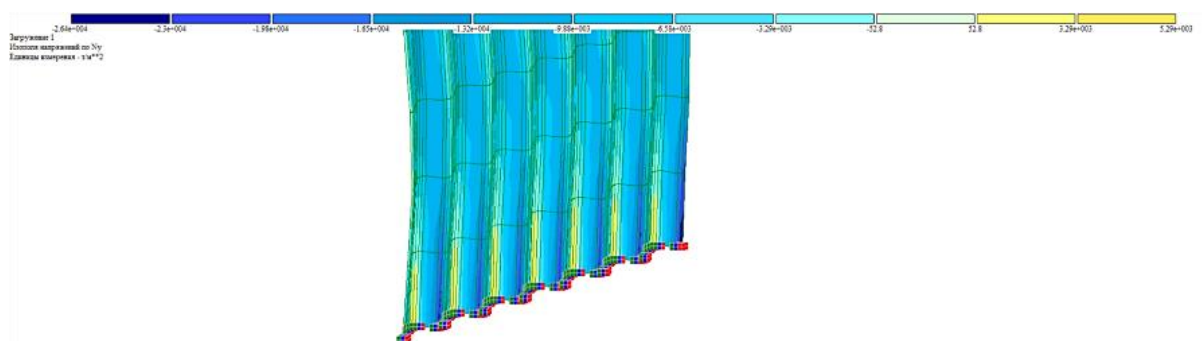


Рисунок 5 — Напруження (ізополя) за жорсткого закріплення п'ят (максимальне значення – 264 МПа)

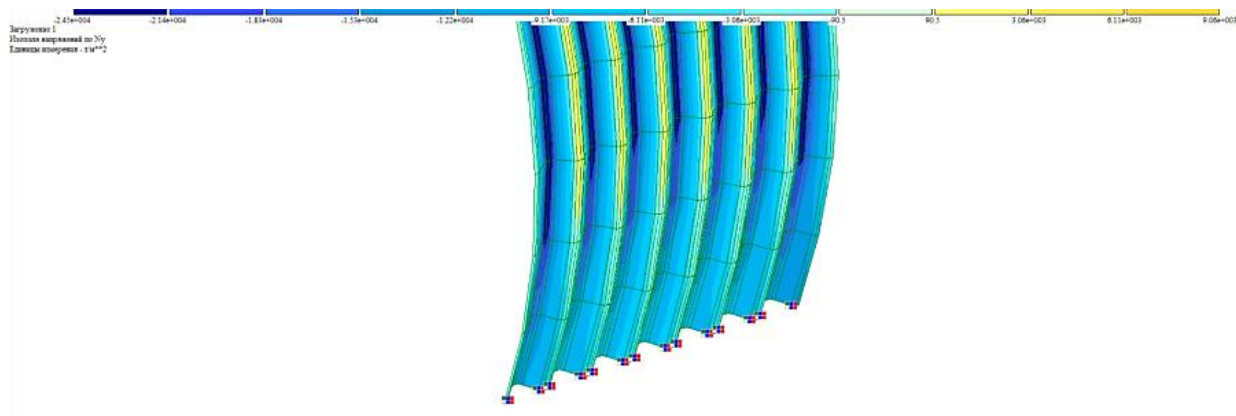


Рисунок 6 — Напруження (ізополя) за шарнірного закріплення п'ят (максимальне значення — 245 МПа)

Висновки

Визначення вертикального навантаження від тиску ґрунту на дорожні споруди з МГК з врахуванням додатково ґрунту вище верху споруди і ґрунту нижче її верху (як прийнято у [3]) для розрахунків методом граничних станів [1, 2, 4] не має практичного значення — це компенсується коефіцієнтом надійності за навантаженням.

За різних підходів до визначення опору ґрунту деформаціям гнучкої споруди з МГК (використанням коефіцієнтів, які знижують згинальний момент і поздовжню силу в стінках споруди [3] і як пасивний опір переміщенням за правилами механіки ґрунтів і будівельної механіки [2, 4]) величини несної здатності, наприклад аркової споруди, досить близькі (у розглянутому в статті прикладі розрахунку розбіжність складає 2,4 %).

За даними розрахунку найбільш раціональним (за критерієм найменших напружень в конструкціях) закріпленням п'ят аркової споруди з МГК, порівняно із жорстким, як розглянуто в [2, 4], або шарнірним, як показано у [1], є нежорстке закріплення, на болтах у вершинах (на гребенях) хвиль гофрів зовнішнього боку (наприклад, як показано у [3]).

Викладені результати аналізу можуть бути корисними для роботи з удосконалення і доповнення чинних норм з проєктування дорожніх споруд з МГК.

Список літератури

1. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проєктування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 49 с. (Інформація та документація).
2. Абрамов В. М. Порівняння способів розрахунку аркових споруд з гофрованого металу під дорожнім насипом. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2024. Вип. 3(107). С. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt3202424>.
3. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Washington, DC, USA. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute. Cambridge, Ontario, Canada, 2010. 470 p.
4. Абрамов В. М. Аналітичні і скінчено-елементні розрахунки дорожніх споруд різних форм з гофрованого металу за деформаційним критерієм. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 31. С. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.234>.

References

1. VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnyctvo sporud z metalevikh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannya. (VBN V.2.3-218-198:2007 Transport structures. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways). Kyiv, 2007. 49 p. [in Ukrainian].
2. Abramov V. M. Porivnyannya sposobiv rozrakhunku arcovykh sporud z hofrovanoho metalu pid dorozhnim nasypom (Comparison of methods for calculating arch structures made of corrugated

metal under road embankments). *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky: zb. nauk. prats. Rivne*: 2024. Vyp. 3(107). P. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt3202424> [in Ukrainian].

3. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Washington, DC, USA. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute. Cambridge, Ontario, Canada, 2010. 470 p. [in English].

4. Abramov V. M. Analitychni i ckincheno-elementni rozrahunky dorozhnikh sporud riznykh form z hofrovanoho metalu za deformatsynym kryteriem. (Analytical and finite element calculations of road structures of different forms from corrugated metal according to the deformation criterion). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2025. Issue 31. P. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.234> [in Ukrainian].

Volodymyr Abramov, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>

Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), Ukraine

ANALYSIS OF DIFFERENT APPROACHES TO THE CALCULATION AND DESIGN OF ROAD STRUCTURES FROM CORRUGATED METAL

Abstract

Introduction. In order to improve the design methodology, particularly in the calculation of transport construction objects made of metal corrugated structures (MCS) with increased hole size (small bridges and arch-shaped overpasses, drainage pipes under road embankments), which are still relatively new in our country, it is important to have a better understanding of the features of different approaches to calculation and their impact on the results.

Problem Statement. The current regulatory and methodological documents in our country concerning the design of road structures made of corrugated metal [1] include a methodology for analytical calculation of such structures only in the form of round pipes with a diameter of up to 6 meters and it requires improvement, while structures of other shapes and sizes are recommended to be calculated using the finite element method (FEM). It is advisable to improve and supplement the existing normative analytical methodology for calculating structures made of corrugated metal with a better understanding of the characteristics of existing approaches.

Purpose. To analyze some existing approaches to the calculations of arch (and other) road structures with the help of finite element methods, which are accepted in the relevant standards and scientific-technical literature, and to show the peculiarities of their influence on the results obtained, along with providing proposals for the practical use of various approaches and the initial assumptions of the calculations – this is the goal and objectives of this article.

Research methods and results. The characteristics of the influence of different approaches and initial prerequisites on the results of the calculation of road structures with MCS, in particular arches, were analyzed using a computational-theoretical method. Suggestions were provided regarding the choice of approaches, as well as the adoption of the most adequate and simultaneously simple and understandable calculation scheme for a real structure for further improvement and enhancement of the existing regulatory methodology.

Conclusions. The characteristics of the main existing approaches to the calculations of road structures with MCS have been provided, and it has been established how they affect the obtained results. Numerous examples demonstrate how much the calculation results can differ depending on the chosen approaches and initial assumptions, as well as their adequacy to the real structure. Specific relevant proposals regarding the adoption of approaches to calculations and design, which may be useful in improving the existing regulatory methodology, have been provided and justified.

Keywords: road, bridge, structures with MCS, arch, calculation model, ground supports, bearing capacity.