

Розділ 1

АНАЛІТИЧНІ ТА ЧИСЛОВІ МЕТОДИ В МЕХАНІЦІ ТА ФІЗИЦІ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 627.8.093

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД ІЗ ВРАХУВАННЯМ ДІЇ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

Й. Лучко, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-3675-0503

Львівський національний університет природокористування

В. Ковальчук, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0003-4350-1756

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.009>

Лучко Й., Ковальчук В. Розрахунок температурного поля металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд із врахуванням дії теплових потоків

Сформульовано проблему та наголошено на її актуальності. Проаналізовано літературні джерела, в яких вказано недоліки проєктування споруд із металевих гофрованих конструкцій на дію температурних впливів, що дало змогу сформулювати мету дослідження. Об'єктом досліджень температурних полів послугувала типова транспортна споруда – малий міст із металевих гофрованих конструкцій. Для визначення теплових потоків, що діють на збірні металеві гофровані конструкції в умовах експлуатації, виконано багатоваріантні вимірювання розподілу температур на поверхнях гофрованих листів транспортних споруд у різні пори року і часу доби. Температуру вимірювали тепловізором на транспортній споруді, яка експлуатується на об'їзній дорозі м. Олеська у Львівській області. Наведено результати експериментальних досліджень розподілу температури на поверхні металевого гофрованого листа при додатних та від'ємних температурах навколишнього середовища. Отримано значення теплових потоків, які діють на транспортну споруду із металевих гофрованих конструкцій залежно від температури навколишнього середовища. Встановлено, що тепловий потік, який поглинає металева гофрована конструкція, розподіляється нерівномірно за її поверхнею, а на контакті «сталь-покриття» виникає перепад теплового потоку, що може призводити до утворення пошкоджень цинкового покриття. Виявлено, що при заданні цинкового покриття товщиною 80 мкм спостерігаються відмінності розподілу температурного поля порівняно без покриття. Максимальний температурний потік без завдання покриття становить 495,8 Вт/м², а за завдання покриття – 538,1 Вт/м². Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості використання отриманих значень теплових потоків інженерними працівниками, при проєктуванні транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій та врахуванні дії теплових навантажень.

Ключові слова: металева гофрована конструкція, теплові потоки, температурне поле, метод скінченних елементів.

Luchko Y., Kovalchuk V. Calculation of the temperature field of metal corrugated structures of transport facilities with consideration of heat flows

A typical transport structure - a small bridge constructed from corrugated metal - serves as the subject for research on temperature distribution. To assess the heat flows affecting prefabricated metal corrugated structures in operational conditions, the research authors conducted multivariate temperature measurements on the surfaces of the metal sheets at different times throughout the year and times of day. These temperature measurements were taken using a thermal imager on a transport facility located on the bypass road of Olesko in Lviv region. The results from the experimental study indicate the temperature distribution on the surface of a metal corrugated sheet under both positive and negative ambient temperatures. The study quantified the heat flows impacting the transport structure made from these metal corrugated sheets in relation to the surrounding environmental temperatures. The research findings revealed that the heat flow absorbed by the metal corrugated structure is unevenly distributed across its surface. Notably, at the "steel-coating" interface, there is a significant difference in heat flow, which could potentially cause damage to the zinc coating. Observations showed that when a zinc coating of 80 microns thickness is applied, variations in the temperature field distribution occur compared to an uncoated

surface. The maximum heat flow recorded without the coating was 495.8 W/m^2 , while with the coating applied, it increased to 538.1 W/m^2 . The practical significance of this research lies in the potential application of the measured heat flow values by engineering professionals during the design of transport facilities made from metal corrugated structures, taking into account the effects of thermal loads.

Keywords: metal corrugated construction, heat flows, temperature field, finite element method.

Постановка проблеми. Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) належать до найпрогресивніших і найперспективніших видів шляхових споруд. Однак у процесі експлуатації споруди із МГК отримують пошкодження у вигляді розтріскування антикорозійного цинкового покриття (рис. 1). Однією з причин такого пошкодження є рівень температурного поля на

границях «сталь–цинк» чи «сталь–цинк–ґрунт». Цей рівень може зумовлювати те, що в літній період металева конструкція із зовнішньої сторони нагрівається до високих температур через значні теплові потоки, що проходять внутрішньою частиною споруди. Тому основою такого розрахунку є прогнозування температурного поля за допомогою математичного моделювання.



Рис. 1. Розтріскування цинкового покриття металевої гофрованої конструкції

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій складаються з багатолистових конструкцій замкнутого контуру, що збираються з окремих гофрованих листів заданого радіуса і з'єднуються болтами [1–4]. В умовах експлуатації такі споруди зазнають кліматичних температурних впливів і навантажень. Тому задачі досліджень температурного поля металевих гофрованих конструкцій, які перебувають під дією змінних температурних впливів і теплових потоків навколишнього середовища, розглядають учені в наукових працях [1–5]. Такі дослідження, поряд із вивченням впливу дії статичних та динамічних транспортних навантажень, є основою оцінки несучої здатності та надійності транспортних споруд із МГК при розрахунку на кліматичні температурні впливи [5–8]. Це дасть змогу інженерам різних організацій на стадії виконання проектних робіт при будівництві транспортних споруд із МГК враховувати вплив температурних перепадів на напружено-деформований стан таких конструкцій, а відтак – ухвалювати конструктивні рішення стосовно зменшення такого впливу на термопружний стан цих споруд.

Постановка завдання. Наше завдання – розрахунок температурного поля транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій з урахуванням дії теплових потоків.

Виклад основного матеріалу. З метою визначення теплових потоків, що діють на металеві гофровані конструкції в умовах експлуатації здійснено багатоваріантні вимірювання розподілу температур поверхнями металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд у різні пори року та години доби. Натурні експериментальні вимірювання розподілу температур проведено на транспортній споруді з металевих гофрованих конструкцій, яка експлуатується на обході м. Олеська у Львівській області (рис. 2). Температури вимірювали тепловізором.

Результати розподілу температур на поверхнях металевих гофрованих листів транспортної споруди наведено у табл. (цифрами 1–18 позначено дату та час вимірювання температури).

У результаті проведених досліджень встановлено, що значний вплив на поширення температури по поверхнях металевих гофрованих конструкцій мають метеорологічні умови навколишнього середовища. Хмарність і нічні години доби призводять до рівномірного розподілу температури по поверхні.

Із проведених експериментів встановлено максимальне значення температури поверхні гофрованого листа величиною $+38,7 \text{ }^\circ\text{C}$, а мінімальне – $-27,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Рис. 2. Металева гофрована конструкція прогоном 12 м на обході м. Олеська у Львівській області

На основі проведених експериментальних вимірювань розподілу температури на поверхнях металевих гофрованих конструкцій за методикою, що опублікована у праці [3], розраховано величини теплових потоків, які поглинаються спорудою.

Під час розрахунку теплових потоків, що підходять до металевих гофрованих конструкцій, оцінено щільність теплового потоку в умовах конвективного теплообміну за законом Ньютона, що визначається за формулою:

$$q = h_c(T_s - T_\alpha), \quad (1)$$

де T_s – розподіл температури на поверхні металевого листа конструкції; T_α – температура навколишнього середовища; h_c – коефіцієнт тепловіддачі. Значення температур на поверхні металевого листа та навколишнього середовища наведені у табл.

Таблиця

Результати експериментальних вимірювань розподілу температури на поверхнях транспортної споруди із МГК та значення теплових потоків

№ з/п	Температура повітря, T_n , °C	Температура МГК, T_c , °C	Теплові потоки, q , Вт/м ²
1	16	28,6	2996,90
2	22	30,4	2972,62
3	27	36,8	2974,16
4	28	38,7	3013,94
5	27	37,8	3059,09
6	26	32,9	2941,07
7	-16,0	-19,2	451,51
8	-10,2	-18,2	370,51
9	-9,0	-7,0	514,69
10	-6,2	-3,8	513,13
11	-8,5	-10,8	461,78
12	-16,0	-20,1	429,25
13	-17,0	-21,4	412,63
14	-17,0	-21,8	392,18
15	-21,0	-27,5	340,23
16	-16,0	-26,1	397,74
17	-10,0	-14,1	451,47
18	-7,5	-10,1	458,03

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від швидкості вітру, властивостей матеріалу та орієнтації поверхні металевих гофрованих конструкцій відносно сторін горизонту.

За дії сонячного випромінювання щільність теплового потоку на поверхні, що розташована нормально до променів, визначають за формулою:

$$I(\tau) = I_0 k_T(\tau), \quad (2)$$

де I_0 – інтенсивність сонячного випромінювання за межами атмосфери, $I_0 = 1350 \text{ Вт/м}^2$; τ – час доби, год; $k_T(\tau)$ – коефіцієнт послаблення випромінювання атмосферою.

За довільної орієнтації поверхні металевих листів випромінювання, що потрапляє на поверхню, визначають за формулою:

$$I_\gamma(\tau) = I(\tau) \sinh\left[\left(\cos \gamma + \frac{\cosh}{\sinh} \sin \gamma \cos(a_s - a_v)\right)\right], \quad (3)$$

де a_v та a_s – азимут поверхні та Сонця відповідно, рад.

Інтенсивність розсіяного випромінювання, що передається горизонтальній поверхні, визначають за формулою:

$$H(\tau) = 0,5I_0 \sinh(e^{-\alpha m} - e^{-\sigma m_u}), \quad (4)$$

де $e^{-\alpha m}$ – характеризує ослаблення випромінювання атмосферою і має значення від 0,81 до 0,91 (середнє $e^{-\alpha m} = 0,86$); $e^{-\sigma m}$ – коефіцієнт релеевського розсіювання, який залежить від висоти Сонця.

Щільність теплового потоку вторинного випромінювання визначають за формулою:

$$R(\tau) = r[I(\tau) + H(\tau)], \quad (5)$$

де r – коефіцієнт відбиття елемента поверхні місцевості, яка розглядається (альбеда).

Тепловий обмін поверхні й атмосфери описують законом Стефана-Больцмана:

$$S_A(\tau) = \varepsilon_A C(T_V^4 - T_L^4), \quad (6)$$

де T_L – температура повітря атмосфери, K ; T_V – температура поверхні, K ; ε_A – коефіцієнт випромінювання ($\varepsilon_A = 0,95$).

Результати розрахунків теплових потоків за формулами (1–6), що підходять до металевих гофрованих листів конструкції, наведено у табл. 1. Значення теплових потоків отримано за дії додатних та від’ємних температур навколишнього середовища.

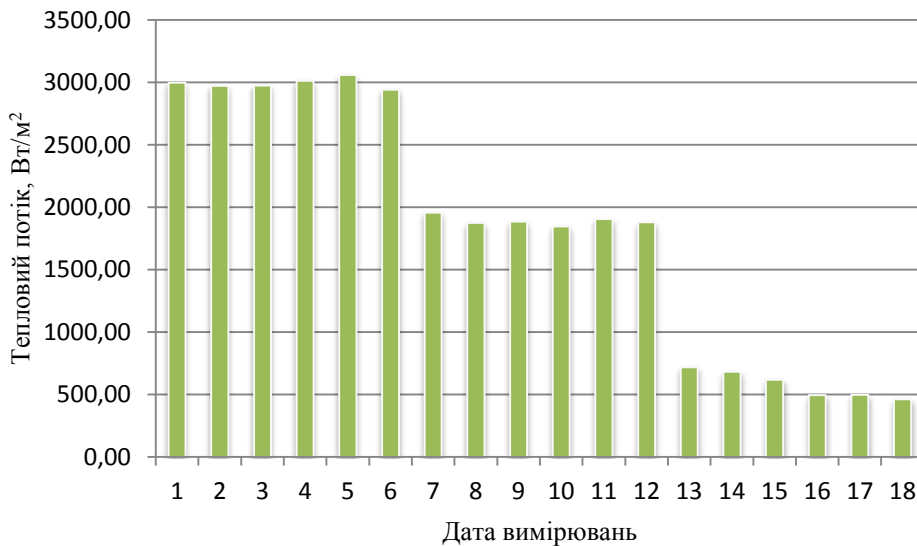


Рис. 3. Значення теплових потоків, що поглинаються транспортною спорудою із МГК

Встановлено, що величина теплового потоку, що діє у теплий сонячний день, значно вища, ніж величина теплового потоку, що діє на споруду взимку.

Максимальне значення теплового потоку, який отримує металева конструкція у літній сонячний день, зафіксовано величиною $3059,09 \text{ Вт/м}^2$.

Із результатів розрахунку теплових потоків, що діють на металеві конструкції споруди взимку, бачимо, що за мінімальних зафіксованих значень температури поверхні листа $-27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ зранку о 6:00 год. величина теплового потоку становить

340,23 Вт/м². Однак вище значення теплового потоку отримує споруда вдень. О 15.00 год. величина теплового потоку становила 458,03 Вт/м².

Далі, на основі розрахованих теплових потоків, запишемо умови теплообміну на поверхні тіла з тонким покриттям.

$$\Omega(T) = \iint_P \lambda(x, y) \left[\left(\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (7)$$

де $\lambda(x, y)$ – кусково постійна функція в ділянці P , коефіцієнт теплопровідності неоднорідного тіла.

Запишемо дискретний аналог задачі відтворення функції температури. Накладемо на ділянку P регулярну координатну сітку з кроком h_x по координаті x та кроком h_y по координаті y . Позна-

Врахувавши наукові праці [9–11], при розрахунку розподілу температурного поля виробництво ентропії записують:

чимо через $T_{i,j} = T(x_i, y_j)$, де $(x_i, y_j) \in P$ – вузлові точки сітки, що потрапили в ділянку P . Вважається, що в окремих точках $(x_i^*, y_j^*) \in P$ значення температури задаються, а для решти точок $(x_i, y_j) \in P$ їх визначаємо з умови мінімуму функціоналу $\Omega(T)$, який після дискретизації наближаємо функцією

$$\Omega(T) = \sum_i \sum_j \lambda_{i,j} \left[\left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{h_x} \right)^2 + \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{h_y} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Зауважимо, що в цій формулі наявні як задані, так і невідомі значення температури у вузлових точках. При цьому невідоме $T_{i,j}$ може трапитися чотири рази в сумі (9)

$$\Omega(T) = \dots + \lambda_{i,j} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{h_x} \right)^2 + \lambda_{i+1,j} \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{h_x} \right)^2 + \lambda_{i,j} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{h_y} \right)^2 + \lambda_{i,j+1} \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{h_y} \right)^2 + \dots,$$

Для знаходження скінченної кількості невідомих значень температури використаємо умову мінімуму квадратичної функції $\Omega(T)$. Прирівняємо до нуля похідні $\Omega(T)$ для невідомих значень $T_{i,j}$ і отримаємо для кожної з них рівняння

$$T_{i,j} \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} \right) = \frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} T_{i-1,j} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} T_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} T_{i,j-1} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} T_{i,j+1}, \quad (9)$$

де позначено $\lambda_{i,j} = \lambda(x_i, y_j)$.

Звідки невідоме $T_{i,j}$ визначається через значення у сусідніх вузлах, серед яких можуть бути відомі та невідомі

$$T_{i,j} = \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} \right)^{-1} \left(\frac{\lambda_{i,j}}{h_x^2} T_{i-1,j} + \frac{\lambda_{i+1,j}}{h_x^2} T_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i,j}}{h_y^2} T_{i,j-1} + \frac{\lambda_{i,j+1}}{h_y^2} T_{i,j+1} \right). \quad (10)$$

У разі однорідної ділянки P , коли $\lambda(x, y) = const$, формула спрощується до вигляду:

$$T_{i,j} = \left(\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right)^{-1} \left[\frac{1}{h_x^2} (T_{i-1,j} + T_{i+1,j}) + \frac{1}{h_y^2} (T_{i,j-1} + T_{i,j+1}) \right], \quad (11)$$

а при $h_x = h_y$ отримуємо формулу

$$T_{i,j} = \frac{1}{4} (T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1}). \quad (12)$$

Далі, за формулою (12) методом ітераційного процесу шукаємо значення температури у вузлах регулярної сітки.

Числові дослідження температурного поля здійснимо за значень ширини металевої оболонки 150 мм та довжини 700 мм; товщина оболонки 6 мм, а товщина цинкового покриття 80 мкм; теплопровідність сталі конструкції становить $k = 45$ Вт/(м·°С); модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$ та коефіцієнт лінійного температурного розширення $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/°С та за максимальних значень теплового потоку, які наведені в табл. 1 і на рис. 3.

Аналіз результатів розрахунку температурного поля. Розподіл температурного поля металевою оболонкою конструкції за її товщини 6 мм

наведено на рис. 4, а розподіл температурного поля при заданні цинкового покриття товщиною 80 мкм наведено на рис. 5.

На підставі виконаних досліджень встановлено, що температурне поле розподіляється нерівномірно поверхнею металевого гофрованого листа конструкції.

При заданні цинкового покриття товщиною 80 мкм спостерігаються відмінності розподілу температурного поля у порівнянні без покриття. Максимальний температурний потік без завдання покриття становить 495,8 Вт/м², а при заданні покриття – 538,1 Вт/м². Такий тепловий перепад може призводити до температурних напружень на контакті «сталь-покриття», що потребує проведення додаткових досліджень.

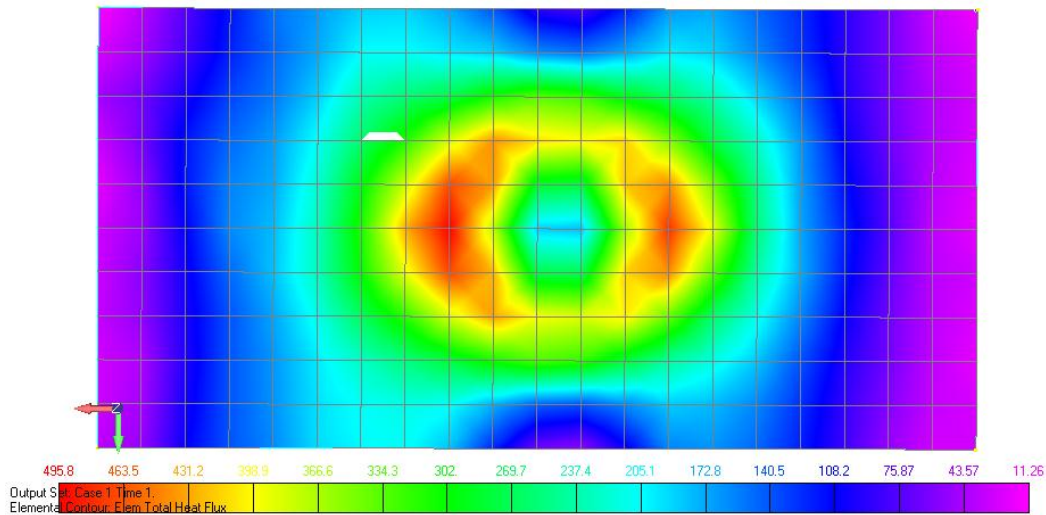


Рис. 4. Розподіл температурного поля за товщини оболонки 6 мм без цинкового покриття

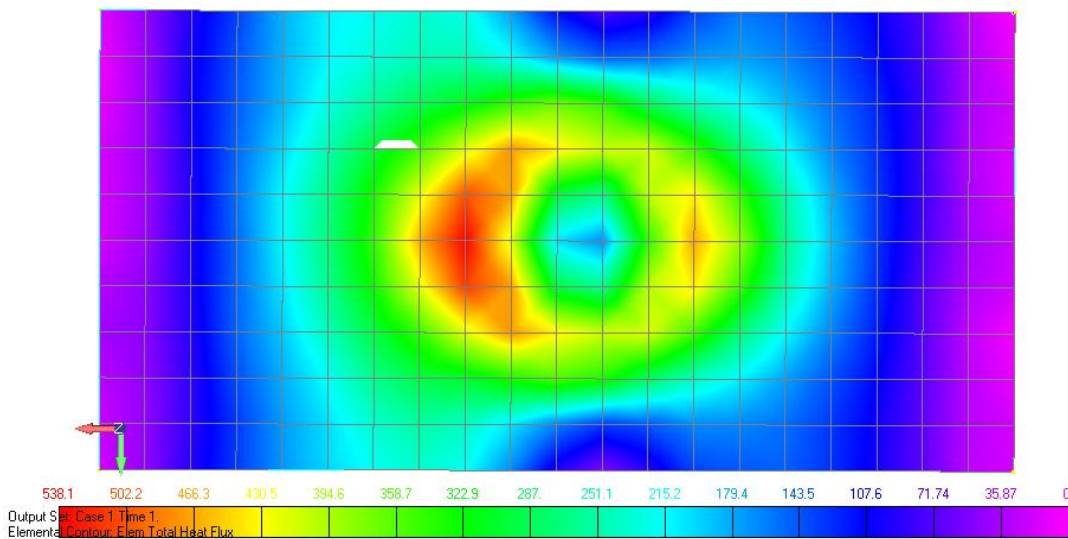


Рис. 5. Розподіл температурного поля за товщини оболонки 6 мм та цинкового покриття товщиною 80 мкм

Отож, ми вперше отримали значення теплових потоків, які діють на транспортну споруду із металевих гофрованих конструкцій залежно від температури навколишнього середовища. Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості використання отриманих значень теплових потоків, інженерними працівниками при проектуванні транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій, із урахуванням дії теплових навантажень від навколишнього середовища.

Висновки. 1. Тепловий потік, який поглинає металева гофрована конструкція, розподіляється нерівномірно її поверхнею, а на контакті «сталь-покриття» виникає перепад теплового потоку, що може призводити до утворення пошкоджень цинкового покриття. 2. При заданні цинкового покриття товщиною 80 мкм спостерігаються відмінності розподілу температурного поля порівняно без покриття. Максимальний температурний потік без завдання покриття становить 495,8 Вт/м², а при заданні покриття – 538,1 Вт/м². Такий тепловий перепад може призводити до температурних напружень на контакті «сталь-покриття». 3. Надалі досліджуватимемо напружено-деформований стан споруд із збірних металевих гофрованих конструкцій.

Бібліографічний список

1. Kovalchuk V., Luchko Y., Bondarenko I., Markul R., Parneta B. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Issue 7 (84). Kharkov, 2016. P. 4–9. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236>.
2. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В., Кравець І. Б., Джус В. С. Експериментальні дослідження розподілу температур на поверхнях транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 76. С. 52–62.
3. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Алгоритм визначення граничних умов, для дослідження температурних напружень та деформацій балкових кон-

струкцій залізничних мостів від кліматичних впливів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2012. № 46. С. 233–243.

4. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях: монографія. Львів: Каменяр, 2012. 235 с.

5. Gera V., Kovalchuk V. A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure of a culvert of a transportation facility. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 3/7(99). Kharkiv. P. 26–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.168260.

6. AASHTO Guide specifications: Thermal effects in concrete bridge superstructures. Washington. DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO, 1989. 99 p.

7. EN 1991-1-5-2009. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–5. Общие воздействия. Температурные воздействия. Минск, 2009. 38 с.

8. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Температурні поля та напружений стан залізобетонних балкових конструкцій мостів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. Вип. 49. С. 221–236.

9. Кархут І. І. Методика дослідження фізико-механічних характеристик бетону при дії місцевого імпульсного температурного навантаження. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій*. 1998. Вип. 3. Львів, 1998. С. 279.

10. Буряк Я. Й., Гачкевич О. Р., Терлецький Р. Ф. Термомеханіка тіл низької теплопровідності при дії електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону частот. Доп. АН України. Сер. А. 1990. № 6. С. 39–43.

11. Демчина Б. Г., Фіцик В. С. Методика отримання теплофізичних параметрів при випробуванні їх за стандартною температурною кривою. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: збірник наук. праць*. 2005. Вип. 6. Львів: Каменяр, 2005. С. 321–326.

12. Рудаков К. М. Вступ у UGS Femap 9.3 (для Windows). Геометричне та скінченно-елементна моделювання конструкцій: посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 282 с.

Стаття надійшла 06.08.2024