

УДК 624.21

**ВИЗНАЧЕННЯ МІРИ ПОШКОДЖЕННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ
НА ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ ПЛИТІ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ**

Д-р техн. наук А. М. Онищенко, кандидати техн. наук М. В. Гаркуша, С. Ю. Аксьонов,
асп. Б. О. Вишнівський

**DETERMINATION OF DAMAGE LEVEL IN CEMENT CONCRETE PAVEMENT
ON REINFORCED CONCRETE SLAB OF ROADWAY ON HIGHWAY BRIDGES**

Dr. Tech. Sc. A. M. Onyshchenko, PhD in Tech. Sc. M. V. Harkusha,
PhD in Tech. Sc. S. Yu. Aksonov, PhD Student B. O. Vyshnivskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351829>



Анотація. На сьогодні відсутні підходи щодо визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів, що є нагальною проблемою з проектування цементобетонного покриття.

Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною в останнє десятиріччя через низку несприятливих причин. Система експлуатації не відповідає сучасним технічним нормам і не має потрібних ресурсів для правильного та своєчасного догляду за спорудами; система фінансування дорожньої мережі України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів. В Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації автодорожніх мостів. У зв'язку зі зростанням параметрів транспортних навантажень і через аномально високі літні температури значного розповсюдження набули дефекти асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів, що перешкоджають безпечній експлуатації споруди. Актуальною залишається проблема, пов'язана зі станом покриття автодорожніх мостів і мостів у цілому, що є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг.

Основною проблемою для експлуатації цементобетонного покриття на автодорожніх залізобетонних мостах є зменшення довговічності внаслідок тріщиноутворення. Світова тенденція та напрям сучасних досліджень указує на стрімкий розвиток будівництва доріг жорсткого типу та цементобетонного покриття на залізобетонних мостах. Тому постає нагальна необхідність вивчення і дослідження влаштування та експлуатації такого покриття на мостах України.

У статті розглянуто визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, а також визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань.

Ключові слова: автодорожній міст, міра пошкоженості, проїзна частина, цементобетонне покриття.

Abstract. At present, there are no established approaches for determining the extent of damage to cement concrete pavement on reinforced concrete slabs of highway bridge roadways, which poses an urgent issue in the design of cement concrete pavement.

The problem of safe operation of bridges has become critical in the past decade due to a number of unfavorable factors. The current maintenance system does not comply with modern technical standards and lacks the necessary resources for proper and timely maintenance of structures. Additionally, the funding system for Ukraine's road network does not allow the use of modern and innovative technologies in bridge operation and construction. Ukraine lacks a clear strategic plan for the improvement, maintenance, and operation of highway bridges.

With increasing transport load parameters and abnormally high summer temperatures, defects in the asphalt concrete pavement of reinforced concrete highway bridges have become widespread, hindering the safe operation of these structures. The condition of pavement on highway bridges—and of the bridges as a whole—remains a pressing issue, as they are an integral part of the national road network.

The main challenge in the operation of cement concrete pavement on reinforced concrete highway bridges is the reduction of service life due to crack formation. Global trends and the direction of current research indicate a rapid development in the construction of rigid-type roads and cement concrete pavement on reinforced concrete bridges. Therefore, there is an urgent need to study and investigate the construction and maintenance of such pavement on bridges in Ukraine.

This article addresses the determination of the extent of damage to cement concrete pavement on the reinforced concrete slab of a highway bridge roadway caused by tensile stresses resulting from the action of vehicle pneumatic wheels. It also examines damage caused by thermal stresses due to daily and seasonal temperature fluctuations.

Keywords: highway bridge, degree of damage, roadway, cement concrete pavement.

Вступ. Автодорожні мости є невід’ємною складовою мережі автомобільних доріг транспортної інфраструктури України. Технічний стан переважної більшості автодорожніх мостів не відповідає сучасним вимогам щодо забезпечення дорожнього руху та конструктивної надійності елементів споруд

[1, 2]. Застосування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів має низку переваг порівняно з асфальтобетонним: більш стійке до деформацій, наприклад колієутворення; більша довговічність; забезпечує кращий рівень дорожньої безпеки, наприклад менший гальмівний

шлях, кращі світловідбивальні властивості; менша мінімальна товщина покриття; більш екологічний матеріал, що краще придатний для переробки; протягом життєвого циклу потребують меншої кількості експлуатаційних втручань [1, 2]. Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів є важливим завданням для розрахунку цементобетонного покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що відповідно до ДБН В.2.3-22 [3] можна застосовувати два види автодорожніх покриттів на мостах: конструкція з гідроізоляцією (асфальтобетонне покриття) і конструкція без гідроізоляції (цементобетонне покриття). Не встановлено статистичних даних, у яких надано інформацію про відсоткове співвідношення мостів за типом автодорожнього покриття, але аналіз типових проєктів підтверджує, що переважна більшість експлуатованих автодорожніх залізобетонних мостів України мають саме асфальтобетонне покриття [3].

Над вирішенням наукових питань про довговічність цементобетонних доріг і жорстких покриттів працюють такі вітчизняні вчені, як Белятинський А. А. [4], Гамеляк І. П. [5], Коваль П. М. [2], Солодкий С. Й. [6], Чистяков В. В. [7]. Очевидно, що в Україні жорсткі типи покриття менш досліджені та розповсюджені порівняно з асфальтобетонним, у той час як цементобетонне покриття на залізобетонних автодорожніх мостах України є маловивченою науковою проблемою.

На сьогодні актуальним залишається питання про впровадження в Україні цементобетонного покриття на залізобетонних автодорожніх мостах, що потребує розроблення методик розрахунку таких покриттів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою виконання цієї роботи є визначення міри пошкодження

цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань.

Науковою новизною отриманих результатів дослідження є встановлення підходів для розрахунку розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань.

Основна частина дослідження. Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, полягає в тому, що від дії пневматичних коліс транспортних засобів у цементобетонному покритті виникають розтягувальні напруження і з часом відбуваються втомні пошкодження в покритті.

На цементобетонне покриття діє колісне навантаження, яке викликає розтягувальне напруження, тому міру пошкодження $M_{Tp}(t)$ цементобетонного дорожнього покриття автомобільної дороги від зміни напружень, що викликані дією пневматичних коліс транспортних засобів [8], визначають за формулою

$$M_{Tp}(t) = \frac{N_p \times n_c \times \frac{(q^t - 1)}{(q - 1)}}{\left(\frac{K_p \times B_{ib} \times K_M \times K_y \times K_{морз}}{\sigma_p} \right)^{1/b_t}}, \quad (1)$$

Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від температурних

напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань, полягає в тому, що для прогнозування температурних напружень необхідно знати режим зміни температури цементобетонного дорожнього покриття. Відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень свідчать, що на температурний режим цементобетонного дорожнього покриття впливають дві основні гармоніки [8, 9]: зміна температури в річному та добовому циклі коливань.

Цей температурний фактор певним чином впливає на формування фізичних властивостей цементобетону і напружено-деформований стан покриття на

залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів у період експлуатації. За відомих функцій зміни температури поверхні і товщиною цементобетонного покриття можна розрахувати величину і повторність температурних напружень у плитах різної довжини.

Розраховують температурні поля в цементобетонному покритті за рахунок зміни температури на поверхні і товщини покриття, що обумовлено процесами радіаційної, конвективної і кондуктивної теплопередачі. Направлення теплових потоків, що складаються з теплового балансу на поверхні покриття, схематично наведено на схемі рисунка.

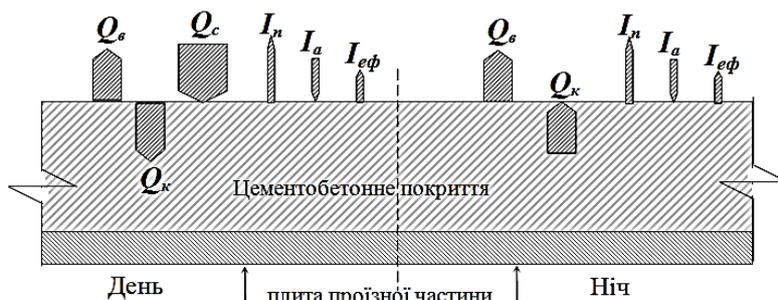


Рис. Схема складових теплового балансу на поверхні напівпростору цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів (удень і вночі):

Q_c — короткохвильова сумарна радіація (пряма і розсіяна); Q_e — конвективна теплопередача; Q_k — кондуктивна теплопередача; I_a — довгохвильове випромінювання покриття; I_n — довгохвильове випромінювання атмосфери; I_{ef} , I_n , I_a — ефективне випромінювання покриття

Радіаційна теплопередача R виражена радіаційним балансом і є мірою припливу променевої енергії до поверхні покриття:

$$R = (Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{ef}, \quad (2)$$

де Q_n , Q_p — потоки тепла відповідно від прямої розсіяної радіації;

A — величина, що характеризує відображення тепла залежно від кольору поверхні покриття, так званий коефіцієнт альbedo поверхні.

Конвективна теплопередача Q_e між поверхнею покриття і повітрям описана законом Ньютона

$$Q_e = \alpha_k \times (T_n - T_e), \quad (3)$$

де T_n , T_e — температура відповідно поверхні покриття і повітря, °C;

α_k — коефіцієнт конвективної теплопередачі, що залежить від швидкості вітру і перепаду температури $\Delta T = T_n - T_e$.

Кондуктивну теплопередачу Q_k від поверхні до плити проїзної частини або від плити до поверхні цементобетонного покриття визначають (у цьому випадку) наближено за законом Фур'є

$$Q_k = \pm \lambda \int_{t_1}^{t_2} \frac{dT(y,t)}{dy} dt, \quad (4)$$

де $T(y,t)$ — функція розподілу температури за товщиною покриття з часом;

λ — коефіцієнт теплопровідності цементобетону.

Розрахунок температури поверхні покриття полягає в розв'язанні теплотехнічних задач за відомих граничних і початкових умов. Граничними умовами є функція зміни температури на поверхні покриття і певній глибині, початковою умовою — функція розподілу температури за товщиною в початковий час.

Максимальна і мінімальна температури поверхні покриття впродовж доби можуть бути граничною умовою або виявитися допоміжною граничною величиною температури за заданих граничних умов, наприклад гармонічною функцією. За відсутності кондукційної теплопередачі в покритті (через 2-3 год після сходу сонця) температура на поверхні покриття може бути прийнята за початкову умову в задачах, наприклад розподіл температури за товщиною.

Максимальна температура поверхні покриття $T_{n \max}$ удень відповідає максимальній температурі повітря T_e :

$$T_{n \max} = T_e + \frac{(Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{ef} - Q_k}{\alpha}, \quad (5)$$

де Q_n, Q_p — потоки відповідно від прямої і розсіяної радіації;

A — величина, що характеризує відбиття тепла залежно від кольору поверхні, так званий коефіцієнт альbedo поверхні;

I_{ef} — ефективне випромінювання покриття;

T_n, T_e — температура відповідно поверхні покриття і повітря;

α — коефіцієнт конвективної тепловіддачі, залежить від швидкості вітру і перепаду температури.

Тепловий потік Q_k від поверхні покриття товщиною h наближається в цей час до стаціонарного [8]:

$$Q_k = 5 \times \lambda \times \text{град} T_1 \times h, \quad (6)$$

де T_1 — максимальний градієнт температури в цементобетонному покритті, $60^\circ\text{C}/\text{м}$ в умовах помірному і $85^\circ\text{C}/\text{м}$ континентального клімату;

λ — коефіцієнт теплопровідності цементобетону.

Мінімальну температуру поверхні покриття $T_{n \min}$ уночі, що відповідає мінімальній температурі повітря T_e , розраховують за формулою

$$T_{n \min} = T_e + \frac{Q_k - I_{ef}}{\alpha}, \quad (7)$$

де Q_k — тепловий потік до поверхні покриття, $Q_k = 5 \cdot \lambda \cdot \text{град} T_2 \cdot h$, де $\text{град} T_2$ — максимальний градієнт температури в покритті, $40^\circ\text{C}/\text{м}$ в умовах помірному та $57^\circ\text{C}/\text{м}$ континентального клімату.

Тепловий потік Q_k до поверхні покриття в формулі (7) [8] наближається в цей час до стаціонарного:

$$Q_k = 5 \times \lambda \times \text{град} T_2 \times h, \quad (8)$$

де T_2 — максимальний градієнт температури в цементобетонному покритті, $40^\circ\text{C}/\text{м}$ в умовах помірному і $57^\circ\text{C}/\text{м}$ континентального клімату.

Для безградієнтного температурного поля в покритті, що спостерігають через 2-3 год після сходу сонця, температуру поверхні T_n за товщиною $T(y)$ розраховують за формулою, за умови $Q_k = 0$,

$$T_n = T(y) = T_{\theta} + \frac{(Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{сф}}{\alpha} \quad (9)$$

Для практичних розрахунків добова зміна температури $T(\theta, t)$ поверхні покриття

з періодом T_0 , рівним, наприклад, 24 год, виражена простою гармонічною функцією

$$T(\theta, t) = T_c + A_0 \times \sin(\omega \times t - f_0) = T_c + A_0 \times \cos(\omega \times t - f_0 - \frac{\pi}{2}), \quad (10)$$

де $A_0 = \frac{T_n(max) - T_n(min)}{2}$; $T_c = T_n(max) - A_0$; $\omega = \frac{2 \times \pi}{24} = \frac{2 \times \pi}{T_0}$.

У цьому випадку початкова фаза $f_0 = \frac{2 \times \pi}{T_0} \times t_0$ виражає розрахункове відхилення температури в частках періоду

T_0 від положення рівноваги — середньої температури T_c .

Зміна добової температури поверхні $T(\theta, t)$ покриття з урахуванням коливання температури в річному циклі – сума добових і річних коливань:

$$T(\theta, t) = T_1 + A_1 \times \sin \omega_1 \times t_1 + A_0 \times \sin(\omega \times t - f_0), \quad (11)$$

де A_1 — середньорічна амплітуда коливань температури на поверхні покриття,

$$A_1 = \frac{[T_n(max, червень) - A_0(червень)] - [T_n(min, січень) - A_0(січень)]}{2},$$

T_1 — середньорічна температура поверхні покриття,

$$T_1 = \frac{T_n(max, червень) + T_n(min, січень)}{2}; \quad \omega_1 = \frac{2 \times \pi}{T_{12}},$$

де $T_n(max, червень)$ — максимальна температура поверхні покриття середньорічна в червні;

$T_n(min, січень)$ — мінімальна температура поверхні покриття середньорічна в січні;

$A_0(червень), A_0(січень)$ — максимальні добові амплітуди коливань температури на поверхні покриття відповідно в червні і січні;

T_{12} — період коливань річної температури, 12 місяців;

t_1 — кількість місяців, від 1 до 12.

Розрахунок розподілу температури $T(y, t)$ за товщиною цементобетонного дорожнього покриття за стаціонарного кондуктивного теплообміну в покритті [8]:

$$T(y) = T_1 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \text{ при } T_1 = T_n - T_{ng} \text{ и } T_n > T_{ng}; \quad (12)$$

$$T(y) = T_2 \times \frac{y}{h} \text{ при } T_2 = T_{ng} - T_n \text{ и } T_n < T_{ng}; \quad (13)$$

$$T(y) = T_n - (T_n - T_{ng}) \times \frac{y}{h} \text{ при } T_n > T_{ng}; \quad (14)$$

$$T(y) = T_n - (T_{ng} - T_n) \times \frac{y}{h} \text{ при } T_n < T_{ng}; \quad (15)$$

де T_{ng} – температура на підшві покриття (контакт покриття з монолітною плитою).

При цьому в середній площині плити температура, задана функціями (12) – (15) відповідно [8],

$$T_1\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_1}{2}; T_2\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_2}{2}; T\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_n + T_{ng}}{2}. \quad (16)$$

Зміна температури $T(y, t)$ в будь-яку годину доби за товщиною покриття за гармонічної умови на поверхні у вигляді

гармонічної функції може бути наближено знайдена за формулами розподілу температурних хвиль у напівпросторі [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \times \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, 0 \leq y < \infty, T_{y=0} = A_0 \cos \omega \times t,$$

$$T(y, t) = A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \times \cos\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right); \quad (17)$$

$$T(y, t) = A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \times \sin\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \frac{\pi}{2}\right),$$

де a – коефіцієнт температуропровідності цементобетону, $\text{м}^2/\text{г}$.

У формулі (17) експонента $\exp\left(-y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ дає коефіцієнт зниження амплітуди A_0 за товщиною покриття, а

$\cos\left(\omega \times t - y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ — зміна амплітуди в часі із зсувом фаз на величину $y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$.

Відповідно до формули (17) і початкових умов про нульовий градієнт у покритті через 2-3 год після сходу сонця отримують розрахункову формулу [8]

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varphi_0\right), \quad (18)$$

де φ_0 – зсув фаз температури поверхні покриття від $T_{n \max}$ до $T_{ніч}$, якщо $t = 0$, град.

Величину коефіцієнта b_0 у формулі (18) знайдено з рівності $T(0, 0) = T(y, 0)$ або

$$T_c + A_0 \cos(-f_0) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}}\right) \times \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}} - f_0\right), \quad (19)$$

Звідки

$$b_0 = \frac{y \times T_c}{A_0 \times \left[\exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}}\right) \times \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}} - f_0\right) - \cos f_0 \right]}. \quad (20)$$

З урахуванням залежності (20) записують вираз для розрахунку температурного режиму цементобетонного

покриття у вигляді бігармонічного закону вигляду

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \times a}}\right) \cos(\omega_0 \times t - y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \times a}} - f_0) + A_p \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \times a}}\right) \cos(\omega_p \times t - y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \times a}} - f_p), \quad (21)$$

де T_c – середня температура покриття;

\bar{A}_p – середня за товщиною амплітуда коливань температури покриття в річному циклі;

\bar{A}_0 – середня за товщиною амплітуда коливань температури покриття в добовому циклі.

Вираз (21) використано для визначення температури за товщиною цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів.

Параметри формули (21) знаходять із джерел [8, 10], а амплітуду річних коливань (A_{np}) за формулою

$$A_{np} = \left(\frac{T_{n,max} - T_{n,min}}{2} \right), \quad (22)$$

де $T_{n,max}$, $T_{n,min}$ – середньомісячна температура поверхні покриття відповідно найтеплішого і найхолоднішого місяців.

Температуру покриття в найтеплішому місяці $T_{n,max}$ з урахуванням впливу сонячного нагрівання розраховують за формулою [8, 10]

$$T_{n,max} = \frac{4(\pi + 1)t_{нов,max}}{3\pi}. \quad (23)$$

Середньомісячну температуру найхолоднішого місяця для цементобетонного покриття доцільно порівнювати до відповідної температури повітря:

$$T_{n,min} = t_{нов,min}, \quad (24)$$

де $t_{нов,min}$ – розрахункові значення середньомісячної температури повітря відповідно для найхолоднішого місяця (січень) і найтеплішого місяця (липень).

З урахуванням статистичного розкиду розрахункові значення $t_{нов,min}$, $t_{нов,max}$ визначають за формулами [10]

$$t_{nos,min} = \bar{t}_{nos,min} - \sigma_t t, \quad (25)$$

$$t_{nos,max} = \bar{t}_{nos,max} - \sigma_t t, \quad (26)$$

де $\bar{t}_{nos,min}, \bar{t}_{nos,max}$ – середні багаторічні значення середньомісячної температури повітря відповідно для найхолоднішого місяця та найтеплішого місяця, встановлюють за кліматичними даними;

σ_t – середнє квадратичне відхилення середньомісячної температури повітря, що визначають залежно від проєктної надійності за методикою [10];

t – коефіцієнт нормованого відхилення.

Отже, відповідно до формули (21) з урахуванням виразів (22) — (26) є можливість описати зміну температури цементобетонного покриття для різних регіональних кліматичних умов.

Крім бігармонічного закону зміни температури цементобетонного покриття, практичний інтерес має швидкість його охолодження. У цьому випадку, використовуючи параметри формули (21), записують:

– за добових коливань температури

$$k_d = \frac{2A_d}{0,5t_d} = \frac{4A_d}{t_d}, \quad (27)$$

$$\sigma_T(T(y,t)) = k \times E(t) \times \alpha_{цб} \times T(y) - \frac{k \times E(t) \times \alpha_{цб}}{h} \int_0^h T(y,t) dy - \frac{12 \times k \times E(t) \times \alpha_{цб} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y,t) \times (\frac{h}{2} - y) dy, \quad (29)$$

де $T(y,t)$ – гармонічна функція температури за товщиною цементобетонного покриття;

$E(t)$ – модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження, МПа;

$\alpha_{цб}$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону;

де t_d – період добових коливань температури;

– річних коливань температури

$$k_p = \frac{2A_p}{0,5t_p} = \frac{4A_p}{t_p}, \quad (28)$$

де t_p – період річних коливань температури.

Такий гармонійний характер зміни температури цементобетонного покриття викликає циклічну зміну температурних напружень у цементобетонному покритті.

За відсутності в покритті поздовжніх деформацій і короблення температурні напруження визначають за формулою $\sigma_{IT} = E \times a \times T(y)$ з урахуванням гармонічної функції температури $T(y,t)$. Щоб визначити напруження σ_{IT} на нижній частині плити цементобетонного покриття або поверхні за формулою $\sigma_{IT} = E \times a \times T(y)$, прийнято відповідно $y = h$ або $y = 0$.

У разі вільних поздовжніх деформацій розрахунок температурних напружень у плитах (від деформаційного шва до деформаційного шва), не здатних коробитися ($C_x = 1$) або таких, що мають часткову можливість короблення ($C_x < 1$), такий:

h – товщина цементобетонного покриття, см;

y – задана глибина.

Міру пошкодження цементобетонного покриття від зміни напружень з урахуванням добових і річних температурних коливань визначають за формулою

$$M_{Тем}(T(t)) = \left(\begin{array}{l} n_{i(l)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_l \times (\sigma_l^p(t, T) + \sigma_l^{\partial}(t, T))^{-bt_l}} + n_{i(o,s)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{o,s} \times (\sigma_{o,s}^p(T(t)) + \sigma_{o,s}^{\partial}(T(t)))^{-bt_{o,s}}} \\ + n_{i(3)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_3 \times (\sigma_3^p(T(t)) + \sigma_3^{\partial}(T(t)))^{-bt_3}} \end{array} \right), \quad (30)$$

$$\sigma_l^p(T(t)) = k \times E_l^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_l^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

де

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_l^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_l^{\partial}(T(t)) = k \times E_l^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_l^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_l^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{o,s}^p(T(t)) = k \times E_{o,s}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{o,s}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{o,s}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{o,s}^{\partial}(T(t)) = k \times E_{o,s}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{o,s}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{o,s}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_3^p(T(t)) = k \times E_3^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_3^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_3^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_3^{\partial}(T(t)) = k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{цб} \times T(y) - \frac{k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{цб}}{h} \int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{цб} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

Висновки. Практична цінність отриманих результатів пов'язана з тим, що вперше запропоновано підходи для визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних

напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань. Запропоновані підходи дають змогу запроєктувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності.

Список використаних джерел

1. Перспективи застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах / А. М. Онищенко, М. В. Гаркуша, О. О. Давиденко та ін. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 178–196. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.178>. (дата звернення: 01.03.2025).
2. Вишнівський Б. О. Проектування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті мостового полотна автодорожніх мостів. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 311–320. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.311> (дата звернення: 01.03.2025).
3. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Чинний від 2010-03-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
4. Bieliatynskiy A., Krayushkina E., Skrypchenko A. Modern Technologies and Materials for Cement Concrete Pavement's Repair. *9th International Scientific Conference Transbaltica 2015* Procedia Engineering 134. 2016. 344–347. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.017> (дата звернення: 01.03.2025).
5. Гамеляк І. П., Дмитриченко А. М. Математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для дорожніх та аеродромних покриттів. *Автошляховик України*. 2015. № 1-2. С. 75–80. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_23. (дата звернення: 01.03.2025).
6. Солодкий С. Й., Думич І. Ю. Вплив типу основи на витривалість монолітних цементобетонних дорожніх покриттів. *Автошляховик України*. 2014. № 2. С. 23–26. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_8. (дата звернення: 01.03.2025).
7. Чистяков В. В., Шургая А. Г., Дорошенко Ю. М., Чиженко Н. П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2012. Вип. 85. С. 48–55. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2012_85_9. (дата звернення: 01.03.2025).
8. МР В.2.3-37641918-920:2021. Методичні рекомендації з проектування і влаштування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів. Чинний від 2021-12-15. Вид. офіц. Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2021. 66 с.
9. Радовський Б. С. Проблеми механіки дорожньо-будівельних матеріалів та дорожнього одягу. Київ: ПоліграфКонсалтинг, 2003. 240 с.

10. Р В.2.3-21476215-803:2012. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в асфальтобетонних покриттях конструкцій нежорстких дорожніх одягів. Чинний від 2012-12-14. Вид. офіц. Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2012. 34 с.

Онищенко Артур Миколайович, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>. Тел.: +38 (068) 777-18-99. E-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com.

Гаркуша Микола Васильович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Тел.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Аксьонов Сергій Юрійович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>. Тел.: +38 (097) 153-44-06. E-mail: viprojekt@ukr.net.

Вишнівський Боліслав Олександрович, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9376-8299>. Тел.: +38 (050) 468-12-19. E-mail: Boleslav1987@iCloud.com.

Onyshchenko Arthur, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>. Tel.: +38 (068) 777-18-99. E-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com.

Harkusha Mykola, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Tel.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Aksonov Serhii, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>. Tel.: +38 (097) 153-44-06. E-mail: viprojekt@ukr.net.

Vyshnivskyi Bolislav, graduate student of the Department of Bridges, Tunnels and Hydrotechnical Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9376-8299>. Tel.: +38 (050) 468-12-19. E-mail: Boleslav1987@iCloud.com.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.