

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*

МЕТОДИКА ПРАКТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ АРКОВИХ ДОРОЖНІХ СПОРУД ІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Анотація

Вступ. Для поширення в практику транспортного будівництва дорожніх споруд з гофрованого металу під насипом, які вже давно й успішно використовують в різних країнах світу замість малих і середніх мостів, шляхопроводів, водопропускних труб традиційних типів з масивних конструкцій, важливою є наявність відповідних нормативно-методичних документів і посібників, необхідних для їхнього проектування, зокрема у частині розрахунків.

Проблематика. У чинних нормативно-методичних документах з проектування дорожніх споруд з гофрованого металу відсутні дані стосовно аналітичного розрахунку таких споруд аркової форми, є тільки посилання на використання методу скінчених елементів (МСЕ). Проте такі споруди саме аркової форми з гофрованого металу під дорожнім насипом є досить раціональною альтернативою малих мостів з типових масивних конструкцій внаслідок більш привабливих техніко-економічних показників.

Мета і завдання. Надання пропозиції щодо складання методики спрощеного аналітичного розрахунку розглянутих споруд з наведенням всіх потрібних для її практичного використання складових, частково викладених раніше в окремих статтях, з додаванням числового прикладу використання цієї методики — є основною метою і завданням даної роботи.

Методи досліджень і результати. Розрахунково-теоретичні дослідження спрямовані на доповнення уявлень про особливості і закономірності роботи гнучкого аркового склепіння (арки, за умовами плоскої задачі) під дорожнім насипом, які покладено в основу розрахунків, надано деякі пропозиції й уточнення (стосовно визначення еквівалентного тимчасового навантаження, стосовно схеми опору ґрунту тощо).

Висновки. Надана методика практичного розрахунку аркових дорожніх споруд з гофрованого металу на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів та підземних споруд. А також проста зрозуміла розрахункова схема, яка наближена до дійсної роботи такої конструкції в натурних і лабораторних умовах.

Ключові слова: автомобільна дорога, аркова споруда, гофрований метал, міст, МСЕ, насип, несна здатність, опір ґрунту, прогин, труба.

Вступ

Поширення у практику транспортного будівництва дорожніх споруд з гофрованого металу під насипом, які є раціональною альтернативою малих і середніх мостів, шляхопроводів, водопропускних труб традиційних типів з масивних конструкцій, є достатньо актуальним і потребує наявності відповідних нормативно-методичних документів та посібників з проектування.

Для доповнення й удосконалення існуючої нормативно-методичної документації з цих питань [1], особливо у частині розрахунків, важливо продовжувати теоретичні й експериментальні дослідження і розробки з метою створення достатньо повних і коректних методів практичних розрахунків, у тому числі аналітичних, на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд та простих зрозумілих розрахункових моделей, наближених до реальних схем роботи таких об'єктів.

У частині розрахунків є підстави для корегування і доповнень наступних розділів існуючих норм [1]:

- визначення еквівалентного (рівномірно розподіленого вздовж всього прогону або отвору) тимчасового навантаження для споруд різних форм, доцільне з урахуванням відомих закономірностей розподілу цього навантаження в ґрунті (заміна його «еквівалентним» шаром ґрунту, як прийнято в існуючих нормах, не коректна, тому, що тиск в ґрунті від тимчасового навантаження його поверхні з глибиною розсіюється і зменшується, а від маси ґрунту – зростає);

- посилення на лінії впливу для тимчасового навантаження, які є у нормах, слід доповнити даними про їхні форми, про те, для якого саме зусилля створена дана лінія впливу, про її ординати і площу її ділянок;

- основну розрахункову умову визначення несної здатності споруди слід прийняти з урахуванням її натурної схеми роботи — переважно на згин (зі стиском), а не тільки на стиск, як прийнято в нормах;

- визначення граничного допустимого прогину споруди пов'язувати з величиною можливого граничного допустимого осідання дорожнього покриття над спорудою.

У даній статті пропонується методика практичного розрахунку з рішенням зазначених питань для аркових споруд, але аналогічні підходи можливі і для споруд інших форм.

Основна частина

Вихідні передумови розрахунку

Частково основні вихідні положення методики розрахунку було викладено раніше в окремих статтях [2, 3], але зараз це викладено з уточненнями, доповненнями й об'єднанням.

Виходячи з відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд, а також з досвіду обстежень і досліджень, схему роботи і розрахунку гнучкого аркового склепіння (за умовами плоскої задачі — арки) під насипом є підстави вважати такою:

- на початковому етапі засипання арки діє активний бічний тиск ґрунту на її стінки;
- по мірі відсипання насипу над аркою зростає активний вертикальний тиск ґрунту й арка прогинається (що допустимо за умов, щоб можливе локальне осідання поверхні дорожнього покриття над аркою з прогином не перевищувало допустимої величини [2]), а її стінки переміщуються у бік ґрунту [3];

- внаслідок цих переміщень активний бічний тиск ґрунту змінюється на пасивний тиск (пружний опір ґрунту переміщенням стінок арки), який обмежує її деформації і забезпечує потрібну несну здатність системи «споруда-ґрунт», значно більшу за несну здатність гнучкої арки поза ґрунтом [3];

- в межах допустимого прогину гнучкої напівкруглої арки із жорстким обпиранням п'ят схема її деформування під насипом майже така сама, як в арки поза ґрунтом під вертикальним навантаженням, рівномірно розподіленим вздовж прогону — з максимальним переміщенням стінок в точках з координатою 34° [4] від рівня п'ят;

- несну здатність арки від опору ґрунту визначають як вертикальне рівномірно розподілене навантаження, яке забезпечує її статичну рівновагу в допустимому деформованому стані (за граничного прогину), як умовному механізму з повними шарнірами (які в дійсності будуть не повними, а пластичними, згинальний момент у яких не нульовий, а дорівнює граничному моменту внутрішніх сил, що дає певний запас) у місцях найбільших згинальних моментів і переміщень, геометричну незмінність якого забезпечує опір ґрунту, пропорційний переміщенням стінок [3, 5];

- тимчасове навантаження на арку від транспортних засобів на дорозі, яке може бути розподілене фактично тільки на частині прогону, приймають у вигляді еквівалентного рівномірно розподіленого вздовж всього прогону (для спрощення розрахунку), визначеного за допомогою ліній впливу максимального зусилля (згинального моменту в опорному перерізі) ;

- величину опору ґрунту (пасивного тиску) приймають пропорційною переміщенням стінок арки і визначають з використанням встановленого розрахунками (за МСЕ) співвідношення переміщення стінок до прогину арки.

Методика розрахунку

Несна здатність гнучкої арки під насипом забезпечена, якщо виконується умова:

$$p_n + p_{m,eq} \leq (q_o + q_e)m, \quad (1)$$

де $p_n + p_{m,eq}$ — розрахункове (з відповідними коефіцієнтами надійності γ_f [6]) постійне p_n (від маси ґрунту з питомою вагою γ над аркою та від власної ваги конструкцій g) і тимчасове еквівалентне навантаження $p_{m,eq}$, рівномірно розподілене вздовж прогону ($2r$) напівкруглої арки одиничної ширини (за умовами плоскої задачі) на рівні її верху, які визначають за формулами:

$$p_n = \gamma H \gamma_f + g \gamma_f, \quad (2)$$

$$p_{m,eq} = \frac{M}{\omega_o} = \frac{p_m \omega}{\omega_o}, \quad (3)$$

де H — відстань від верху арки до верху дорожнього покриття;
 p_m — фактична величина тимчасового рівномірно розподіленого (на якійсь частині прогону) навантаження на арку на рівні її верху, яку визначають згідно з [7] за формулами:
 — при $H > h_1$, кН/м^2 (тс/м^2).

$$p_m = \frac{980}{ab_1} = \left(\frac{100}{ab_1} \right); \quad (4)$$

— при $H \leq h_1$, кН/м^2 (тс/м^2).

$$p_m = \frac{490}{ab_2} = \left(\frac{50}{ab_2} \right), \quad (5)$$

де $a = 3,8 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

$b_1 = 3,5 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

$b_2 = 1,1 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

h_1 — параметр, який визначають за схемою на **рис. 1**, залежно від товщини дорожнього покриття h_n ;

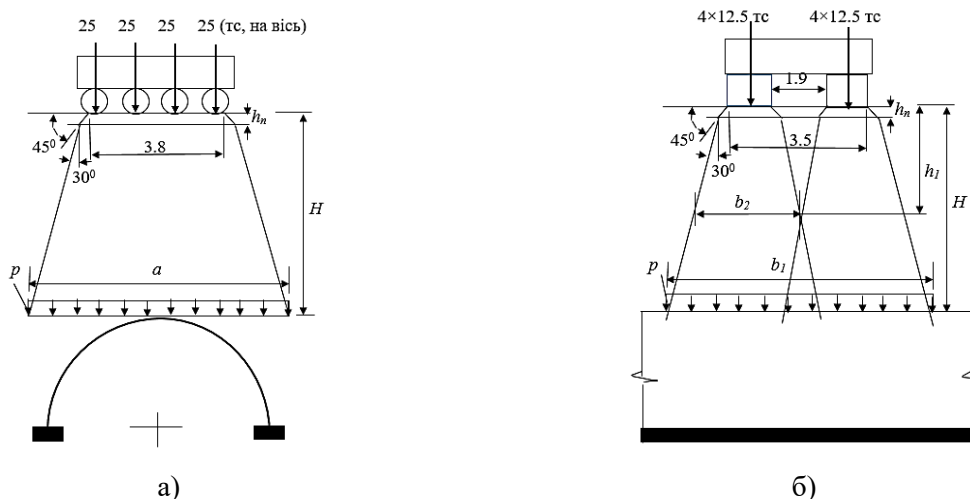


Рисунок 1 — Схеми до визначення навантаження від НК-100 на споруду під дорожнім насипом (розміри в м), переріз вздовж (а) і поперек насипу (б)

ω і ω_0 — площі лінії впливу згинального моменту в опорному (найбільш напруженому) перерізі M , відповідно, у межах фактичного розподілення на частині прогону (на довжині a , **рис. 1, а**) тимчасового рухомого навантаження p і повна площа, з урахуванням позначок її складових – вище за горизонтальну лінію «+», нижче цієї лінії «-» (**рис. 2**);

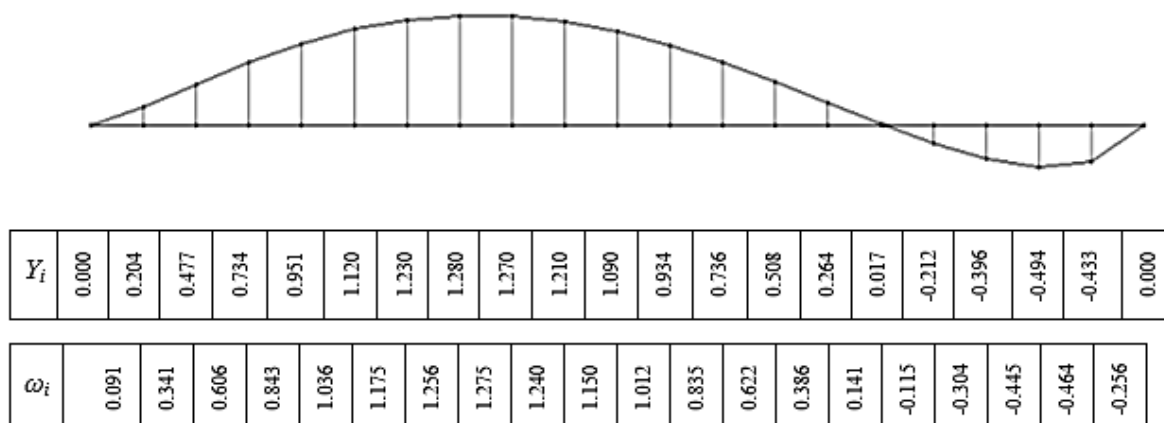


Рисунок 2 — Лінія впливу згинального моменту M в опорному перерізі напівкруглих арок різних розмірів (радіусів і перерізів) із жорстким закріпленням п'ят, її ординати (Y_i , множити на $0,1 r$) і площі (ω_i , множити на $0,01 r^2$) ділянок (довжиною $0,1 r$) між суміжними ординатами

$(q_o + q_z)t$ — відповідно, власна (поза ґрунтом) [4] несна здатність арки q_o радіусом r з металу з граничним пружним згинальним моментом M_{zp} (з границею текучості σ_m і моментом опору перерізу стінки W на одиницю ширини арки) і її несна здатність від опору ґрунту q_z з рівняння статичної рівноваги верхньої частини арки за деформованою схемою, яка аналогічна наведеним у [3], які визначають (з коефіцієнтом умов роботи $m = 0,9$) за формулами:

$$q_o = \frac{M_{zp}}{0,108r^2} = \frac{\sigma_m W}{0,108r^2}; \quad (6)$$

$$q_z = \frac{R_x c + R_z l_2}{l_2^2 - 0,5(l_2^2 - l_1^2) \frac{c}{d}}, \quad (7)$$

де $R_x = R \cos 16^\circ$ і $R_z = R \sin 16^\circ$ — відповідно, горизонтальна і вертикальна складові рівнодіючої опору ґрунту R , яка спрямована під зазначеним кутом напрямку (відносно горизонталі) векторів переміщень стінок арки (**рис. 3**);

$c = 0,44r - 1,169f_{zp}$ (на схемі, яку наведено в [3], цей параметр позначено літерою «а»);

$l_1 = 0,17r - 0,6f_{zp}$;

$l_2 = 0,83r + 0,6f_{zp}$;

$d = 0,56r + 0,169f_{zp}$;

f_{zp} — граничний прогин за умови не перевищення можливого осідання дорожнього покриття над аркою гранично допустимого значення S_{zp} з умов безпеки руху транспортних засобів, який визначають згідно з [2] за формулою:

$$f_{zp} = 1,15S_{zp} \left(0,87 + \left(\frac{H}{r} + 0,5 \right) 0,67 \right). \quad (8)$$

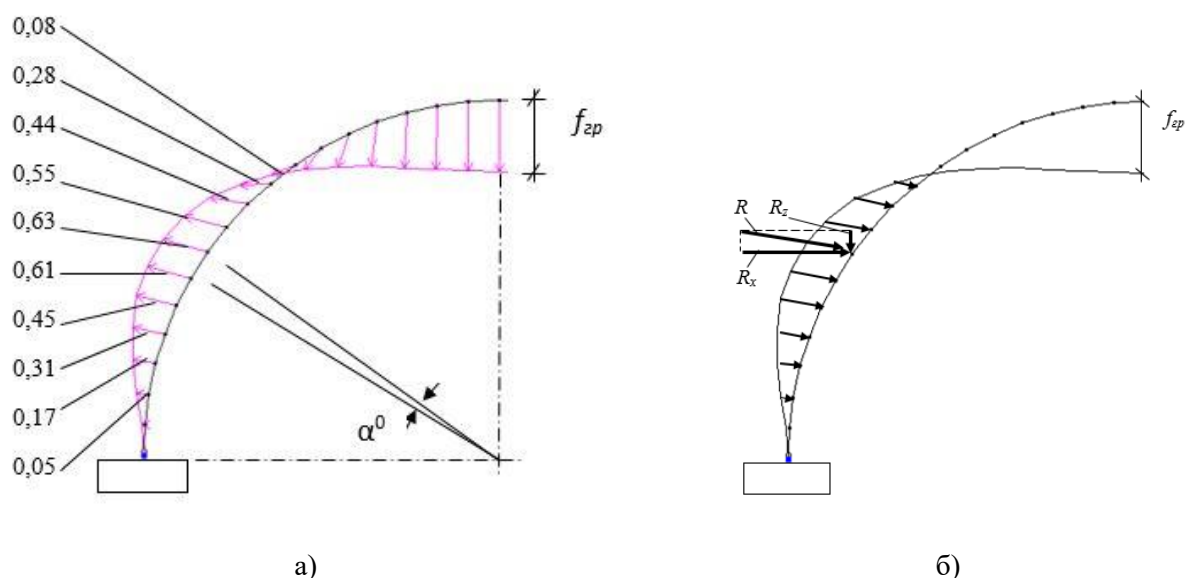


Рисунок 3 — Схема (фрагмент) розрахункових векторів переміщень арки в частках від f_{zp} при $\alpha = 5^\circ$ за МСЕ (а) та епюра (фрагмент) опору ґрунту з рівнодіючою R та її складовими R_x , R_z за рівномірного розподіленого вздовж прогону вертикального навантаження арки і допустимого прогину f_{zp} (б)

Величину рівнодіючої R опору ґрунту з модулем деформації E , коефіцієнтом Пуассона μ і коефіцієнтом постелі k (за формулою Галеркіна Б.Г.), прикладеної в точці максимальних переміщень стінок арки, визначають за формулою:

$$R = A_\delta k = A \frac{E}{(1 + \mu)r}, \quad (9)$$

де A_δ — площа епюри переміщень стінок арки з максимальною ординатою δ_{max} , пов'язаною з прогином f_{zp} (у межах пружної роботи матеріалу конструкції за результатами розрахунків $\delta_{max} = 0,63f_{zp}$, **рис. 3**), яку визначають з урахуванням встановленого розрахунковим шляхом взаємозв'язку між A_δ , r і δ_{max} за формулою:

$$A_\delta = 0,553r\delta_{max}. \quad (10)$$

Приклад розрахунку

Перевіримо несну здатність споруди з напівкруглою аркою за таких вихідних даних: радіус арки $r = 8$ м; гофра $380 \times 140 \times 7$ мм (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу); межа текучості металу $\sigma_m = 390$ МПа ($3\,900$ кг/см²); площа перерізу стінки і її момент опору, відповідно $A = 97,7$ см²/м і $W = 322,2$ см³/м; питома вага, модуль деформації і коефіцієнт Пуассона ґрунту насипу, відповідно $\gamma = 18$ кН/м³, $E = 30$ МПа, $\mu = 0,35$; висота засипки $H = 4,0$ м; тимчасове навантаження НК-100, граничне допустиме місцеве осідання дорожнього покриття (при $h_n = 0,15$ м, **рис. 1**) $S_{zp} = 4$ см [2] (дорога II категорії).

За формулами (2) – (4), (6) і (8) – (10), використовуючи лінію впливу на **рис. 2**, для арки шириною 1 м отримаємо:

$$P_n = 1,8 \cdot 4 \cdot 1,3 + 0,00977 \cdot 7,85 \cdot 1,05 = 9,36 + 0,0805 = 9,440 \text{ тс/м (94,40 кН/м);}$$

$$P_m = 100/8,566 \cdot 8,266 = 1,410 \text{ тс/м (14,10 кН/м);}$$

$$P_{m,eq} = 1,41 \cdot 5,573 / 6,672 = 1,178 \text{ тс/м (11,78 кН/м);}$$

$$q_o = 3900 \cdot 322,2 / 0,108 \cdot 800^2 = 18,18 \text{ кгс/см} = 1,820 \text{ тс/м} (18,20 \text{ кН/м});$$

$$f_{zp} = 1,15 \cdot 4 (0,87 + ((400 / 800) + 0,5) 0,67) = 7,08 \text{ см};$$

$$A_\delta = 0,553 \cdot 8 \cdot 0,63 \cdot 0,0708 = 0,197 \text{ м}^2;$$

$$R = 0,197 \cdot 3000 / 1,35 \cdot 8 = 54,72 \text{ тс} (547,2 \text{ кН});$$

$$R_x = 54,72 \cos 16^\circ = 52,600 \text{ тс} (526,00 \text{ кН});$$

$$R_z = 54,72 \sin 16^\circ = 15,083 (150,83 \text{ кН}).$$

За формулою (7), опускаючи проміжні обчислення, отримаємо (при $c = 3,437$ м; $l_1 = 1,317$ м; $l_2 = 6,683$ м і $d = 4,492$ м):

$$q_e = (52,512 \cdot 3,437 + 15,083 \cdot 6,683) / (44,662 - 0,5(44,662 - 1,734 \cdot 0,765)) = 281,586 / 22,994 = 12,23 \text{ тс/м} (122,30 \text{ кН/м}).$$

Основна розрахункова умова (1) виконується:

$$9,44 + 1,178 = 10,618 \text{ тс/м} (106,2 \text{ кН/м}) < (1,82 + 12,23) 0,9 = 12,65 \text{ тс/м} (126,60 \text{ кН/м}).$$

Додатково перевірочним розрахунком за МСЕ встановлено, що за прогину арки $f_{zp} = 7,08$ см максимальний згинальний момент складає $M_{max} = 8,67$ тм, що значно менше гранично допустимого $M = \sigma_m W = 3900 \cdot 322,2 = 1256580 \text{ кгс см} = 12,570 \text{ тм} (125,70 \text{ кНм})$, також і нормальна сила стиску $N_{max} = 124,00$ тс значно менше граничного значення: $N_{zp} = \sigma_m A = 3900 \cdot 97,7 = 381030 \text{ кгс} = 381,030 \text{ тс} (3810,00 \text{ кН})$.

Цім розрахунком також встановлено, що розбіжність значень q_e і R , які визначено за МСЕ і за аналітичним способом (відповідно, 13,10 і 56,10 та 12,23 і 54,72), складає всього близько 2,5 % (рис. 4).

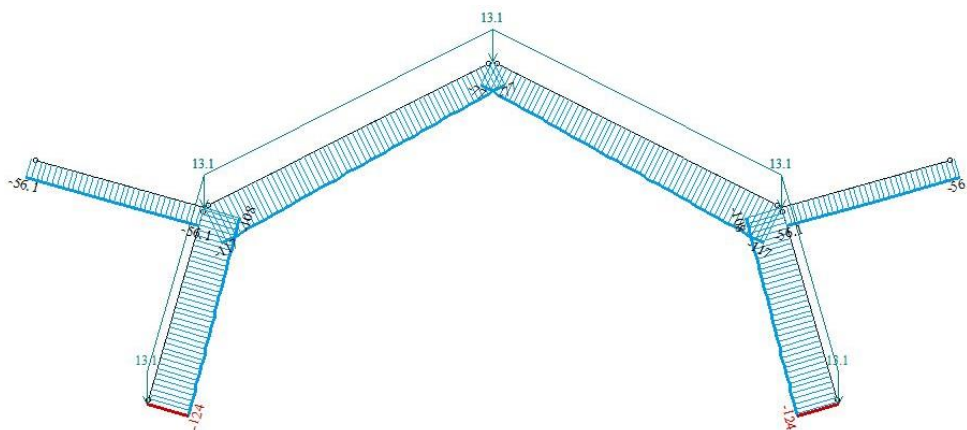


Рисунок 4 — Дані розрахунку (навантаження й епюра нормального зусилля N) за МСЕ несної здатності q_e схеми арки від опору ґрунту для порівняння з аналітичними даними

Висновки

Наведена методика практичного розрахунку несної здатності аркової дорожньої споруди з гофрованого металу на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд та простої зрозумілої розрахункової схеми. Які передбачають визначення несної здатності арки від опору ґрунту та аналізування статичної рівноваги її верхньої частини (де власне концентрується деформування й руйнування таких споруд) в допустимому деформованому стані. Наведено приклад виконання такого практичного аналітичного розрахунку, результати якого задовільно збігаються з розрахунком за МСЕ.

Аналогічно може бути розроблена методика аналітичного розрахунку таких дорожніх споруд і інших форм (еліптичної, круглої).

Для додаткового перевіряння методики доцільна її апробація, наприклад пі час випробування експериментальних об'єктів в натурних або лабораторних умовах.

Список літератури

1. ВБН В.2.3-218:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 49 с. (Інформація і документація).
2. Абрамов В. М. Граничні деформації дорожніх споруд з гофрованого металу. *Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 1 (101). С. 143–149. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt1202312>.
3. Абрамов В. М. Розрахунок несної здатності аркової дорожньої споруди аналітичним способом. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. Київ. С. 345–352. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.345>.
4. Клейн Г. К. Посібник з практичних занять з курсу будівельної механіки (статика стрижневих систем). Вища школа. 1980. 348 с.
5. Колоколов Н. М., Янковський О. Я., Щербина К. Б., Черняхівська С. Е. Металеві гофровані труби під насипами. 1973. 117 с.
6. ДБН В 1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ, 2009, 66 с. (Інформація і документація).
7. Абрамов В. М. Про тимчасове навантаження на аркові споруди з гофрованого металу під дорожнім насипом. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. Київ. С. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338>.

References

1. VBN B.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnyctvo sporud z metalivikh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystovannya (Transport constructions. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways), Kyiv. 2007. 49 p. (Information and dokumentation) [in Ukrainian].
2. Abramov V. M. Hranyichni deformatsiyi dorozhnykh sporud z hofrovanoho metalu (Boundary deformation of road structures made of corrugated metal). *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky: zb. nauk. prats*. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 1(101). P. 143–149. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt12202312> [in Ukrainian].
3. Abramov V. M. Rozrakhunok nesnoyi zdatnosti arkovoyi dorozhnoyi sporudy z hofrovanoho metalu analytychnym sposobom (Calculation of the load capacity of an arched road structure from corrugated metal by analytical metod). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 345–351. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.345> [in Ukrainian].
4. Kleyn H. K. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po kursu stroitelnoy mekhaniki (statika sterzhnevyykh system) (Guide to practical lessons on the construction mechanics course (statics of rod systems). Vysshaya shkola. 1980. 348 p. [in Ukrainian].
5. Kolokolov N. M., Yankovskyi O. A., Shcherbyna K. B., Cherniakhivska S. E. Metalevi hofrovani truby pid nasypamy (Metal corrugated pipes under embankments). Transport. 1973. 117 p. [in Ukrainian].
6. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya ta vplyvy (State Bsliding Norms (DBN V. 1.2-15:2009) Transport constructions. Bridges and pipes. Loads and impacts. Kyiv, 2009, 66 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. Abramov V. M. Pro tymchasove navantazhennya na arkovi sporuly z hofrovanoho metaiu pid dorozhnim nasypom (Abou the temporaru load on arched structures made of corrugated metal under road embankment). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338> [in Ukrainian].

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

Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (on period mortal law), Ukraine

METHODOLOGY FOR PRACTICAL CALCULATION OF ARCHED ROAD STRUCTURES MADE OF CORRUGATED METAL

Abstract

Introduction. To spread the practice of transport construction of road structures made of corrugated metal under the embankment, which have long been and successfully used in different countries of the world instead of small and medium-sized bridges, overpasses, culverts of traditional types made of massive structures, it is important to have relevant, sufficiently developed regulatory and methodological documents and manuals necessary for their design, in particular in terms of calculations.

Issues. Current regulatory and methodological documents on the design of corrugated metal road structures lack data on the analytical calculation of such arched structures (there is only a reference to the use of the finite element method). However, such arch-shaped structures made of corrugated metal under the road embankment are a fairly rational alternative to small bridges made of typical massive structures due to more attractive technical and economic indicators.

Purpose and objectives. Providing a proposal for the development of a methodology for simplified analytical calculation of the considered structures, with a list of all the components necessary for its practical use, partially described earlier in separate articles, with the addition of a numerical example of the use of this methodology — is the main purpose and objective of this work.

Research methods and results. Computational and theoretical studies have supplemented the ideas about the features and regularities of the operation of a flexible arch vault (arch, according to the conditions of a plane problem) under a road embankment, which are the basis for calculations, and some clarifications and simplifications have been added (regarding the definition of the equivalent temporary load, regarding the soil resistance scheme, etc.).

Conclusions. The possibility of compiling a methodology for practical calculation of arched road structures made of corrugated metal based on well-known laws of structural mechanics, soil mechanics and underground structures and a simple, understandable calculation scheme, which is close to the scheme of operation of such a structure in full-scale and laboratory conditions, is shown.

Keywords: road, arched structures, bridge, embankment, culvert, corrugated metal, deflection, FEM, soil support, bearing capacity.