

УДК 624.014:624.21

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

ЕКВІВАЛЕНТНЕ ТИМЧАСОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ АРКОВИХ МОСТОВИХ СПОРУД З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Анотація

Вступ. Розглянуто питання практичної методики розрахунку тимчасового рухомого навантаження від транспортних засобів на аркові мостові споруди зі збільшеним розміром отвору з металевих гофрованих конструкцій (МГК) під дорожнім насипом (малі і середні мости, шляхопроводи). За результатами розрахунково-теоретичних досліджень надано пропозиції стосовно визначення тимчасового рухомого навантаження, розподіленого (через ґрунт насипу) тільки на частині прогону, до еквівалентного (за критерієм максимального згинального моменту у конструкціях арки), розподіленого вздовж всього прогону, для спрощення аналітичних розрахунків таких споруд.

Проблематика. Чинні норми з проєктування дорожніх споруд із МГК містять дані про аналітичні розрахунки споруд із МГК круглої форми з розміром отвору тільки до 6 м [1]. При такому розмірі споруди під насипом висотою більше ніж 1 м, тимчасове навантаження, наприклад за схемою НК-100 або НК-80, розповсюджується на всю довжину прогону і його приймають у розрахунках як для залізобетонних водопропускних труб під дорожнім насипом. При збільшеному прогоні споруди (10 – 20 м і більше) тимчасове навантаження за вказаними схемами може бути розподілене тільки на частині прогону. Тому виникає потреба доповнити чинні норми в частині аналітичних розрахунків, зокрема тимчасового навантаження.

Мета і завдання. Виконати дослідження і розробити пропозиції щодо можливої схеми визначення еквівалентного тимчасового рухомого навантаження для аркових споруд із МГК зі збільшеним прогоном — основна мета і завдання даної роботи.

Методи досліджень і результати. Розрахунково-теоретичний аналіз формування характеру впливу тимчасового навантаження від транспортного засобу на аркову споруду з МГК при різному положенні цього навантаження відносно центру прогону, за результатами якого надано пропозиції щодо можливої схеми визначення еквівалентного навантаження шляхом використання визначених для цього відповідних ліній впливу.

Висновки. Розроблено пропозиції щодо можливої схеми визначення еквівалентного (за критерієм максимального згинального моменту у конструкціях арки) тимчасового рухомого навантаження для аркових споруд із МГК, шляхом приведення фактичної форми навантаження (на частині прогону арки) до розподіленого вздовж всього прогону, для спрощення аналітичних розрахунків таких споруд.

Ключові слова: аркова мостова споруда, гофрований метал, еквівалентне тимчасове навантаження, лінія впливу.

Вступ

Методика аналітичного розрахунку дорожніх споруд із МГК, яка регламентована у чинних нормах з проєктування і будівництва таких об'єктів [1], розповсюджується тільки на споруди з розміром отвору до 6 м. При таких розмірах отвору споруди і висоті дорожнього насипу більше ніж 1 м, тимчасове рухоме навантаження, наприклад за схемою НК-100 або НК-80, з урахуванням їхніх геометричних параметрів і умов розподілення вертикального зовнішнього навантаження у ґрунті [2], приймають розподіленим на всю довжину прогону споруди, як на звичайні водопропускні труби із залізобетонних елементів, розміри отвору яких, як правило, не перевищують 3 м.

Сучасні дорожні споруди з елементів МГК збільшеного розміру гофрів можуть мати розмір отвору до 25 м і більше. При таких (збільшених) розмірах споруди і малої висоти насипу над нею довжина тимчасового навантаження q буде складати тільки певну частину прогону. Наприклад, при висоті насипу 1 м, довжина тимчасового навантаження на споруду від НК-100 і НК-80 буде складати приблизно тільки 5,2 м [3]. Тому під час проектування таких споруд із МГК під дорожнім насипом потрібен додатковий аналіз особливостей впливу на них тимчасового рухомого навантаження стосовно визначення розрахункового (найбільш небезпечного) розміщення цього навантаження відносно центру прогону і врахування співвідношення довжини тимчасового навантаження до довжини прогону споруди.

Для аркових дорожніх споруд з МГК з розміром отвору не більше ніж довжина тимчасового рухомого навантаження, питання визначення розрахункового розміщення цього навантаження з порівняно з впливом тільки часткового завантаження прогону з впливом при завантаженні всього прогону були раніше частково розглянуті у роботі [3].

Основна частина

У даній роботі розглянуто питання особливостей впливу тимчасового рухомого навантаження на аркові споруди зі збільшеним розміром прогону за умов розподілу навантаження лише на певну його частину, а також питання можливості приведення такого навантаження до еквівалентного, розподіленого по всьому прогоні, з метою спрощення аналітичних розрахунків таких споруд (рис. 1).

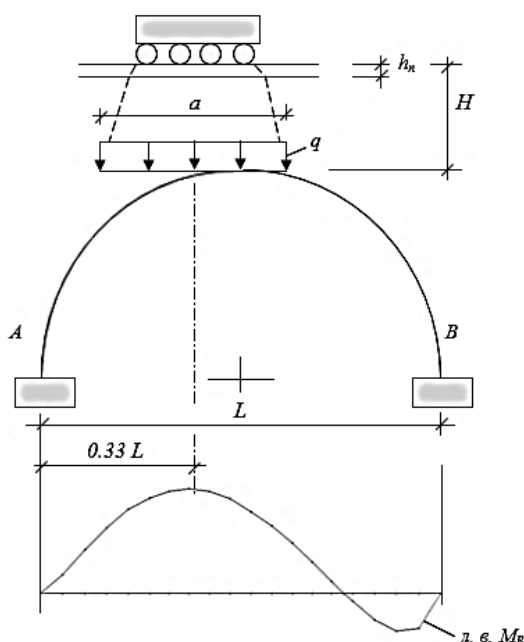


Рисунок 1 — Схема до визначення найбільш небезпечного розташування тимчасового рухомого навантаження по лінії впливу максимального згинального моменту M_B (в опорному перерізі) для напівкруглої арки з жорстким обпиранням п'ят (значення ординат не показано)

Розрахунково-теоретичним аналізом з використанням ліній впливу згинального моменту (максимального, в опорному перерізі) встановлено, що для напівкруглої арки зі збільшеним розміром прогону (коли довжина рухомого тимчасового навантаження a складає тільки частину прогону L) і з жорстким обпиранням п'ят, найбільш небезпечним є розміщення центру цього навантаження приблизно на відстані $0,33 L$ від краю прогону, над верхівкою лінії впливу.

Розрахунками встановлено, що форма лінії впливу максимального згинального моменту в опорному перерізі напівкруглої арки із жорстким обпиранням п'ят, яку побудовано звичайним

способом будівельної механіки з використанням метода скінчених елементів (МСЕ) і програмного комплексу Lira САПР і яку показано на **рис. 1**, не залежить від розмірів арки і її жорсткості. Тобто, загальна форма і розміщення максимального значення розглянутої лінії впливу (її верхівки) відносно прогону для таких арок різного радіуса і перерізу буде однаковим.

Можливо отримати величину еквівалентного тимчасового навантаження q_{eq} за критерієм максимального згинального моменту, тобто як таке рівномірно розподілене навантаження, при якому згинальний момент в опорному перерізі (для розглянутої напівкруглої арки при такому навантаженні саме в опорному перерізі згинальний момент має максимальне значення, згідно з [4] буде дорівнювати згинальному моменту у тому ж перерізі від дії фактичного тимчасового навантаження q (**рис. 1**), при його довжині a тільки на частині прогону (над верхівкою лінії впливу), але яке буде розподілене вздовж всього прогону арки (**рис. 2**).

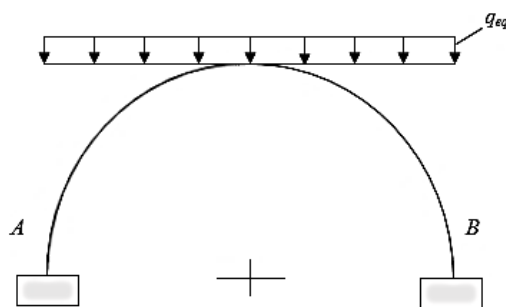


Рисунок 2 — Схема еквівалентного тимчасового рухомого навантаження для напівкруглої арки

Використовуючи лінію впливу M_B максимальну величину цього моменту при найбільш небезпечному розміщенні тимчасового навантаження q (над верхівкою лінії впливу) визначають за формулою:

$$M_B = \omega q, \quad (1)$$

де ω — площа лінії впливу у межах фактичної довжини a (**рис. 1**) тимчасового рухомого навантаження q .

Величину еквівалентного тимчасового навантаження q_{eq} використовуючи лінію впливу M_B визначають за допомогою залежності (1) за формулою:

$$q_{eq} = \frac{M_B}{\omega_0}, \quad (2)$$

де ω_0 — площа всієї лінії впливу M_B з урахуванням позначок її складових (вище за горизонтальну лінію +, нижче цієї лінії –).

Можливо також визначення величини q_{eq} на підставі отриманого за формулою (1) максимального значення M_B і теоретичного рішення статично невизначених арок, наведеного в [3], за формулою:

$$q_{eq} = \frac{M_B}{0,108r^2}. \quad (3)$$

Приклад. Припустимо, потрібно визначити величину еквівалентного рухомого навантаження від дії НК-100 для мостової споруди у формі напівкруглої арки з прогоном $L = 15$ м ($r = 7,5$ м) з МГК з розмірами гофрів $380 \times 140 \times 7$ (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина, мм, метал з границею текучості $\sigma_T = 345$ МПа) під дорожнім насипом висотою $H = 5$ м (над спорудою) з ґрунту з питомою вагою $1,8$ кН/м³.

Характеристичну (нормативну) величину фактичного тимчасового навантаження q від дії НК-100 при відстані між верхом арки та верхом дорожнього покриття $H = 5$ м, товщина покриття $h_n = 0,15$ м і параметра $h_l = 1,64 - 0,72 h_n = 1,53$ м отримаємо згідно з методикою, яку наведено в [3] (при $H > h_l$) за формулою:

$$q = \frac{100}{ab}, \quad (3)$$

де a і b — параметри навантаження q на рівні верху арки, які визначають за формулами [3]:

$$a = 3,8 + 2h_n + 1,16(H - h_n); \quad (4)$$

$$b = 3,5 + 2h_n + 1,16(H - h_n). \quad (5)$$

Використовуючи відповідні числові значення, за формулами (3), (4) і (5) отримаємо: $a = 8,76$ м; $b = 7,86$ м; $q = 1,45$ т/м² (14,5 кН/м²).

На **рис. 3** показано лінію впливу згинального моменту M_B (праворуч від осі арки).

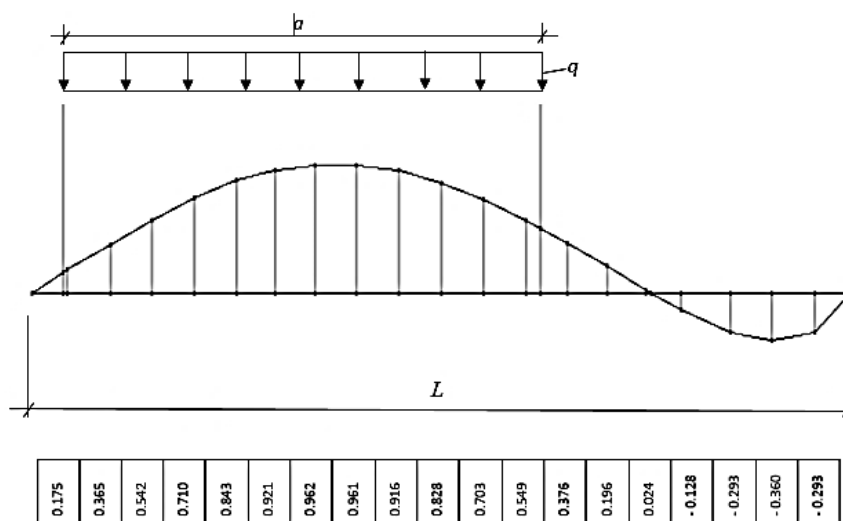


Рисунок 3 — Лінія впливу опорного згинального моменту M_B (з ординатами)

За допомогою лінії впливу, для максимального зусилля в конструкціях арки (згинального моменту M в опорному перерізі B , праворуч від осі арки), яка побудована для визначення величини еквівалентного тимчасового рухомого навантаження q_{eq} при найбільш небезпечному розміщенні фактичного навантаження q в прогоні L арки, встановлено, що найбільш небезпечним є розміщення центру фактичного тимчасового навантаження q з довжиною a над верхівкою лінії впливу, яка знаходиться на відстані $0,33 L = 0,33 \cdot 15 = 4,95$ м від лівого краю лінії впливу M_B (**рис. 3**).

Величина максимального згинального моменту M_B в опорному перерізі арки при розміщенні фактичного тимчасового рухомого навантаження q у межах довжини a (у частині прогону, над верхівкою лінії впливу) визначається з використанням побудованої лінії впливу (**рис. 3**) за формулою (1). При площі ω лінії впливу у межах довжини a фактичного тимчасового рухомого навантаження q , яку визначено як суму площ окремих частин з вказаними ординатами, і яка складає $\omega = 6,352$ м², ця величина дорівнює: $M_B = 6,352 \cdot 1,45 = 9,21$ тм (92,1 кНм).

Еквівалентне тимчасове рухоме навантаження q_{eq} (розподілене на всьому прольоті і при якому максимальний згинальний опорний момент M_B такий самий, як і при фактичному навантаженні q , розміщеному тільки в межах параметра a , визначаємо за формулою (2). При величині площі всієї лінії

впливу M_B , з урахуванням алгебраїчної суми її складових (вище за горизонтальну лінію +, нижче цієї лінії –), визначеної так само, як і ω , яка дорівнює $\omega_0 = 6,024 \text{ м}^2$, еквівалентне тимчасове рухоме навантаження складає $q_{eq} = 9,21 / 6,024 = 1,589 \text{ т/м}^2$ ($15,89 \text{ кН/м}^2$).

Для порівняння, величини q_{eq} і M_B визначені також і іншими способами — за формулою (3) і за МСЕ. Результати розрахунків наведено у **табл. 1**.

Таблиця 1

**Результати розрахунку різними способами згинального моменту M_B
і еквівалентного навантаження q_{eq}**

Спосіб розрахунку					
За лінією впливу		За формулою (3) [4]		За МСЕ	
M_B , кНм	q_{eq} , кН/м ²	M_B , кНм	q_{eq} , кН/м ²	M_B , кНм	q_{eq} , кН/м ²
92,10	15,89	–	15,16	92,30	15,44

При визначеному еквівалентному навантаженні q_{eq} і постійному навантаженні p від маси ґрунту засипки висотою 5 м, $p = 1,8 \cdot 5 = 9,0 \text{ т/м}^2$ ($90,0 \text{ кН/м}^2$), повне навантаження на споруду складає $10,589 \text{ т/м}^2$ ($105,89 \text{ кН/м}^2$), що збігається з даними про придатність подібній споруди з близькими параметрами ($380 \times 140 \times 9$, $\sigma_T = 235 \text{ МПа}$) для насипу 4 – 5 м над нею [5].

Висновки

Показано один з можливих способів визначення найбільш небезпечного розміщення тимчасового рухомого навантаження для аркових мостових споруд із МГК шляхом аналізу розміщення цього навантаження відносно прогону арки з використанням лінії впливу максимального згинального моменту в конструкціях споруди.

Наведено схему визначення еквівалентного тимчасового навантаження для розглянутих споруд із МГК за критерієм максимального згинального моменту з використанням лінії впливу цього зусилля у опорному перерізі арки.

Аналогічні підходи до визначення особливостей впливу й еквівалентної величини тимчасового рухомого навантаження для спрощення аналітичних розрахунків можливі і для споруд інших форм отвору (круглих, овальних, еліптичних тощо).

Список літератури

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. ДерждорНДІ. 2007. 49 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Норми проектування. Київ, 2006, 218 с. (Інформація та документація).
3. Абрамов В. М. Про тимчасове навантаження на аркові споруди з гофрованого металу під дорожнім насипом. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338>.
4. Клейн Г. К. Посібник з практичних занять з курсу будівельної механіки (статика стрижневих систем). Вища школа. 1980. 348 с.
5. Hengshui Yitong Pipe Industry Co., Ltd (China). URL: <https://www.corrugatedmetalculvert.com/application-in-highway-construction/> (дата звернення 29.10.2024).

References

1. VBN B.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnyctvo sporud z metalevykh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannya (Transport facilities. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways), Kyiv, 2007. 49 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. DBN B.2.3-14: 2006. Mosty ta truby. Normy proektuvannya (Bridges and pipes. Design standards) Kyiv, 2006. 218 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
 3. Kleyn H. K. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po kursu stroitel'noy mekhaniki (statika sterzhnevyykh system) (Guide to practical lessons on the construction mechanics course (statics of rod systems). Vysshaya shkola. 1980. 348 p. [in Ukrainian].
 4. Abramov V. M. Pro tymchasove navantazhennya na arkovi sporudy z hofrovanoho metalu pid dorozhnim nasypom (About the temporary load on arched structures made of corrugated metal under a road embankment). *Dorozhy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338> [in Ukrainian].
 5. Hengshui Yitong Pipe Industry Co., Ltd (China). URL: <https://www.corrugatedmetalculvert.com/application-in-highway-construction/> (data zvernennya 29.10.2024) [in English].
-

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

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

EQUIVALENT TEMPORARY LOAD FOR ARCH BRIDGE STRUCTURES MADE OF CORRUGATED METAL

Abstrakt

Introduction. The question of the practical method of calculating the temporary moving load from vehicles on arched bridge structures with an increased size of the opening made of metal corrugated structures (MCS) under the road embankment (small and medium bridges, overpasses) is considered. Based on the results of calculation and theoretical studies, proposals were made regarding the determination of the temporary moving load, distributed (through the soil of the embankment) only on part of the span, to the equivalent (according to the criterion of the maximum bending moment in arch structures), distributed along the entire span, to simplify the analytical calculations of such structures.

Problems. The current regulatory document on the design of road constructions from MCS contains data on analytical calculations of such round constructions with an opening size of only up to 6 m [1]. With this size of the structure under the embankment above it with a height of more than 1 m, the temporary load, for example according to the NK-100 or NK-80 scheme, is spread over the entire length of the span, as is accepted in the calculations of ordinary culverts under the road embankment.

With an increased span of the structure (10-20 m or more), the temporary load according to the specified schemes can be distributed only on part of the span. Therefore, there is a need to supplement the current normative document in terms of analytical calculations, in particular, temporary load.

Purpose and task. To carry out research and develop proposals for a possible scheme for determining the equivalent temporary moving load for arched structures from MCS with an increased span is the main goal and task of this work.

Research methods and results. Calculation-theoretical analysis of the formation and nature of the effect of a temporary load from a vehicle on an arched structure made of MCS at different positions of this load relative to the center of the span, based on the results of which proposals were made for a possible scheme for determining the equivalent load by using the corresponding influence lines determined for this purpose.

Conclusions. Proposals have been developed for a possible scheme for determining the equivalent (according to the criterion of maximum bending moment in arched structures) temporary moving load for arched structures made of metallic corrugated structures by reducing the actual shape of the load (on part of the arched span) to one distributed over the entire span in order to simplify the analytical calculations of such structures.

Keywords: arch bridge structure, corrugated metal, equivalent temporary load, influence line.