

УДК 624.014:624.21

<https://doi.org/10.31713/vt1202632>

Абрамов В. М. [1; ORCID ID: 0000-0002-6911-5178],

к. т. н., доцент,

¹Інститут архітектури і будівництва ІФНТУНГ-ДонНАБА Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

РОЗРАХУНОК АРКОВОЇ МОСТОВОЇ СПОРУДИ З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ ЗА НЕСНОЮ ЗДАТНІСТЮ ВЕРХНЬОЇ ЧАСТИНИ (БЕЗВІДПІРНОЇ ЗОНИ)

Розглянуто питання спрощеного аналітичного розрахунку аркових мостових споруд з гофрованого металу під насипами автомобільних доріг за несною здатністю верхньої частини арки (безвідпірної зони). Відомо з досвіду обстеження технічного стану таких споруд, що саме верхня частина є характерним місцем прояву деформацій (прогину), пошкоджень і руйнування.

Існуючи відповідні нормативно-методичні документи містять правила проєктування тільки споруд у формі круглих труб, тільки діаметром до 6 м і тільки за спрощеною формулою для визначення стискаючого нормального зусилля, без урахування згину гнучкого склепіння від переважаючого вертикального тиску ґрунту насипу. І ці документи майже зовсім не містять матеріалів стосовно проєктування саме аркових споруд, які є найбільш раціональними для використання при реконструкції та відновленню зношених і пошкоджених малих мостів з типових масивних конструкцій.

На підставі удосконалення розрахункової схеми аркової мостової споруди з урахуванням наявності безвідпірної зони у верхньої частини гнучкої арки з гофрованого металу, яка визначається центральним кутом, близьким до 90°, у даній статті пропонується методика виконання розрахунку споруди за несною здатністю саме верхньої безвідпірної зони. Наведено розрахункову схему і формули визначення несної здатності аркової споруди від опору ґрунту, виходячи з умов статичної рівновазі верхньої безвідпірної зони, як тришарнірної арки, частиною розпору у якій є опор ґрунту допустимим переміщенням конструкцій. Додано формули для перевірки несної здатності арки з умови стійкості форми поперечного перерізу споруди при можливому вирівнюванні активного вертикального тиску ґрунту і

його пасивного тиску (опору переміщенням конструкцій), тобто в умовах радіального тиску і роботи без згину, тільки на кільцеву нормальну силу. Показано чисельний приклад виконання розрахунків за викладеною методикою.

Ключові слова : аркова мостова споруда, гофрований метал, опор ґрунту, несна здатність.

Стан питання і аналіз публікацій. Відсутність в чинному нормативному документі [1] матеріалів щодо розрахунків і проєктування аркових мостових споруд з гофрованого металу певною мірою стримує поширення цих досить раціональних споруд у практику транспортного будівництва. Стосовно проєктування таких споруд у формі круглих труб діючи норми теж потребують корегування. В сучасних науково-технічних періодичних виданнях висвітлюються питання огляду і аналізу раніше розроблених на підставі досліджень, виконаних ще в минулому столітті, методів розрахунку, наводяться дані про обстеження й випробування деяких з побудованих останнім часом дорожніх споруд з гофрованого металу. Але публікацій з результатами досліджень, розробок і пропозицій щодо розрахунків таких споруд саме аркової форми зовсім мало. Публікації інших країн на цю тему – це, як правило, тільки рекламні матеріали.

Мета і завдання роботи. Показати можливість складання методики спрощеного практичного розрахунку аркових мостових споруд за несною здатністю верхньої частини арки (безвідпірної зони) на підставі загальноприйнятих закономірностей статички споруд і механіки ґрунтів з використанням простої зрозумілої розрахункової схеми – є основною метою і завданням даною статті.

Основна частина. Вважаючи на те, що основні вихідні передумови і положення розрахунку аркових мостових споруд з гофрованого металу вже раніше викладено в декількох статтях [2,3] далі більш детально розглянемо розрахунок несної здатності споруди від дії опору ґрунту, за несною здатністю саме її верхньої частини (безвідпірної зони), тобто те, що стосується величини q_z у другої частини основної розрахункової умови:

$$p_n + p_m \leq (q_0 + q_z) t, \quad (1)$$

де $p_n + p_m$ – розрахункове рівномірно розподілене вздовж проєкції арки у рівні її верху навантаження, відповідно, постійне (від віги

ґрунту і від ваги конструкцій) і тимчасове (при довжині навантаження меншої, ніж довжина прольоту арки – еквівалентне [4]), на одиницю ширини арки,

$q_0 + q_z$ - відповідно, власна (поза рунтом) несна здатність арки і її несна здатність від опору ґрунту з рівнодіючою R переміщенням стінок у бік ґрунту в допустимому деформованому стані (при допустимому прогині), з коефіцієнтом умов роботи $m = 0,9$.

Величина q_0 для двошарнірної напівкруглої арки з радіусом r , розрахунковим опором матеріалу (сталі) R_{cm} і площею перерізу A на одиницю ширини арки при стисканні зі згином в пружній стадії роботи конструкцій, визначається за формулою:

$$q_0 = \frac{R_{cm}}{\frac{0,09r^2}{W} + \frac{1,05r}{A}} \quad (2)$$

Величина q_z визначається з розгляду верхньої частини споруди як тришарнірної арки, для якої існує залежність між моментом M^0 як в балці прольотом $2l_2$, розпором H і параметром d_2 (рис. 1):

$$H = \frac{M^0}{d_2}, \quad (3)$$

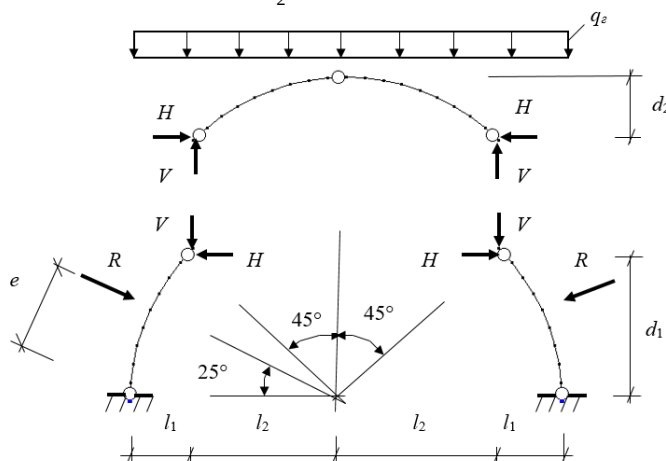


Рис. 1. Схема до розрахунку арки за несною здатністю її верхньої частини (безвідпірної зони)

Приймаємо величини H і M^0 за формулами, відповідно:

$$H = \frac{Re}{d_1} + q_z \frac{l_1^2}{2d_1} + q_z \frac{l_1 l_2}{d_1}, \quad (4)$$



$$M^0 = q_e \frac{(2l_2)^2}{8}, \quad (5)$$

Підставляючи вирази (4) і (5) в (3) отримаємо формулу для визначення q_e :

$$q_e = \frac{Re}{d_1 \left(\frac{(2l_2)^2}{8d_2} - \frac{l_1^2}{2d_1} - \frac{l_1 l_2}{d_1} \right)}, \quad (6)$$

де $e = r \cos 25^\circ$, $l_1 = d_2 = r(1 - \cos 45^\circ)$, $l_2 = d_1 = r \cos 45^\circ$ - геометричні параметри схеми арки (рис. 1).

Рівнодіюча опору ґрунту R , яку прикладено радіально в місцях найбільших переміщень стінок арки з кутовою координатою 25° від рівня п'ят, визначається за формулою:

$$R = A_e k = A_e \frac{E_e}{(1 + \mu)r}, \quad (7)$$

де A_e - об'єм (для арки шириною 1 м це чисельне те ж саме, що й площа) епюри переміщень арки у бік ґрунту;

$k = \frac{E_e}{(1 + \mu)r}$ - коефіцієнт постелі (пружності) ґрунту з модулем

деформації E_e і коефіцієнтом Пуассона μ (формула Б.Г. Гальоркіна).

Величина A_e визначається як сума результатів множення ординат епюри переміщень в частках від f_{ep} (встановлених за даними аналізу за МСЕ) на відстань між цими ординатами в частках від r [3], за формулою:

$$A_e = 0,39 f_{ep} r. \quad (8)$$

Величина граничного прогину арки f_{ep} приймається меншою з двох значень, визначених за формулами:

- за умовою не перевищення осіданням дорожнього покриття граничного значення S_{ep} [2,3]

$$f_{ep} = 1,15 S_{ep} \left(0,87 + \left(\frac{h}{r} + 0,5 \right) 0,67 \right); \quad (9)$$

- за умовою не перевищення напруженнями в конструкціях розрахункового опору матеріалу арки

$$f_{ep} = q_o \omega_{f,\Sigma}, \quad (10)$$

де $\omega_{f,\Sigma}$ - площа лінії впливу прогину арки (сумарна, з урахуванням позначок - вище за горизонтальну лінію «+», нижче «-»), приклад якої показано на рис. 2.

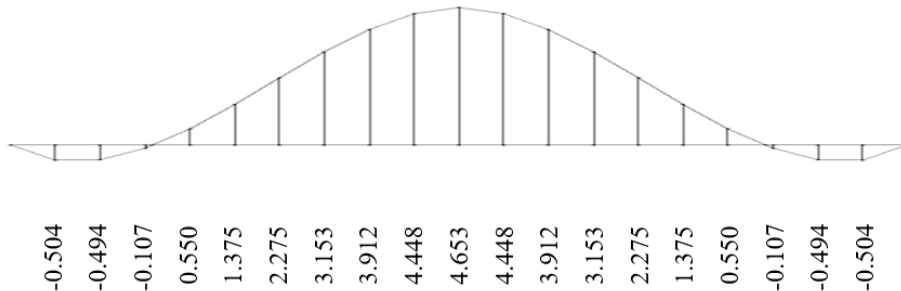


Рис. 2. Приклад лінії впливу прогину для напівкруглої двошарнірної арки радіусом 5 м з гофрами 380 × 140 × 7 (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм) з ординатами (мм) через 0,5 м

Для розрахунків арок різних радіусів і розмірів гофрів (довжина, висота хвилі, товщина металу) величини $\omega_{f,\Sigma}$ приймаються з таблиці.

Таблиця

Площі лінії впливу прогину напівкруглих двошарнірних арок, м²

При радіусі арки, м	Для гофрів з розмірами, мм				
	400 × 150 × t	380 × 140 × t	200 × 55 × t	164 × 57 × t	152,4 × 50,8 × t
2,0	-	-	-	0,003	0,004
2,5	-	-	-	0,007	0,009
3,0	-	-	-	0,014	0,019
3,5	-	-	-	0,026	0,036
4,0	0,006	0,007	0,052	0,045	0,061
4,5	0,010	0,011	0,083	-	-
5,0	0,015	0,017	0,125	-	-
5,5	0,022	0,025	0,148	-	-
6,0	0,030	0,035	0,261	-	-
6,5	0,045	0,048	-	-	-
7,0	0,058	0,065	-	-	-
7,5	0,077	0,086	-	-	-
Примітка. Дані наведено для t = 7 мм, для інших значень множити на 7/t					

За умови можливій рівності вертикального активного і пасивного тиску ґрунту (опору переміщенням стінок арки), коли навантаження наближене до рівномірного радіального тиску і діє тільки нормальна стискаюча сила $N = 1,05 q r$ в перерізах стінок арки її несна здатність за стійкістю форми, перевіряється (з коефіцієнтом умов роботи $m = 0,7$)[5] за умовою:

$$\frac{N}{A\varphi} \leq R_{cm} m, \quad (11)$$

де $\varphi = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_m}$ - коефіцієнт зниження несної здатності конструкцій при розрахунку на стійкість;

$\sigma_{кр}$ - критичне напруження (втрати стійкості), яке залежить від гнучкості λ напівкруглої арки в ґрунті (так само, як і для труб в ґрунті [5,6]) і від її співвідношення до граничної гнучкості λ_{ep} :

- при $\lambda \geq \lambda_{ep}$

$$\sigma_{ep} = \frac{12E}{\lambda^2}; \quad (12)$$

- при $\lambda < \lambda_{ep}$

$$\sigma_{кр} = \sigma_m - \frac{\sigma_m - \sigma_{н.ц.}}{12E} \sigma_{н.ц.} \lambda^2, \quad (13)$$

де $\sigma_{н.ц.}$ - границя пропорційності сталі.

Величини λ і λ_{ep} визначаються за формулами, відповідно:

$$\lambda = \frac{K 2r}{i}; \quad (14)$$

$$\lambda_{ep} = \sqrt{\frac{12E}{\sigma_{н.ц.}}}, \quad (15)$$

де K - коефіцієнт гнучкості, якій визначається за формулою:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,5B}}, \quad (16)$$

де B - параметр, якій визначається за формулою:

$$B = 0,051 \times 10^{-7} \frac{(2r)^2}{J} E_s. \quad (17)$$

Приклад. Перевірімо придатність мостовій споруди з напівкруглою аркою радіусом $r = 3,0$ м з гофрованого металу 152,4×50,8×5 з границею текучості, границею пропорційності, розрахунковим опором і модулем пружності сталі, відповідно, $\sigma_m = 240$ МПа, $\sigma_{н.ц.} = 200$ МПа, $R_{ст} = 210$ МПа і $E = 2,1 \times 10^5$ МПа для використання під насипом висотою $h = 6$ м над спорудою на автомобільній дорозі другої категорії з товщиною покриття $h_n = 0,15$ м (допустиме місцеве осідання $S = 4$ см [2,3]). Модуль деформації, коефіцієнт Пуассона і питома вага ґрунту насипу, відповідно, $E_c = 30$ МПа, $\mu = 0,3$ і $\gamma = 18$ кН/м³. Момент інерції, момент опору, площа і радіус інерції перерізу стінки арки на 1 м її ширини, відповідно, $J = 190$ см⁴/м, $W = 74,8$ см³/м, $A = 62,1$ см²/м та $i = 2,0$. Тимчасове навантаження НК-100. Коефіцієнти надійності для ваги ґрунту, ваги конструкцій і НК-100, відповідно 1,3; 1,05 і 1,1. Для розрахунку приймаємо арку шириною 1 м.

Сумарне розрахункове значення постійного і тимчасового навантаження на арку на 1 м її ширини [3] :

$$p_n + p_m = 1,8 \times 6 \times 1,3 + 0,0765 \times 1,05 + 100 \times 1,1 / (10,886 \times 10,586) = 15,07 \text{ т/м} = 150,7 \text{ кН/м}.$$

Несна здатність арки поза ґрунтом за формулою (3):

$$q_0 = 2100 / ((0,09 \times 300^2 / 74,8) + (1,05 \times 300 / 62,1)) = 18,53 \text{ кг/см} = 1,853 \text{ т/м}.$$

Граничний прогин арки приймається найменшим з визначених:

- за формулою (9)

$$f_{cp} = 1,15 \times 4 ((0,87 + (6/3) + 0,5) 0,67) = 11,7 \text{ см};$$

- за формулою і (10) і даними табл.

$$f_{cp} = 1,853 \times 0,019 \times 7/6 = 0,04 \text{ м} = 4,9 \text{ см}.$$

Площа (чисельне це теж саме, що і об'єм при ширині арки 1 м) і рівнодіюча опору ґрунту за формулами (7) і (8):

$$A_c = 0,39 \times 0,049 \times 3,0 = 0,0573 \text{ м}^2;$$

$$R = 0,0573 \times 3000 / 1,3 \times 3,0 = 44,00 \text{ тс} = 440,0 \text{ кН}.$$

Несуча здатність арки від дії опору ґрунту (при $e = 1,268$, $l_1 = d_2 = 0,879$, $l_2 = d_1 = 2,121$) за формулою (6):

$$q_c = \frac{44,0 \times 1,268}{2,121 \left(\frac{(2 \times 2,121)^2}{8 \times 0,879} - \frac{0,879^2}{2 \times 2,121} - 0,879 \right)} = 17,54 \text{ т/м} = 175,4 \text{ кН/м}.$$

Умова (1) виконується:

$$p_n + p_m = 150,7 \text{ кН/м} < (q_0 + q_z)0,9 = 174,5 \text{ кН/м.}$$

Перевіряємо умову стійкості арки за формулами (13)-(17) і (11):

$$B = (0,051 \times 600^3 / 1000000 \times 190) \times 300 = 17,39;$$

$$K = 1/\sqrt{(1+0,5 \times 17,39)} = 0,321;$$

$$\lambda = 0,321 \times 600 / 2,0 = 96,3 < \lambda_{cr} = \sqrt{(12 \times 2100000 / 2000)} = 112,2;$$

$$\sigma_{кр} = 2400 - (2400 - 2000)2000 \times 96,3^2 / 12 \times 2100000 = 21,06 \text{ МПа};$$

$$\varphi = 210,6 / 240,0 = 0,88.$$

Умова (11) виконується :

$$(175,4 + 18,53) \times 300 / 62,1 \times 0,88 = 1064,6 < 2100 \times 0,7 = 1470,0.$$

Висновки. Показано можливість складання методики спрощеного аналітичного розрахунку аркових мостових споруд з гофрованого металу за несучою здатністю верхньої частини арки-безвідпірної зони, в якій концентруються критичні деформації (прогин), пошкодження й руйнування таких споруд в ґрунті.

Додано формули для перевірки несної здатності арки за стійкістю форми поперечного перерізу споруди в умовах можливого вирівнювання активного вертикального тиску ґрунту і його пасивного тиску – опору переміщенням конструкцій та дії тільки нормальної стискаючої сили в стінках арки. Наведено чисельний приклад розрахунку за запропонованою методикою.

1. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Відомчі будівельні норми України. Київ: Укравтодор, 2007. 49 с. 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. 3. Абрамов В.М. Доповнення методики розрахунку мостових споруд з гофрованого металу з урахуванням умов кріплення конструкцій до фундаменту. *Дороги і мости*. Київ, 2026. Вип. 33. С. 218-227. 4. Абрамов В.М. Еквівалентне тимчасове навантаження для аркових мостових споруд з гофрованого металу. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 31. С. 244-249. 5. Колоколов Н.М., Янковский О.А., Щербина К.Б., Черняховская С.Э. Водопропускные трубы под насыпями. М.: Транспорт, 1973. 120 с. 6. Віноградов С.В. Расчет подземних трубопроводов на внешние нагрузки. М.: Стройиздат, 1980. 135 с.

REFERENCES:

1.VBN V.2.3-218:2007. Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. Kyiv: Ukravtodor, 2007. 49 s. 2. Abramov V.M. Porivnyannia sposobiv rozrakhunku arkovykh sporud z hofrovanoho metalu pid dorozhnim nasipom. . *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*: zb. nauk. prats. Rivne: NUVHP, 2024. Vyp. 3(107). S. 237-244. 3. Abramov V.M. Dopovnnennia metodyky rozrakhunku mostovykh sporud z hofrovanoho metalu z urakhuvannyam umov kriplennya konstruksyi do fundamentu. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2026. Vyp. 33. S. 218-227. 4. . Abramov V.M. Ekvivalentne tymchasove navantazhennia dlya arkovykh mostovykh sporud z hofrovanoho metalu. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2025. Vyp. 31. S. 244-249. 5. Kolokoljv N.M., Yankovskyi O.A., Sherbina K.B., Chernyakhovskaya S.E. Vodopropusknye truby pod nasupyamy. M.: Transport, 1973. 120 s. 6. Vinogradov S.V. Raschet podzemnykh truboprovodov na vneshnie nahruzky. M.:Stroyizdat, 1980. 135 s.

Abramov V.M. [1; ORCID ID: 0000-0002-6911-5178],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,

¹Institute of Architecture and Construction of IFNTUNG-DonNABA of
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

CALCULATION OF AN ARCH BRIDGE STRUCTURE MADE OF CORRUGATED METAL BASED ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF THE UPPER PART (WITHOUT PRESSURE-FREE ZONE)

The issue of a simplified analytical calculation of arched bridge structures made of corrugated metal under highway embankment, based on the load-bearing capacity of the upper part of the arch (the freestanding zone), has been considered it is known from the experience of Inspecting technical condition of such structures that the upper part is specifically the characteristic place where deformations (sagging), damage, and failure appear.

The existing relevant regulatory and methodological documents contain design rules only for structures in the form of circular pipes, only with a diameter of up to 6 m, and only using a simplified formula for determining the compressive normal force, without taking into account the bending of the flexible arch due to the predominant vertical pressure of the embankment soil. And these documents almost entirely do not contain materials regarding the design of

arched structures specifically, which are the most rational to use when reconstructing and restoring worn-out and damaged small bridges with typical massive structures.

Based on the improvement of the calculation scheme of an arch bridge structure taking into account the presence of a hinge-free zone in the upper part of a flexible corrugated metal arch, which is determined by a central angle close 90° , this article proposes a methodology for calculating the structure based on the load-bearing capacity of specifically the upper hinge-free zone. The calculation scheme and formulas for determining the load-bearing capacity of the arch structure from soil resistance are presented, based on the static equilibrium conditions of the upper hinge-free zone as a three-hinged arch, part of whose trust is provided by the soil supports with permissible structural displacements. Formulas have been added for checking the load-bearing capacity of the arch based on condition of the stability of the cross-sectional shape of the structure under possible equalization of the active vertical soil pressure and its passive pressure (resistance to structural displacement), that is, under radial pressure and work without bending only on the circumferential normal force. A numerical example of performing calculations according to the presented methodology is shown.

Keywords: arch bridge structure, corrugated metal, soil supports, load-bearing capacity.

Отримано: 25 січня 2026 року

Прорецензовано: 22 лютого 2026 року

Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Abramov V.M.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).