

УДК 629.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.67

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕРЕПАДІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТУ: НАТУРНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Лукін Д. О.¹, Безбабічева О. І.¹¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Вплив температури на залізобетонні мости може призводити до утворення тріщин, появи додаткових деформацій, що знижують термін експлуатації та сприяють руйнуванням конструктивних елементів споруд. В умовах глобальних змін клімату, а також у разі перепадів температур та за особливих місцевих умов температурні впливи, залежно від конструктивних рішень споруди, можуть значно посилюватися, що збільшує ризики для цілісності та терміну експлуатації елементів мостових конструкцій. Для аналізу таких ризиків потрібно мати дані натурних спостережень за типом розподілу та змін температурних умов, в яких експлуатуються різноманітні споруди. У цій статті наведені результати експериментальних вимірювань температури поверхні залізобетонного плитного мосту крізь річку Тересля в Закарпатській області. Описано заміри температури вздовж перерізу прогонової будови та асфальтобетонного покриття в різні періоди доби. На основі отриманої інформації здійснено аналіз напружено-деформованого стану конструкції моста.

Ключові слова: моніторинг температури, температурний перепад, температурний градієнт, залізобетонний міст, прогонова будова, температурні напруження, деформації.

Вступ

Вплив температури на мостові конструкції часто залишається непомітним, а тому може бути недооцінений. Проте температурні перепади здатні спричинити утворення тріщин та додаткові деформації у залізобетонних елементах, що призводить до скорочення строку експлуатації споруд. В умовах глобальних кліматичних змін і збільшення середньої температури повітря це питання стає ще більш актуальним.

Для аналізу температурного впливу на мости необхідно здійснити збір інформації про температурний розподіл на наявних спорудах, а також температурний моніторинг для окремих з них. Великі розбіжності в кліматичних умовах, конструкціях мостових споруд і сполучень навантажень, що можуть викликати руйнування, потребують постійних експериментальних доповнень та аналізу. У цій роботі наведено результати вимірювань температури вздовж перерізу залізобетонного мосту, а також подано аналіз отриманих експериментально-теоретичних даних для плитних типових прогонових будов.

Аналіз публікацій

Ще з середини минулого століття інженери та науковці в різних країнах світу досліджували руйнування залізобетонних елементів мостів під впливом температурних чин-

ників [1, 2]. Це питання залишається актуальним і на сьогодні [3–5], оскільки температура є постійним фактором впливу на мостові конструкції, а кліматичні зміни роблять цей вплив ще більш значним.

У багатьох країнах здійснюється моніторинг температур, що виникають у конструктивних елементах мостів, а також аналізується отримана інформація в різних кліматичних умовах [6–9]. Крім цього, активно розробляються системи прогнозування температурного впливу на конструкції [10]. Вимоги щодо врахування температурних перепадів вміщені до будівельних норм багатьох країн [11]. На жаль, для кліматичних умов України існує обмежена кількість досліджень щодо впливу температури на мости, зокрема щодо перепадів температури вздовж перерізу прогонових будов. Тому це питання потребує подальшого вивчення.

Мета та постановка завдання

Для дослідження впливу температури на мостові конструкції були зібрані експериментальні дані щодо її нерівномірного розподілу на поверхні прогонової будови залізобетонного мосту.

Заміряні температури дозволяють здійснити аналіз напружено-деформованого стану конструкції від їх дії та дослідити розподіл температури вздовж перерізу на основі рівнянь теплопровідності.

Температурні вимірювання на залізобетонному мості

Вимірювання температури були здійснені на залізобетонному мості крізь р. Теремля в Закарпатській області в червні 2023 року.

Міст двопрогновий, залізобетонний зі схемою $2 \times 18,0$ м. Він косий у плані та має довжину 37,16 м (рис. 1). Габарит проїзду на мосту становить 8,0 м, а також з одного боку улаштований тротуар шириною 1,45 м.



Рис. 1. Загальний вид мосту

У кожному прогоні розміщено по 10 пустотних залізобетонних попередньо напружених плитних балок, виконаних за типовим проєктом ВТП-21-86 (рис. 2).

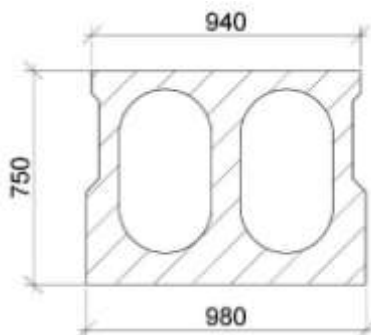


Рис. 2. Поперечний переріз залізобетонної балки прогонової будови

Висота балок – 0,75 м, ширина – 0,98 м. Балки в обох прогонах об'єднані монолітною залізобетонною плитою завтовшки 15 см у температурно-нерозрізну систему (монолітна залізобетонна плита на прогоновій будові повністю перекриває шов над проміжною опорою). На монолітній плиті влаштоване асфальтобетонне покриття товщиною 12 см, водночас на тротуарі покриття немає.

Міст орієнтований з південного заходу на північний схід. На момент здійснення замірів температури все мостове полотно та одна його частина (бік, де розміщений тротуар)

були під прямим сонячним випромінюванням, а інший бік (без тротуару) був у тіні.

Заміри температури здійснювались за допомогою електронного безконтактного пірометра у визначальних точках поперечного перерізу конструкції. Вимірювання проводились о 10:10 ранку та о 12:10 вдень.

О 10 ранку погода була сонячна з невеликим вітром північно східного напрямку. Температура повітря становила 18°C . О 12 дня погода стала більш холодною, було переважно хмарно, а температура повітря знизилася до $16,7^{\circ}\text{C}$. Результати вимірювання температури наведені на рис. 3.

Крім залізобетонних конструкцій, було також проведено заміри температури асфальтобетонного покриття на мосту. Також о 10 ранку були проведені вимірювання температури ригеля однієї з крайніх опор. Результати вимірювань наведені на рис. 4.

Початкові умови

Було також визначено міцність бетону балок прогонової будови методом пружного відскоку. Результати демонструють, що бетон відповідає класу В40. Таким чином, значення модуля пружності бетону відповідно до [12] дорівнює $E = 36,0 \times 10^3$ МПа. Коефіцієнт температурного розширення бетону $\alpha = 0,000010^{\circ}\text{C}^{-1}$ відповідно до [13].

Характеристики асфальтобетонного покриття визначаємо відповідно до [14], як і для щільних асфальтобетонів.

Початковою температурою було вибрано температуру середніх балок, оскільки вони меншою мірою залежать від перепадів температури. Так, о 10:00 температура середніх балок становила $15,3^{\circ}\text{C}$, а о 12:10 збільшилася до $15,5^{\circ}\text{C}$.

Під час розрахування косина мосту не враховувалася, а також досліджувався тільки один прогін (тобто об'єднання плити над проміжною опорою не розглядається). З огляду на наявність резинових опорних частин під балками прогону умови обпирання балок задані як вільно оперті.

Аналіз впливу температури на напружено-деформований стан прогонової будови мосту

Аналіз впливу температури здійснюється за допомогою моделі, побудованої на основі методу скінченних елементів (рис. 5). Вплив і розподіл температури вздовж перерізу моделюється на основі рівнянь теплопровідності.

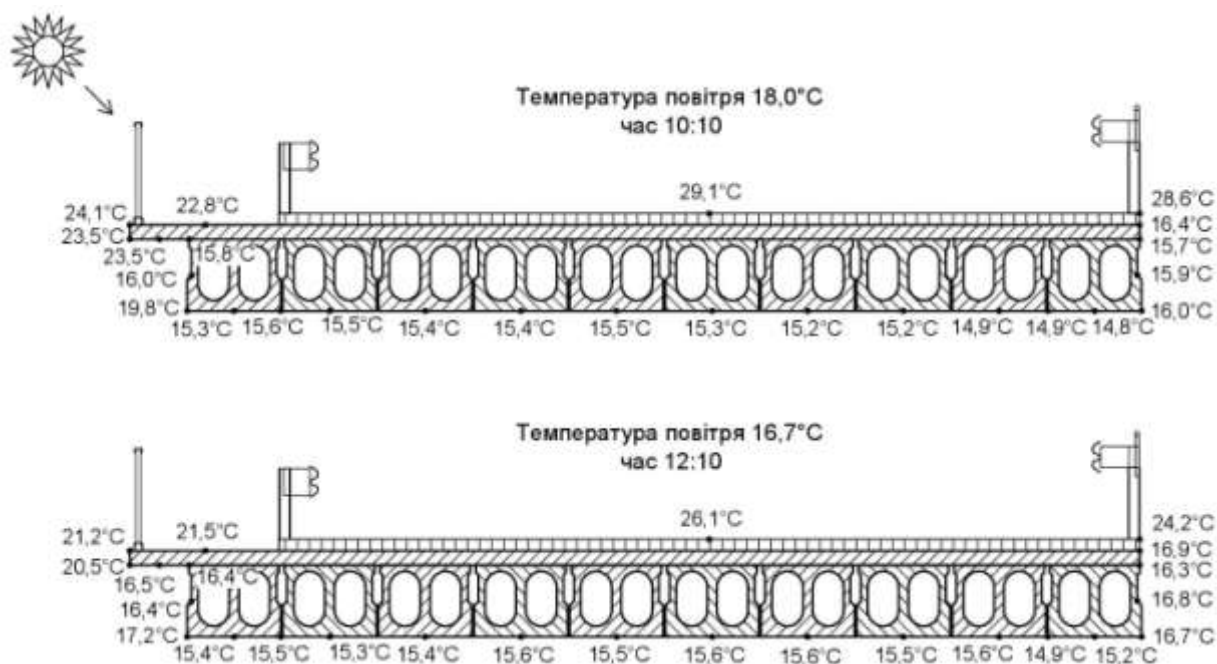


Рис. 3. Результати вимірювань температури на ригелі крайньої опори

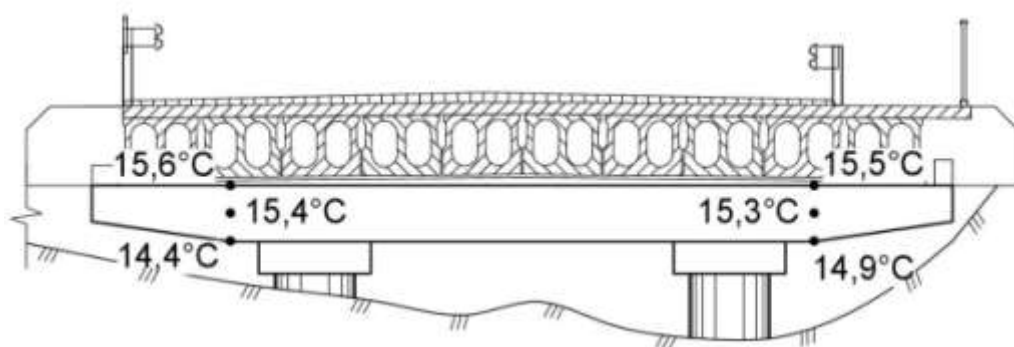


Рис. 4. Результати вимірювань температури на ригелі крайньої опори

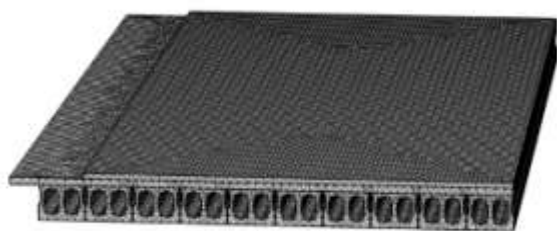


Рис. 5. Розрахункова модель

До розрахункової моделі застосовуються відповідні температури поверхні, що дозволяє змодельовати поширення температури вздовж перерізу прогонової будови.

Водночас температура вздовж довжини мосту є сталою, а зміни температури враховуються лише за висотою та шириною перерізу. Під час моделювання процесу теплообміну вздовж перерізу залізобетонної прогонової будови, отримали розподіл температури (рис. 6, 7).

Максимальний перепад температури за висотою залізобетонної конструкції під час замірів був зафіксований о 10 ранку з сонячного боку.

У плиті тротуарної консолі було зафіксовано температуру 24,1°C а перепад сягає значення 8,3°C (рис. 7).

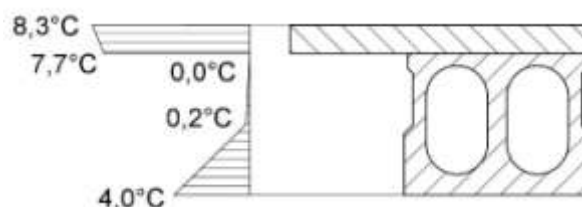
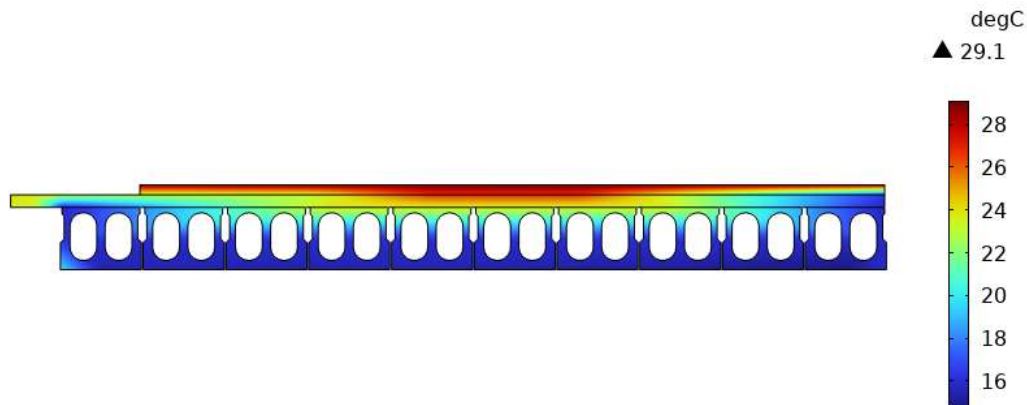


Рис. 7. Перепад температури по висоті залізобетонної конструкції, заміряний о 10 ранку

Розподіл температури по перерізу прогонової будови об 10:10 (C°)



Розподіл температури по перерізу прогонової будови о 12:10 (C°)

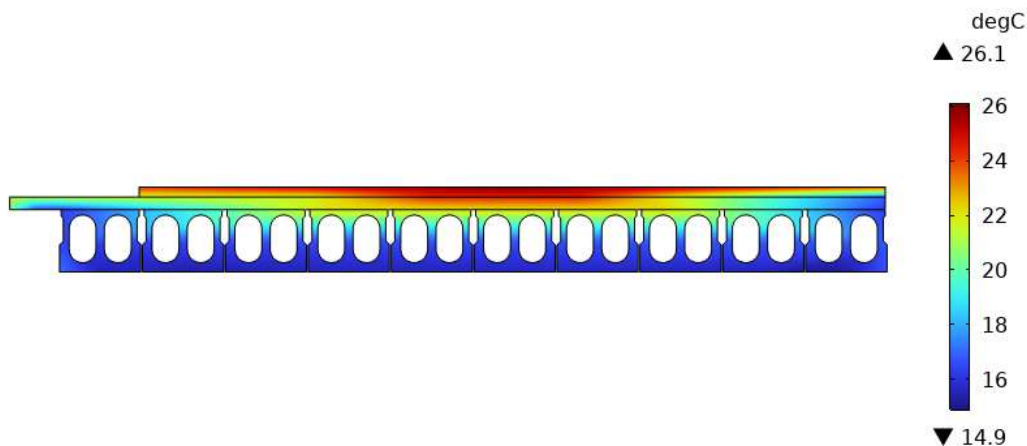


Рис. 6. Розподіл температури вздовж перерізу прогонової будови о 10:10 (зверху) та о 12:10 (знизу)

Змодельований розподіл температури вздовж перерізу, наведений на рис. 6, дозволяє визначити перепад температури по висоті також на межі крайньої балки (з сонячного боку) та по центру мостового полотна.

Значення такого перепаду температури для середніх балок важливо для визначення рівня впливу значно вищої температури асфальтобетонного покриття на температуру балки та монолітної плити (рис. 8).

На рисунку наведений перепад тільки в межах залізобетонної конструкції.

Таким чином, температура в плиті під дорожнім одягом сягає позначки в 26,7°C, а перепад температури по висоті в цьому місці становить 11,4°C, що більше за температурний перепад в крайній балці, який дорівнює 7,2°C.

Отримані значення температури викликають деформації та внутрішні напруження в прогоновій будові. Розподіл напружень вздовж перерізу прогонової будови від дії температури о 10 та о 12 годині наведений на рис. 9.

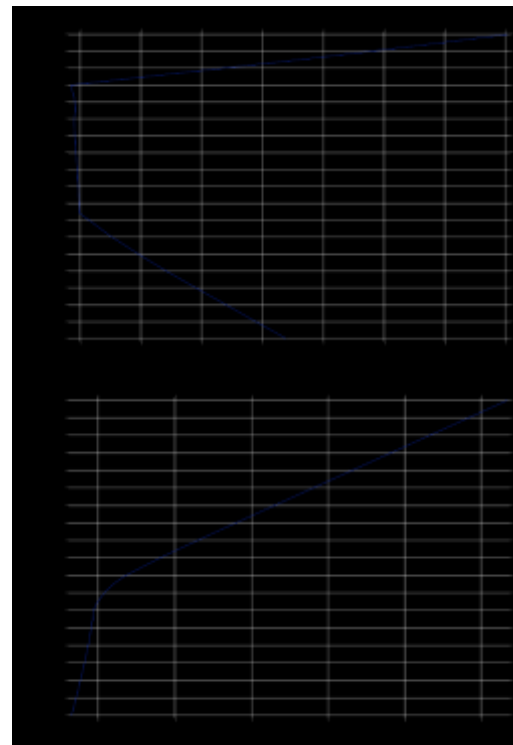


Рис. 8. Перепад температури по висоті о 10 ранку на межі крайньої балки (зверху) та по центру прогонової будови (знизу)

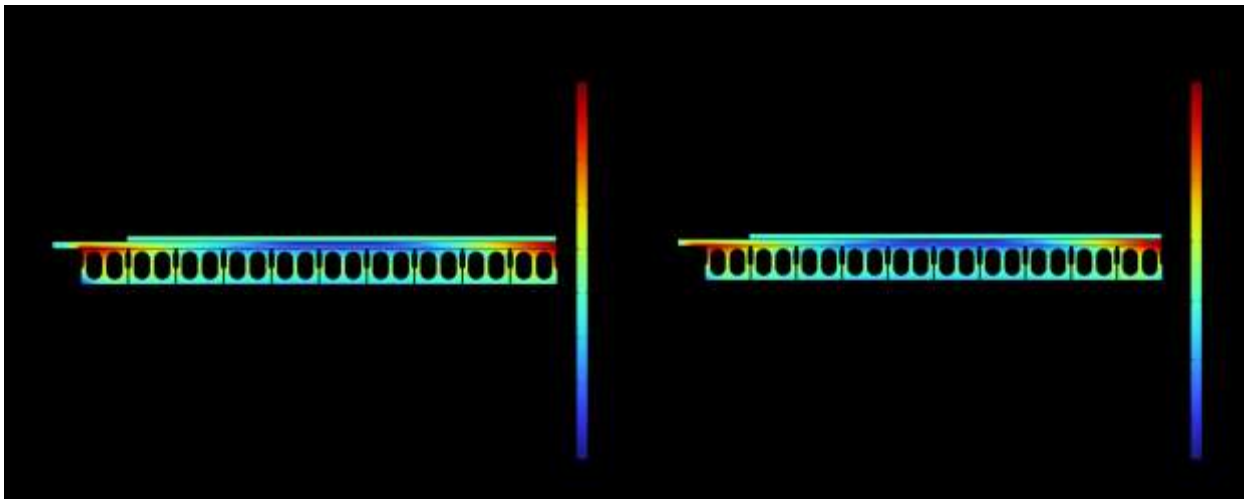


Рис. 9. Внутрішні напруження, викликані перепадом температури в центрі прогону о 10 ранку (ліворуч) та о 12 дня (праворуч)

Значення напружень вздовж перерізу залізобетонних конструкцій змінюються від максимуму в 2,37 МПа до мінімуму в $-1,85$ МПа.

Загальний вигляд деформацій конструкції, викликаних таким перепадом температури, наведений на рис. 10.

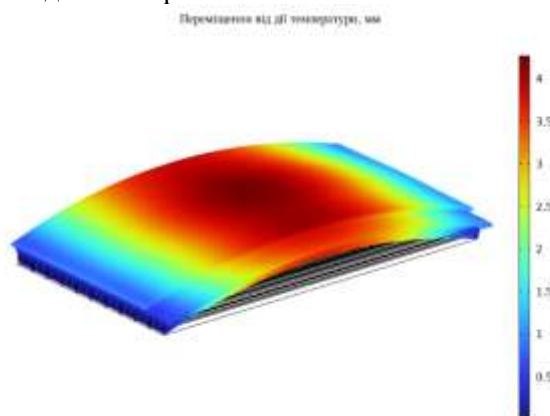


Рис. 10. Переміщення, викликані перепадом температури о 10 ранку

Також більш детально можемо розглянути напруження в місцях з найбільшим перепадом температури по висоті, наведені вище (рис. 8), а саме по центру прогонової будови та на межі крайньої балки о 10 ранку. Напруження наявні тільки в межах залізобетонної конструкції (рис. 11). Вздовж межі крайньої балки напруження змінюються від 2,35 МПа до $-1,46$ МПа, а по центру прогонової будови від 0,40 МПа до $-1,65$ МПа.

Варто зазначити, що напруження в крайній балці, незважаючи на менше отримане значення перепаду температури (але більш різке) по висоті, виявилися більшими за напруження, що виникають в середній балці.

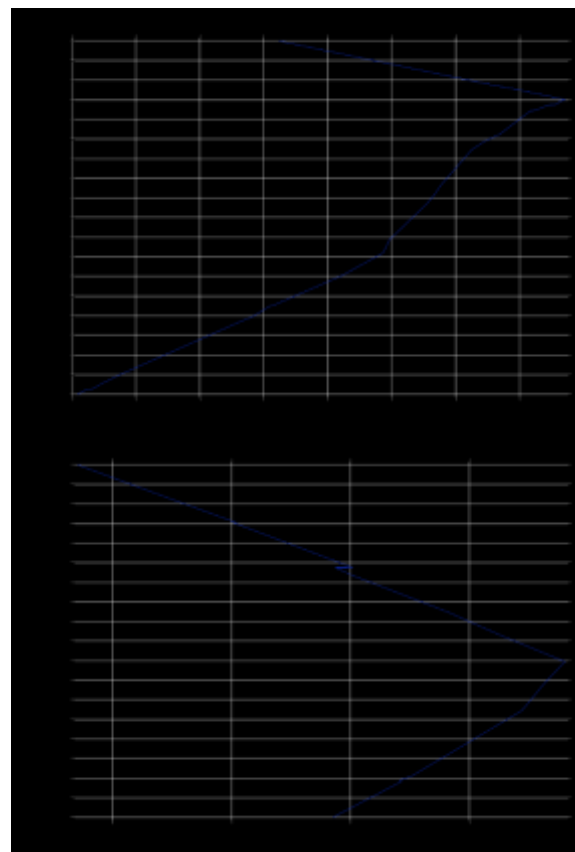


Рис. 11. Напруження від перепаду температури по висоті о 10 ранку на межі крайньої балки (зверху) та по центру прогонової будови (знизу)

Висновки

Результати натурних вимірювань температури влітку на плитному залізобетонному мості, а також аналіз розподілу температур по висоті конструкції демонструють вплив багатошарового дорожнього покриття на температурні градієнти, що виникають в прогонових будовах.

Моделювання процесу теплообміну в залізобетонних елементах прогонової будови дозволило визначити максимальні перепади температури, відповідні деформації та напруження в зазначених умовах.

Визначено максимальні перепади температури по перерізу прогонової будови. Так, перепад температури на межі крайньої балки з сонячного боку сягнув позначки в $7,2^{\circ}\text{C}$. А перепад по висоті під проїзною частиною становив $11,4^{\circ}\text{C}$ через вплив перегрітого на сонці дорожнього одягу.

Напруження, викликані цими перепадами температур, змінюються від максимуму $2,37\text{ МПа}$ (о 10:10 ранку) до мінімуму $1,85\text{ МПа}$ (також о 10:10 ранку).

Наведені значення отримані для літнього, але не найбільш спекотного дня (температура повітря сягала максимуму в $18,0^{\circ}\text{C}$). Отже, є підстави вважати, що вплив температури на прогонову будову може бути значно більшим. Тому ця проблема, зокрема за умов швидкої зміни зовнішньої температури повітря протягом короткого часу, потребує подальшого вивчення та дослідження.

Література

- Elbadry M., Ghali A. Thermal stresses and cracking of concrete bridges. *Journal Proceedings*. 1986. Vol. 83. No. 6. P. 1001–1009.
- Imbsen R. A., Vandershaf D. E., Schamber R. A., Nutt R. V. Thermal effects in concrete bridge superstructures. *Washington : National Cooperative Highway Research Program*, 1985.
- Zhang T. Analysis on the Causes of Cracks in Bridges. *Journal of Construction Research*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 13–26.
- Стоїлова В. Deterioration processes of reinforced concrete bridges: a review. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2024. T. 13. № 2. С. 1–12.
- Nguyen V. H. An investigation of cracks caused by concrete shrinkage and temperature difference in common reinforced concrete bridge structures. *Fracture and Structural Integrity*. 2024. Vol. 18. No. 68. P. 242–254.
- Borah S., Al-Habaibeh A., Kromanis R. The effect of temperature variation on bridges – a literature review. *Energy and Sustainable Futures: Proceedings of 2nd ICESF 2020*. 2021. P. 207–212.
- Abid S. R., Xue J., Liu J., Tayşi N., Liu Y., Özakça M., Briseghella B. Temperatures and gradients in concrete bridges: experimental, finite element analysis and design. *Structures*. 2022. Vol. 37. P. 960–976.
- He Z. Q., Ma Z., Zhang S., Liu Z., Ma Z. J. Temperature gradients and stress distributions in concrete box-girder bridges during hot-mix asphalt paving. *Structures*. 2021. Vol. 33. P. 1954–1966.
- Wang D., Tan B., Wang X., Zhang Z. Experimental study and numerical simulation of temperature gradient effect for steel-concrete composite bridge deck. *Measurement and Control*. 2021. Vol. 54, No. 5–6. P. 681–691.
- Sheng X., Zhou T., Huang S., Cai C., Shi T. Prediction of vertical temperature gradient on concrete box-girder considering different locations in China. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. e01026.
- Лукін Д. О. Температурні градієнти в мостових конструкціях за нормами різних країн. *Тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції «Мости: сучасний стан та перспективи розвитку», присвяченій 120-річчю від дня народження професора Володимира Олексійовича Російського*. Харків, 07-08 грудня 2023. С. 86–90.
- ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проєктування. Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006. 359 с.
- ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 71 с.
- Довідник № 2 розрахункових характеристик асфальтобетонів. Київ, 2017. 21 с.

References

- Elbadry5, M., Ghali, A. (1986). Thermal stresses and cracking of concrete bridges. *Journal Proceedings*. Vol. 83. No. 6. P. 1001–1009.
- Imbsen, R. A., Vandershaf, D. E., Schamber, R. A., Nutt, R. V. (1985). Thermal effects in concrete bridge superstructures. *Washington: National Cooperative Highway Research Program*.
- Zhang, T. (2018). Analysis on the Causes of Cracks in Bridges. *Journal of Construction Research*. Vol. 1. No. 1. P. 13–26.
- Stoilova, V. (2024). Deterioration processes of reinforced concrete bridges: a review. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. Vol. 13. No. 2. Pp. 1–12.
- Nguyen, V. H. (2024). An investigation of cracks caused by concrete shrinkage and temperature difference in common reinforced concrete bridge structures. *Fracture and Structural Integrity*. Vol. 18. No. 68. P. 242–254.
- Borah, S., Al-Habaibeh, A., Kromanis, R. (2021). The effect of temperature variation on bridges – a literature review. *Energy and Sustainable Futures: Proceedings of 2nd ICESF 2020*. P. 207–212.
- Abid, S. R., Xue, J., Liu, J., Tayşi, N., Liu, Y., Özakça, M., Briseghella, B. (2022). Temperatures and gradients in concrete bridges: experimental, finite element analysis and design. *Structures*. Vol. 37. P. 960–976.
- He, Z. Q., Ma, Z., Zhang, S., Liu, Z., Ma, Z. J. (2021). Temperature gradients and stress distributions in concrete box-girder bridges during hot-

- mix asphalt paving. *Structures*. Vol. 33. P. 1954–1966.
9. Wang, D., Tan, B., Wang, X., Zhang, Z. (2021). Experimental study and numerical simulation of temperature gradient effect for steel-concrete composite bridge deck. *Measurement and Control*. Vol. 54. No. 5–6. P. 681–691.
 10. Sheng, X., Zhou, T., Huang, S., Cai, C., Shi, T. (2022). Prediction of vertical temperature gradient on concrete box-girder considering different locations in China. *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 16. e01026.
 11. Lukin, D. O. Temperature gradients in bridge structures according to the standards of different countries, in *Theses of Reports of the All-Ukrainian Scientific Conference "Bridges: Current Status and Development Prospects"*, Kharkiv, Dec. 7–8, 2023. Pp. 86–90.
 12. DBN V.2.3-14-2006. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannya* [State Standard V.2.3-14-2006. Transport constructions. Bridges and pipes. Design rule]. Kyiv, Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury i zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Publ., 2006. 359 p.
 13. DBN V.1.2-15:2009, *Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby*. [State Standard V.1.2-15-2009. Transport constructions. Loads and actions. Bridges and pipes], Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009. 71 p.
 14. Dovidnyk № 2 *Rozrakhunkovykh kharakterystyk asfaltobetoniv* [Reference Book No. 2 of Calculation Characteristics of Asphalt Concretes], Kyiv, 2017. 21 p.

Лукін Данило Олександрович¹, аспірант каф. мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, dalukin91@gmail.com, Безбабічева Ольга Іллівна¹, к.т.н., доц. каф. мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, most_kharkov@ukr.net.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

The Impact of Temperature Gradients on the Stress-Strain State of a Reinforced Concrete Bridge: Field Measurements and Modeling

Abstract. Problem. The influence of temperature differences on bridge superstructures is often underestimated, even though such variations can cause cracks in concrete elements and ultimately reduce the bridge's service life. In light of global climate change and increasing average air temperatures, this issue has become even more urgent. **Goal.** This article

presents the results of temperature measurements taken across the cross-section of a concrete bridge. The aim of the study is to analyze the temperature distribution and assess its impact on the structural performance of the bridge. **Methodology.** Temperature measurements were carried out on a concrete bridge over the Tereblia River in Zakarpattia, Ukraine, in June 2023. A non-contact electronic pyrometer was used to record temperatures at several key points across the bridge cross-section. Measurements were taken in both the morning and afternoon to capture daily temperature changes. **Results.** The data revealed significant temperature differences across the bridge cross-section, with values reaching up to 11.4°C in the morning. The greatest temperature gradients were observed on the side exposed to direct sunlight and within the internal girders, due to heat transfer from the warmed bridge deck pavement. The study also highlights the substantial impact of these temperature differences on the stress-strain behavior of structural elements, leading to the development of internal stresses in the concrete. **Originality.** This research highlights the effects of temperature variations on the concrete superstructure of the bridge. Given the lack of comprehensive data on temperature-induced stresses in bridge elements for the climate of Ukraine, the study offers valuable insights into the challenges posed by climate change in bridge engineering. **Practical value.** The recorded data and the subsequent analysis of thermal stresses offer a foundation for improving the understanding of how temperature affects concrete bridges in the climate conditions of Ukraine. These findings are essential for improving the design, monitoring, and maintenance of bridge structures, contributing to their long-term durability and safety in a changing climate.

Key words: temperature monitoring, temperature difference, temperature gradient, concrete bridge superstructure, thermal stresses, deformations.

Lukin Danylo¹, postgraduate student, Department of Bridges, Structures and Construction Mechanics named after V.O. Rosiiskyi, ORCID ID: 0009-0003-9630-1085, dalukin91@gmail.com, Bezbabicheva Olha¹, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, Department of Bridges, Structures and Construction Mechanics named after V.O. Rosiiskyi, ORCID ID: 0000-0002-9006-2373, most_kharkov@ukr.net.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.