

УДК 624.21

Лукін Д. О., <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>*Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), м. Харків, Україна*

**МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДОБОВИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ КОЛИВАНЬ
НА ЗАЛІЗОБЕТОННИЙ МІСТ В УМОВАХ КЛІМАТУ УКРАЇНИ*****Анотація***

Вступ. Вплив температури на прогонові будови мостів є одним із факторів, що постійно діють на конструкцію. Через низьку теплопровідність бетону виникають температурні перепади по перерізу конструкції, які викликають додаткові деформації та внутрішні напруження. З огляду на глобальні зміни клімату та зростання середньорічних температур повітря, ця проблема набуває особливої актуальності.

Проблематика. Недооцінка температурного впливу під час проєктування та експлуатації мостів може призводити до пошкоджень конструкцій, зменшення їхньої довговічності та порушення експлуатаційної надійності мостових споруд. Попри наявність нормативних моделей температурного впливу в європейських та американських стандартах, в Україні бракує систематизованих досліджень в умовах місцевого клімату. Особливо відчутною є нестача експериментальних даних, що ускладнює адаптацію або створення актуальних моделей для проєктування мостів.

Мета. Створення та верифікація математичної моделі розподілу температури в залізобетонній прогоновій будові мосту протягом добового циклу в умовах українського клімату. Модель враховує зовнішні кліматичні фактори та властивості матеріалів. Її верифікацію здійснено шляхом порівняння з натурними вимірюваннями, що дозволяє точніше оцінити температурні напруження та підвищити надійність мостових конструкцій.

Матеріали й методи. У статті розглядається вплив кліматичних факторів на температуру залізобетонної прогонової будови мосту в умовах клімату України. Для дослідження температурного режиму мосту було використано аналітичні та числові методи моделювання. Методика включала експериментальні вимірювання температури на поверхні прогонової будови та теоретичне моделювання зміни температури протягом дня із застосуванням методу скінченних елементів. Також проведено аналіз напружено-деформованого стану елементів прогонової будови.

Результати. Проведене моделювання кліматичних впливів з урахуванням сонячної радіації, температури повітря та швидкості вітру показало хорошу відповідність натурним вимірам, похибка в більшості точок не перевищувала 10 %. Максимальна різниця температури по висоті прогонової будови становила 14,2 °С, що свідчить про можливе зростання цих значень у літній період. Отримані результати підтверджують необхідність врахування реального температурного поля при проєктуванні та оцінці технічного стану мостів в умовах клімату України.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що перепади температури, по перерізу елементів прогонової будови, викликають внутрішні напруження, які потрібно враховувати під час проєктування та експлуатації залізобетонних мостів. Запропонована розрахункова математична модель, яка враховує сонячну радіацію, температуру повітря та швидкість вітру, показала високу точність і може ефективно використовуватись для прогнозування температурного поля в елементах конструкції мосту. Отримані результати свідчать про необхідність врахування реальних кліматичних умов під час проєктування та експлуатації мостів для забезпечення їхньої надійності та довговічності.

Ключові слова: автомобільна дорога, залізобетонна прогонова будова, кліматичні умови, математична модель, метод скінченних елементів, міст, напружено-деформований стан, температура, температурне поле, температурні напруження, сонячна радіація.

Вступ

Температурний вплив на прогонові будови мостів є постійним і неминучим чинником. Через низьку теплопровідність бетону в елементах залізобетонних прогонових будов виникають додаткові внутрішні зусилля, спричинені нерівномірним розподілом температури по перерізу конструкції. Часто значення цього впливу недооцінюють, однак практика свідчить, що за певних умов температурні деформації можуть суттєво позначатися на експлуатаційних характеристиках мостової споруди. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах глобальних кліматичних змін і зростання середньорічних температур повітря. За таких обставин температурний вплив стає ще більш суттєвим фактором, який необхідно враховувати при проєктуванні, експлуатації та обстеженні мостів. Для ефективного аналізу й прогнозування температурних навантажень слід поєднувати результати експериментальних досліджень на існуючих мостах з методами теоретичного моделювання.

Дослідження впливу температури на мостові конструкції розпочалося ще в середині минулого століття. Інженери та науковці почали виявляти дефекти на залізобетонних мостах, що експлуатуються, які пов'язувалися з дією кліматичних факторів, зокрема температури. Вивчення виникнення та розвитку таких дефектів активно проводилось у Німеччині [1, 2], Австрії [3], США [3, 4], де фіксували характерні пошкодження залізобетонних елементів. У Швеції, наприклад, на залізобетонних мостах спостерігали тріщини в елементах прогонових будов із сонячного боку [5]. Таким чином, температура виявилась одним із чинників, що спричиняє утворення тріщин і пошкоджень у конструктивних елементах залізобетонних мостів [6–8]. Це зумовило потребу в глибокому аналізі кліматичних впливів і дослідженні змін температурного поля в поперечному перерізі конструкцій, а також їхнього впливу на експлуатаційні характеристики споруд. Поєднуючи експериментальні дані, отримані на реальних об'єктах, із теоретичними моделями, дослідники створюють методики прогнозування та врахування температурних впливів під час проєктування й експлуатації мостів [9, 10].

У результаті досліджень різниці температур, що виникають по висоті залізобетонної прогонової будови (яку також називають температурним перепадом або градієнтом), проведених М. Прістлі у Новій Зеландії [11, 12], було запропоновано описувати її за допомогою кривої п'ятого порядку:

$$T(y) = T_0 \left(\frac{y}{1200} \right)^5, \quad (1)$$

де y — відстань від верху прогонової будови, мм;

T_0 — максимальне значення температури по висоті прогонової будови, °С.

Ці результати згодом були включені до національних будівельних норм Нової Зеландії [13], а пізніше й Австралії [14]. Базуючись на цьому досвіді та додаткових дослідженнях, проведених у США [15–17], спрощена форма цієї температурної кривої була включена і до американських будівельних норм. У Великій Британії дослідження, проведені з урахуванням місцевих кліматичних умов [18, 19], призвели до виявлення іншого типу різниці температур по висоті. Це знайшло відображення у відповідних національних будівельних стандартах [20], які згодом були впроваджені до європейського стандарту Eurocode EN 1991-1-5 [21], а пізніше перекладені в Україні у вигляді нормативного документа [22]. Проте, застосування однакового температурного перепаду по висоті конструкції для всіх країн Європи незалежно від клімату викликає сумніви.

На тлі глобальних змін клімату актуальність досліджень у цій сфері лише зростає [23, 24]. Сучасні наукові роботи активно вивчають вплив температурних чинників на напружено-деформований стан елементів мостів у різних кліматичних зонах [25–27]. В Україні також проводили дослідження кліматичних впливів та зміни температури в перерізі прогонових будов [28–30], однак більшість із них мали обмежений або несистемний характер, зокрема через нестачу експериментальних даних для мостів в кліматичних умовах України. Існуючі державні будівельні норми [31–33], з свого боку, фактично не враховують нерівномірного розподілу температури по перерізу залізобетонних елементів, а також пов'язаних із цим додаткових напружень і деформацій. Тому надзвичайно актуальним є теоретичне моделювання таких впливів на основі експериментальних даних, отриманих із реальних мостових конструкцій в умовах клімату України.

Метою цього дослідження є розроблення моделі кліматичних впливів, які протягом добового циклу діють на прогонову будову залізобетонного мосту. Порівнюючи результати числового моделювання з експериментальними даними, отриманими під час натурних вимірювань, досліджується можливість достовірного прогнозування зазначених температурних впливів. Окрему увагу приділено аналізу отриманих результатів та їхнього впливу на напружено-деформований стан елементів прогонової будови.

Виклад основного матеріалу

Кліматичні чинники та температура мосту

Зміни, та перепади температури в елементах прогонової будови, урахувуючи фізичний процес теплообміну, відбуваються трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та тепловим випромінюванням.

Серед основних кліматичних чинників, що впливають на зміну температурного режиму мостових споруд (рис. 1), виділяють сонячну радіацію, температуру навколишнього повітря та швидкість вітру [9, 34]. Найбільш суттєвий вплив здійснює сонячна радіація, яка формує нерівномірний розподіл температур у конструкції. Температура повітря переважно визначає рівномірну температуру мосту, тоді як вітер сприяє примусовій конвекції між повітрям і поверхнею споруди, що з часом вирівнює температурні показники конструкції з температурою довкілля. Теплове випромінювання інших об'єктів зазвичай впливає на температуру незначно.

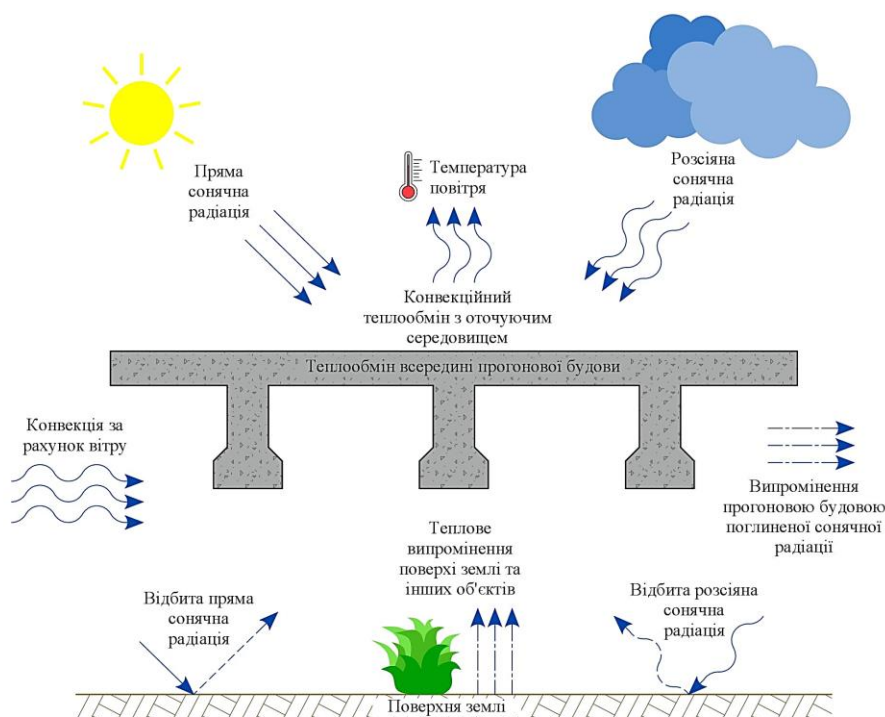


Рисунок 1 — Основні чинники, що впливають на температуру прогонової будови

Теплообмін випромінюванням

Передача тепла шляхом випромінювання відіграє ключову роль у процесі теплообміну на поверхні мостових конструкцій [16]. Упродовж світлового дня конструкція накопичує теплову енергію внаслідок дії сонячної радіації. Кількість сонячної енергії, що потрапляє на поверхню моста, залежить від погодних, атмосферних та географічних умов. Водночас частина тепла втрачається через відбиття від поверхні елементів моста. Рівень цих втрат визначається властивостями поверхні, зокрема її кольором. Кількість іррадіації, що поглинається поверхнею, можна визначити за таким виразом [35]:

$$G_{abs} = \alpha_{sc} G, \quad (2)$$

де G_{abs} — поглинута іррадіація, тобто кількість енергії, яку поглинає поверхня на одиницю площі;
 α_{sc} — поглинальна здатність поверхні;
 G — іррадіація, тобто сумарне випромінювання, яке падає на одиницю площі поверхні з навколишнього середовища.

Також відбувається чиста втрата енергії через теплове випромінювання, яке було накопичене в конструкції, в навколишнє середовище. Така втрата тепла відбувається здебільшого вночі та може призвести до того, що температура поверхні буде навіть нижчою за температуру навколишнього повітря [15]. Цей механізм описується законом Стефана – Больцмана та в загальному вигляді має наступний вигляд [35]:

$$Q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4), \quad (3)$$

де Q — кількість тепла, що випромінюється;
 ε — коефіцієнт теплового випромінювання поверхні, характеризує здатність поверхні тіла випромінювати теплову;
 σ — стала Стефана – Больцмана, визначає зв'язок між потоком випромінювання й ефективною температурою тіла і дорівнює $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$;
 T_s — температура поверхні тіла;
 T_{sur} — температура навколишнього середовища.

Сонячна радіація

Кількість сонячної радіації, що потрапляє на поверхню елементів мосту, залежить від кількох чинників: положення Сонця на небі у певний момент часу, географічного розташування моста, хмарності атмосфери, а також орієнтації та нахилу поверхні конструкції. Положення Сонця відносно будь-якої точки на земній поверхні визначається наступними кутами: географічною широтою φ , годинним кутом ω , деклінацією Сонця δ , кутом зеніту θ_z , висотою підйому сонця α_s та азимуту Сонця γ_s [36].

Географічна широта φ та годинний кут ω , характеризують положення точки на поверхні Землі відносно екватора та середнього меридіана відповідного часового поясу. Деклінація Сонця δ визначає сезонні зміни висоти Сонця над горизонтом впродовж року. Для заданого дня року її можна визначити за наближеною емпіричною формулою:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (4)$$

де n — номер дня року починаючи з 1 січня.

Кут зеніту Сонця θ_z , це кут між вертикаллю в точці спостереження та напрямком на Сонце. Кут висоти підйому сонця α_s показує на якій висоті над горизонтом знаходиться Сонце в момент часу. Азимут Сонця γ_s визначає напрямок на Сонце в горизонтальній площині. У цій статті напрямок відліку азимуту Сонця приймається «на південь» відповідно до [36], і змінюється від -180° (для східної півсфери) до $+180^\circ$ (для західної півсфери).

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \times \cos \omega \times \cos \delta + \sin \varphi \times \sin \delta, \quad (5)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z, \quad (6)$$

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right|, \quad (7)$$

де $\text{sign}(\omega)$ — це знак годинного кута Сонця (ω). Тобто, якщо $\omega > 0$, то $\text{sign}(\omega) = +1$, а якщо $\omega < 0$, то $\text{sign}(\omega) = -1$.

Сумарну сонячну радіацію, що надходить до будь-якої точки на Землі в момент певний часу, називають іррадіацією і визначають як суму трьох складових: прямої, розсіяної та відбитої радіації.

Сонячну радіацію, що надходить безпосередньо від сонячного диска, називають прямою сонячною радіацією. Інтенсивність прямої сонячної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню I_B , може бути визначена за моделлю, що базується на законі Бугера — Ламберта — Бера. Це досить поширений підхід для оцінки прямої сонячної радіації [29, 41 – 44], що дозволяє врахувати хмарність та мутність атмосфери:

$$I_B = I_0 e^{-km} \cos \theta_z = I_0 P^m \cos \theta_z, \quad (8)$$

$$m = \csc \alpha_s, \quad (9)$$

де I_0 — сонячна стала, що дорівнює приблизно $I_0 \approx 1367 \text{ Вт/м}^2$, та може бути уточнена для певного дня року;

k — коефіцієнт поглинання (або зникнення) сонячного випромінювання в атмосфері;

m — відносна оптична маса повітря;

$P = e^{-k}$ — коефіцієнт прозорості атмосфери.

Інтенсивність прямої сонячної радіації, що потрапляє на негоризонтальну поверхню може бути розрахований замінивши θ_z на кут падіння сонячного випромінювання θ на цю поверхню.

Розсіяна сонячна радіація — це частина сонячного випромінювання, яке змінює свій напрямок та розсіюється в атмосфері за рахунок її неоднорідності. Для ясного дня інтенсивність розсіяного випромінювання I_D на горизонтальну поверхню, може бути визначено за моделлю Лю – Джордана [36, 41]:

$$I_D = (0,271 \cdot I_0 - 0,294 \cdot I_{Bn}) \cdot \cos \theta_z, \quad (10)$$

де I_{Bn} — інтенсивність прямої нормальної сонячної радіації, Вт/м^2 .

Відбита сонячна радіація залежить від відбивної здатності поверхні, яка характеризується коефіцієнтом альбедо ρ_g . Значення альбедо може змінюватися залежно від типу ландшафту, характеру відбиваючих об'єктів та пори року. Інтенсивність відбитого випромінювання, яке після взаємодії з навколишнім середовищем досягає нахиленої поверхні, може бути визначена за ізотропною моделлю Лю – Джордана [36]:

$$I_R = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \rho_g (I_B + I_D), \quad (11)$$

де β — кут нахилу поверхні до горизонту.

Конвекція

Конвекційний теплообмін між потоком повітря та поверхнею тіла, що контактує з цим потоком, називається конвекційною тепловіддачею. Залежно від механізму виникнення руху повітря, розрізняють вільну та примусову конвекцію. У випадку мостових конструкцій на їхній поверхні можуть діяти обидва типи конвекції. Вільна конвекція виникає внаслідок різниці температур між конструкцією та навколишнім повітрям. Примусова конвекція спричинена дією атмосферного вітру, що змушує повітря активно обтікати поверхню. Процес конвекційної тепловіддачі може бути описаний законом охолодження Ньютона – Ріхмана, який має такий вигляд [35]:

$$q = h_c (T_s - T_\infty), \quad (12)$$

де q — густина теплового потоку при конвекції, Вт/м²;
 h_c — коефіцієнт теплопередачі (або тепловіддачі) при конвекції, Вт/м²/°C;
 T_s — температура поверхні, °C;
 T_∞ — температура рідини або газу, °C.

Коефіцієнт теплопередачі при конвекції h_c може бути визначений з виразу [9]:

$$h_c = 4v + 5,99, \quad (13)$$

де v — швидкість вітру, м/с;

Теплопровідність

У попередніх підрозділах було розглянуто процеси теплопередачі на поверхні елементів мосту. Проте перенесення тепла всередині конструктивних елементів зумовлене теплопровідністю, яка описується законом Фур'є. Для аналізу теплопровідності в матеріалах мостових конструкцій зазвичай застосовується диференційне рівняння теплопровідності, яке встановлює зв'язок між температурою, просторовими координатами та часом [34]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (14)$$

де x, y, z — просторові координати, що характеризують положення в системі координат по ширині висоті та довжині мосту;

k_x, k_y, k_z — коефіцієнти теплопровідності в напрямках відповідних координат;

t — час, с;

T — температура в точці з координатами (x, y, z) в час t ;

Q — тепловий потік;

c — питома теплоємність матеріалу;

ρ — щільність матеріалу елементу.

Опис мосту

Трипрогоновий залізобетонний міст через річку Марунька, розташований поблизу села Чижиків на автомобільній дорозі II категорії, має прогонову будову, що складається з двох частин — старої та нової (рис. 2). Прогонова схема мосту – 6,0 + 8,66 + 6,0 м.



Рисунок 2 — Загальний вид залізобетонного мосту

Стара частина представлена монолітною нерозрізною залізобетонною плитою зі звичайним армуванням, яка із зовнішнього боку має тротуарну консоль.

Нова частина моста виконана як розрізна залізобетонна балкова конструкція. У середньому прогоні розміщено шість двотаврових попередньо напружених балок довжиною 8,66 м (за типовим проєктом ВТП-16). Крайні прогони нової частини збудовані зі збірних залізобетонних плитних балок довжиною 6,0 м із звичайним армуванням. У кожному з крайніх прогонів встановлено по чотири плитні балки шириною 0,98 м та висотою 0,3 м (за типовим проєктом Випуск 5-04-145). Додатково, під тротуаром у крайніх прогонах встановлено по одній П-подібній балці висотою 1,1 м та шириною 0,65 м.

Виконання замірів температури на мосту

Заміри температури на мосту виконували в ясний день 31 травня 2023 року. Виміри температури здійснювали об 11:00 ранку та 14:00 дня за характеристичними точками перерізу конструкції за допомогою електронного безконтактного пірометра. Вимірювання проводили на крайньому прогоні мосту. Результати замірів температури наведені на **рис. 3** та **табл. 1**.

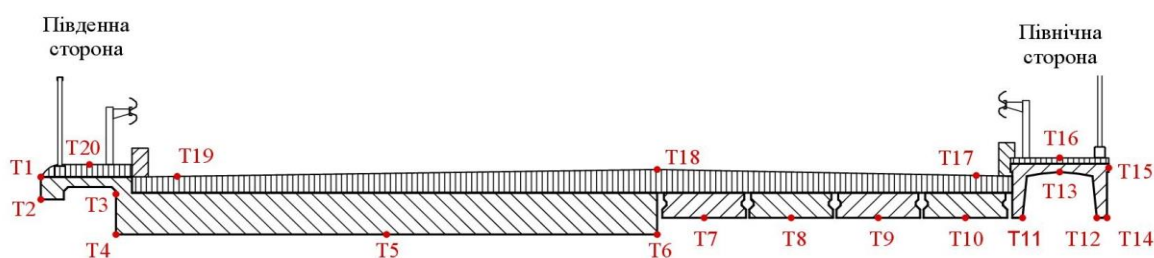


Рисунок 3 — Схема вимірів температури по перерізу мосту

Таблиця 1

Значення заміряних температур, °C

Точка виміру	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Температура в 11:00	25,1	23,7	19,8	18,9	18,8	17,9	18,4	18,7	18,7	18,7
Температура в 14:00	35,9	29,5	21,7	22,5	19,9	19,4	19,4	19,7	19,6	19,7
Точка виміру	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Температура в 11:00	18,8	20,5	18,0	21,8	24,0	40,0	33,9	34,0	35,9	39,9
Температура в 14:00	21,3	21,6	20,3	23,6	23,4	57,5	42,3	41,8	45,2	53,7

Протягом дня погода була ясна, з невеликою хмарністю. Температура повітря досягала максимуму в 24 °C. Швидкість вітру, відповідно до метеорологічних даних коливалася від 2 м/с до 4 м/с і в цілому була невелика.

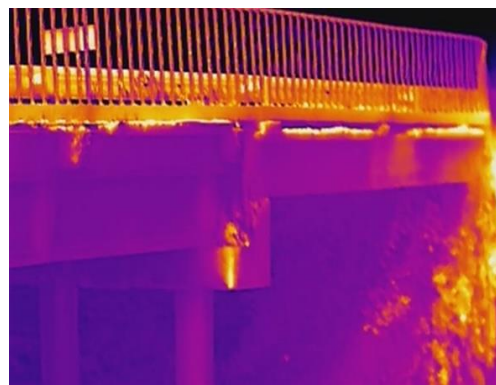
Міст орієнтовано з північного сходу на південний захід, тож у першій половині дня під прямим сонячним випромінюванням знаходиться південна сторона мосту, а у другій половині дня північна. Азимут повороту бічних граней мосту складає $\gamma = -44^\circ$ та -134° , а кут падіння сонячного випромінювання θ для кожної із сторін, у певний момент часу може бути визначений за рівнянням [36], залежно від азимуту сонця γ_s , кута нахилу поверхні елементу β , та кута зеніту Сонця θ_z :

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (15)$$

Крім того було проведено огляд конструкції за допомогою тепловізора для аналізу загального характеру розподілу температурних полів на поверхні прогонової будови (**рис. 4**).



а)



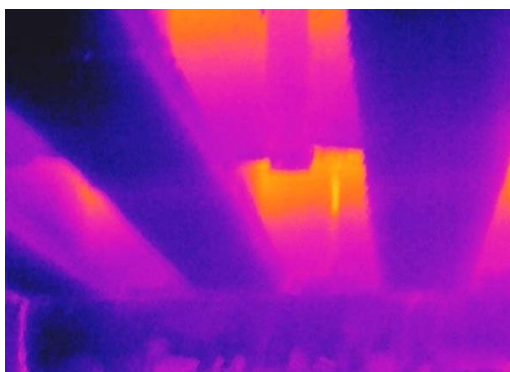
б)



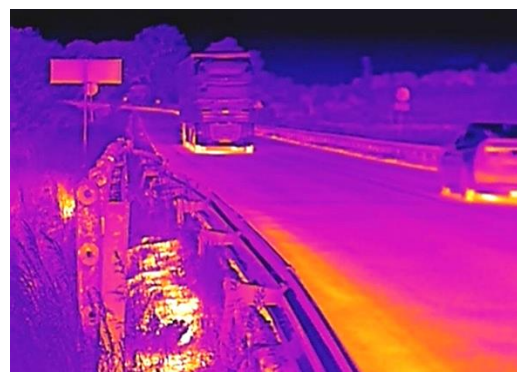
в)



г)



д)



е)

- а) балки середнього прогону;
- б) П-подібна балка крайнього прогону (в тіні);
- в) бічна поверхня плитної балки;
- г) низ плитних балок та монолітної прогонової будови;
- д) діафрагмове об'єднання балок середнього прогону;
- е) проїзна частина на мосту.

Рисунок 4 — Термограми конструкцій мосту

Властивості матеріалів та вихідні дані для моделювання

Для подальшого аналізу важливими є також механічні та теплотехнічні властивості матеріалу прогонової будови.

Міцність бетону була визначена за допомогою неруйнівного контролю та відповідає класу бетону В25, тоді модуль пружності $E = 30,0$ ГПа, відповідно до [31]. Модуль пружності асфальтобетону прийнятий відповідно до [37], як для II категорії дороги.

Коефіцієнт теплопровідності k , що характеризує здатність матеріалу проводити тепло, прийнятий для бетону рівним $1,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$ [38], а для асфальтобетону рівним $0,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$ [39]. Питома теплоємність прийнята $C_p = 920 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$ для бетону [38] та $C_p = 880 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$ для асфальтобетону [39]. Коефіцієнти поглинання сонячної енергії α_{sc} та коефіцієнт теплового випромінювання зовнішньою поверхнею ε прийняті відповідно до [40].

Альbedo поверхні під мостом, зважаючи на те, що під крайнім прогоном росте травостій, прийняте $\rho_g = 0,1$. Більш детально прийняті властивостей матеріалів наведені в **табл. 2**.

Таблиця 2

Властивості матеріалів прийняті під час розрахунку

	Коефіцієнт теплопровідності k , Вт/м·°K	Питома теплоємність C_p , Дж/кг·°C	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт температурного розширення α , 1/°C	Коефіцієнт поглинання сонячної енергії α_{sc}	Коефіцієнт теплового випромінювання ε
Бетон прогонових будов	1,4	920	30,00	10×10^{-6}	0,7	0,62
Асфальтобетон	0,9	880	0,19	$3,0 \times 10^{-5}$	0,9	0,93

Важливим є також значення початкової температури. Це така температура, за якої напруження в елементах залізобетону дорівнюють нулю. Точне визначення такої температури на практиці представляє собою складну задачу, тому в дослідженнях прийнято приймати початкову температуру такою, за якої температура прогонової будови зрівнюється з температурою повітря, а температурний перепад по перерізу прогонової будови мінімальний [18, 19, 41]. Зазвичай така температура фіксується рано вранці, коли сонячна радіація ще не почала діяти. У нашому випадку така температура прийнята в 6:00 ранку (схід сонця фіксувався в 5:25).

Розрахункова модель

У цьому дослідженні розглядається тільки крайній прогін мосту. Розрахункова модель (**рис. 5**) будується за допомогою методу скінченних елементів, до якої застосовані граничні умови описані вище.

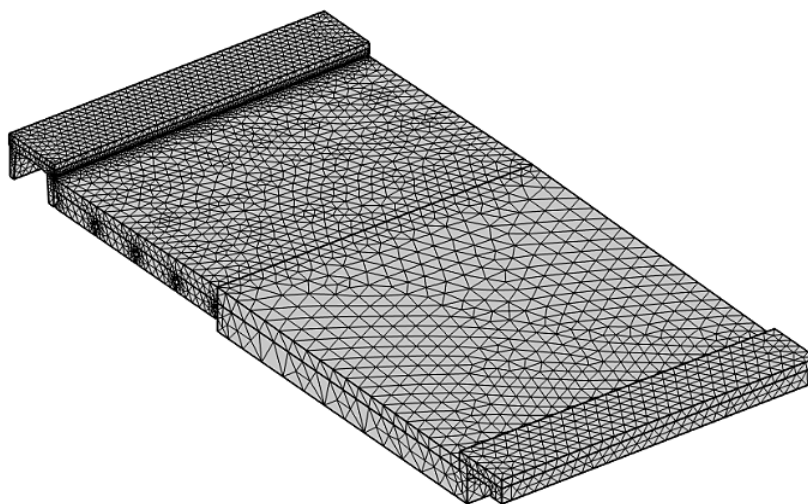


Рисунок 5 — Розрахункова модель прогонової будови

Початок симуляції кліматичних впливів на елементи прогонової будови відбувається з 6:00 ранку 31 травня, протягом доби, по 6:00 ранку 1 червня. Початкова температура елементів мосту прийнята рівною температурі повітря о 6 ранку, а саме 15,5 °С. Зміна інтенсивності сумарної, прямої та розсіяної сонячної радіації на горизонтальну поверхню протягом дня наведено на **рис. 6**. Розподіл температури повітря протягом дня наведено на **рис. 7**.

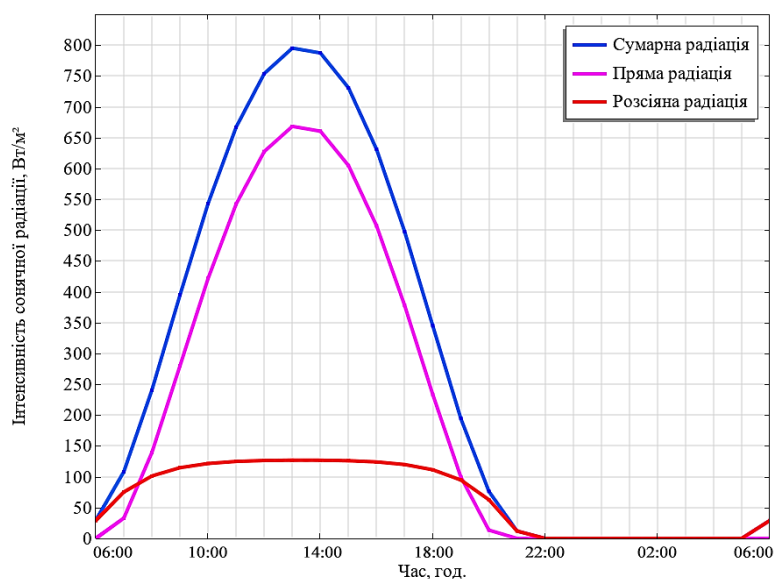


Рисунок 6 — Інтенсивність сумарного, прямого та розсіяного сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню протягом доби

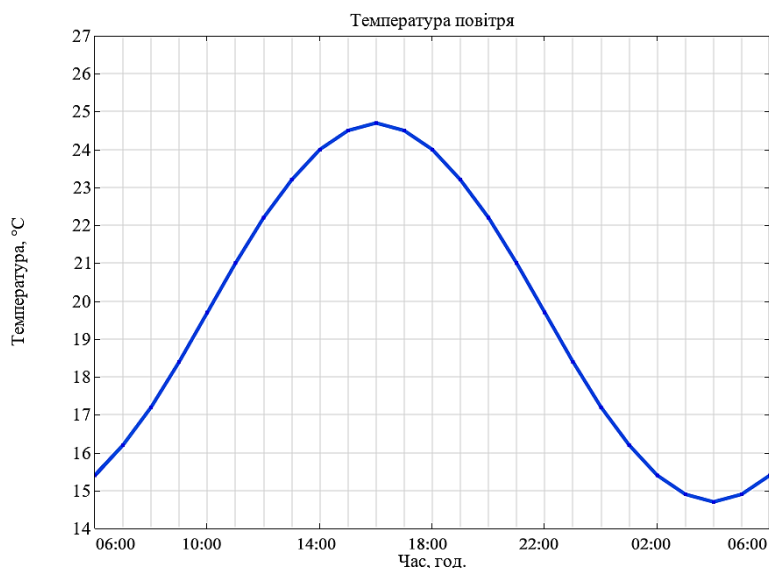
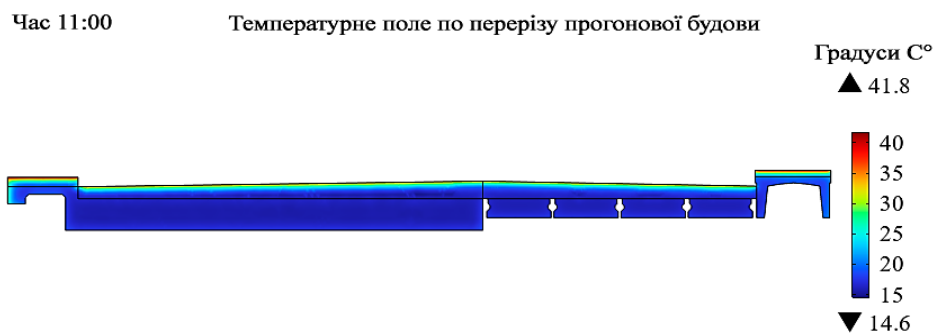


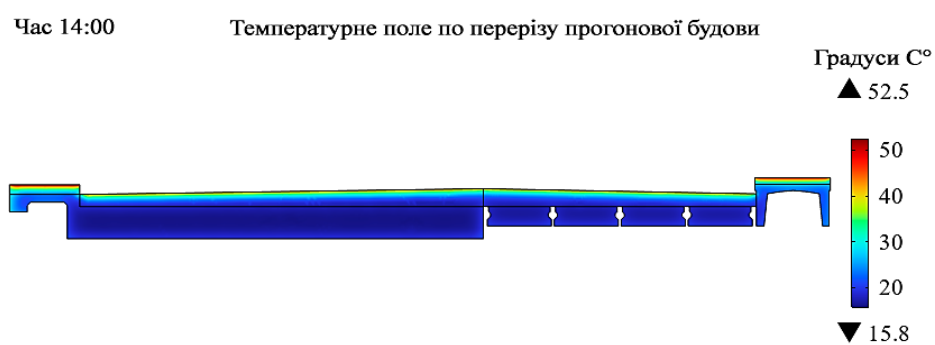
Рисунок 7 — Зміна температури повітря протягом розглянутої доби з 6:00 31 травня по 6:00 1 червня 2023 року

Результати розрахунку

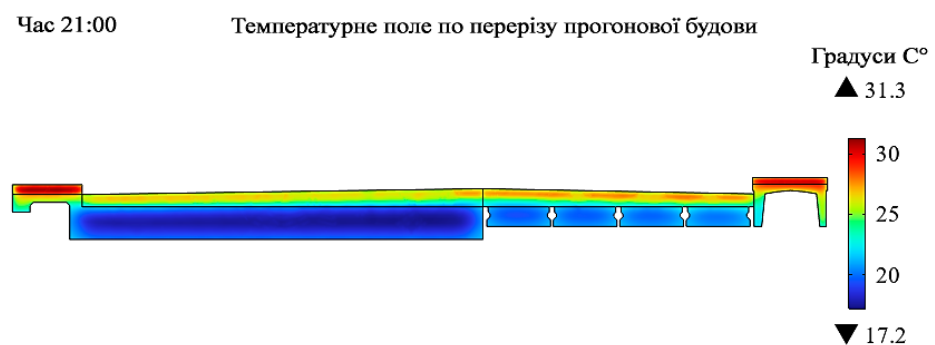
У результаті моделювання кліматичних факторів, можемо дослідити зміну температури прогонової будови протягом дня. Розподіл температури по перерізу прогонової будови в різний момент часу наведений на **рис. 8**.



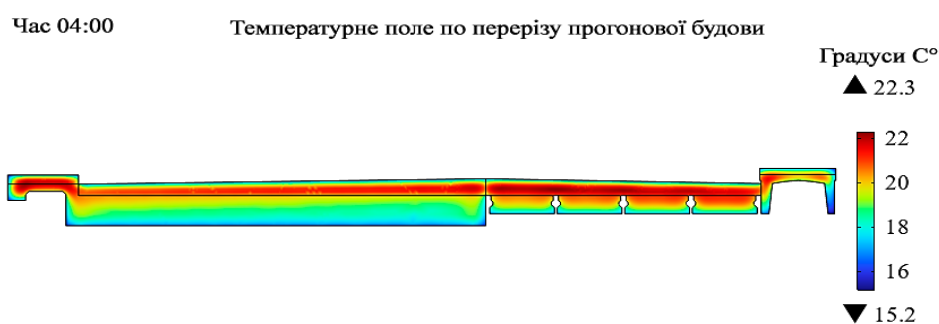
а)



б)



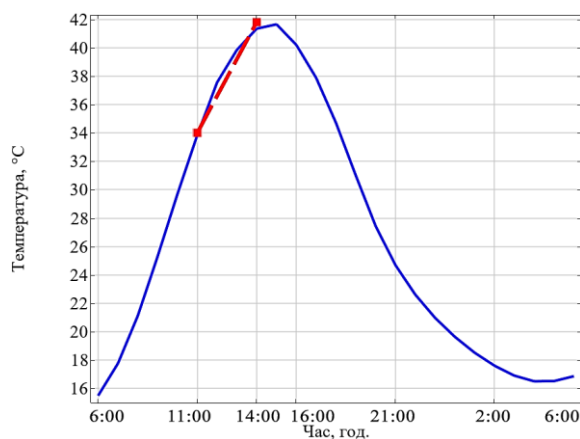
в)



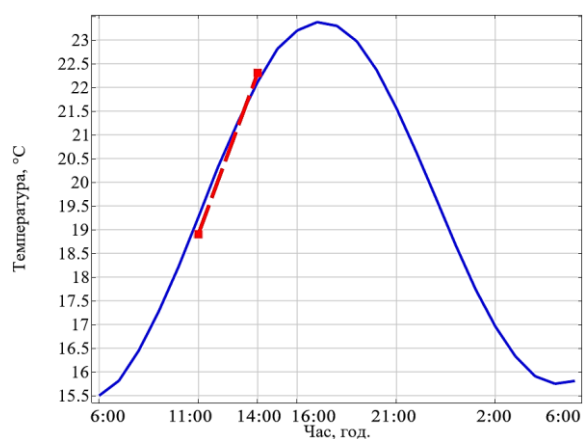
г)

а) в 11:00 ранку; в) в 21:00;
б) в 14:00; г) в 4:00 ранку наступного дня.

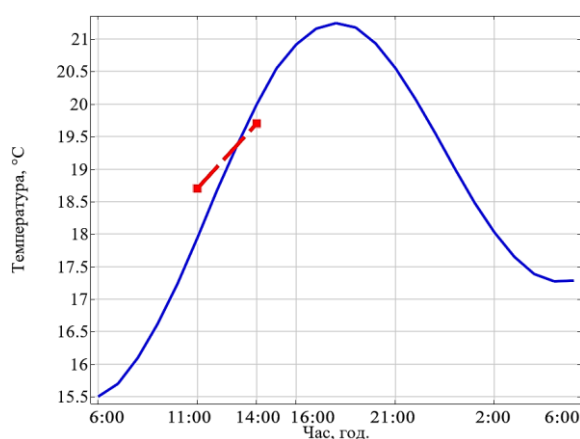
Рисунок 8 — Розподіл температури по перерізу прогонової будови (в градусах Цельсія)



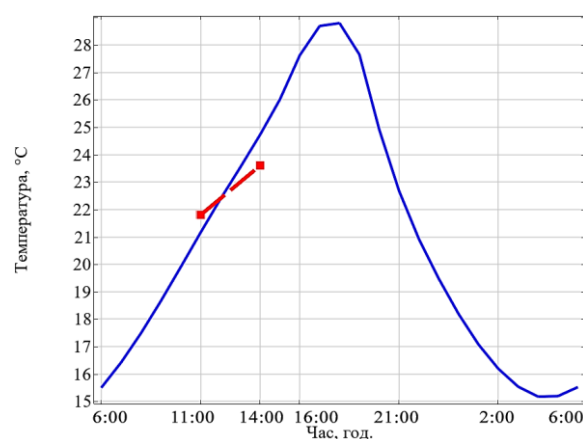
а)



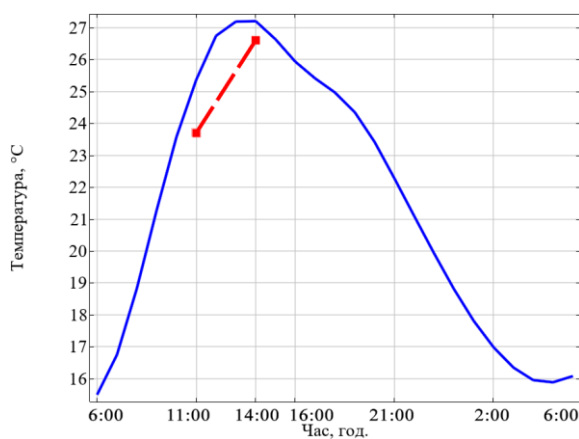
б)



в)



г)



д)

- а) проїзна частина (Т18); г) бічна грань ІІ-подібної балки (Т14);
 б) низ монолітної прогонової будови (Т4); д) бічна грань монолітної прогонової будови (Т2).
 в) низ плитних балок (Т8);

Рисунок 9 — Зміна температури з часом в точках перерізу мосту, заміряна (червоним кольором) та отримана теоретично (синім кольором)

Отримані результати теоретичного моделювання температури, що виникає на поверхні прогонової будови при порівнянні з польовими вимірами показує непогану точність. По більшості точок похибка між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 10 %. Найбільша відмінність виникає на боковій поверхні прогонової будови (до 20 %). Ця похибка пов'язана з точністю польових вимірів, а також з дещо узагальненим підходом до моделювання кліматичних факторів, зокрема хмарності. Температура в деяких точках, як теоретична, так і заміряна наведена на **рис. 9**.

Заміряні та отримані теоретично температурні перепади по висоті прогонової будови, можна порівняти зі значеннями та виглядом температурних перепадів, що прийняті в Eurocode EN 1991-1-5 [21], а також з кривою п'ятого порядку Прістлі [11, 12] (формула 1). Значення температури прийняті на поверхні конструкції, тому у верхній частині прогонової будови використані значення температури, що встановлювалася в тротуарній консолі. Такий максимальний заміряний температурний перепад по висоті виник у 14:00, а змодельований у 12:00. Порівняння таких перепадів наведено для монолітної прогонової будови на **рис. 10**. Варто також зазначити, що температурні перепади були заміряні і відповідно змодельовані, хоч і в теплий, але травневий день. Тому значення перепаду температур у більш спекотні літні дні може бути значно більшим.

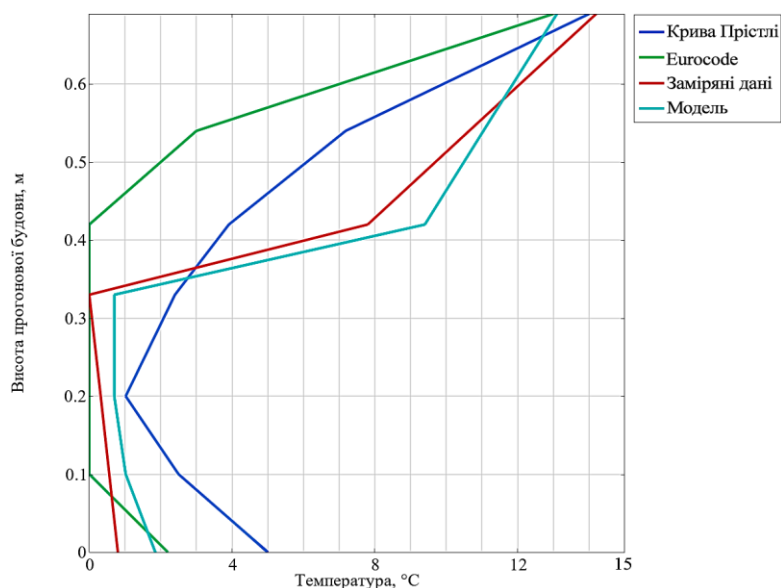


Рисунок 10 — Температурний перепад поверхні монолітної прогонової будови по висоті

Внутрішні напруження, що виникають від нерівномірного розподілу температури по перерізу прогонової будови протягом розрахункової доби коливаються від 2,07 МПа (в 4:00 ранку) до —3,51 МПа (в 14:00) і наведені на **рис. 11** та **рис. 12**.

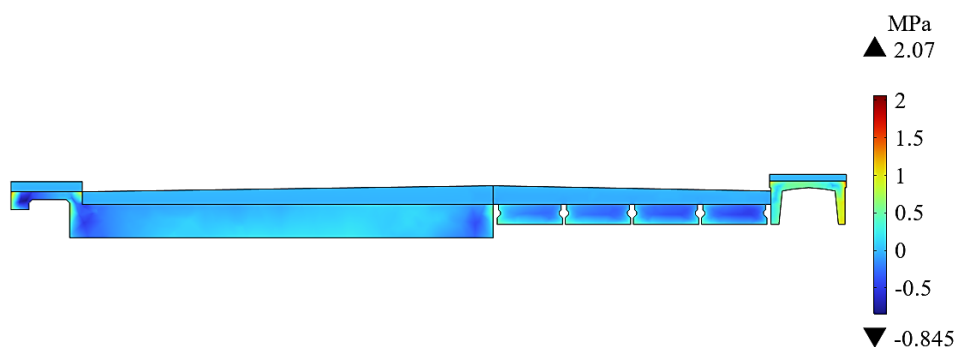


Рисунок 11 — Внутрішні напруження, що виникають у прогоновій будові від дії температури: в 4:00

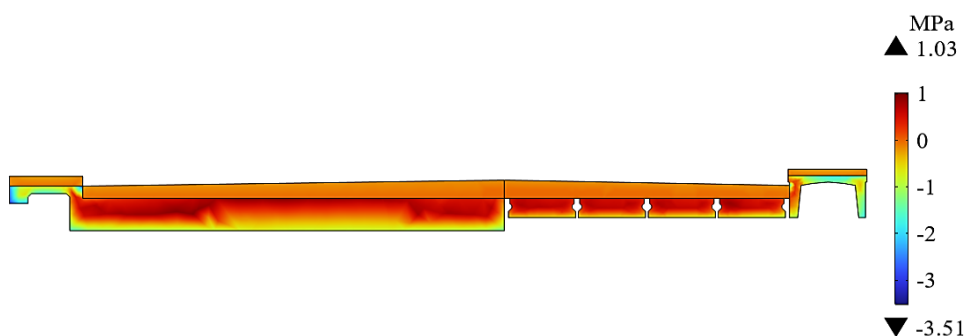


Рисунок 12 — Внутрішні напруження, що виникають у прогоновій будові від дії температури: в 14:00

Висновки

Дія температури є одним з чинників, що впливають на технічний стан залізобетонних мостів. З огляду на глобальні кліматичні зміни, його значущість може зростати. Результати моделювання основних кліматичних чинників, які впливають на температурний режим мосту, свідчать, що зміни температури можна прогнозувати теоретично з достатньою точністю. Розподіл температури по перерізу прогонової будови, отриманий з розрахункової моделі побудованої методом скінченних елементів, добре узгоджується з результатами натурних вимірювань, проведених на мосту через річку Марунька. Максимально зафіксована різниця температури по висоті прогонової будови становить 14,2 °C у теплий травневий день, однак у більш спекотні літні періоди це значення може бути суттєво вищим. Проведене порівняння отриманих результатів із поширеними моделями врахування температурних перепадів по висоті конструкції, вказує на необхідність їх адаптації до кліматичних умов України. Крім того, встановлено, що нерівномірний розподіл температури по висоті конструкції спричиняє виникнення значних внутрішніх напружень у прогоновій будові мосту, що може впливати на її довговічність та надійність. Таким чином, ця проблема потребує подальшого вивчення та дослідження.

Список літератури

1. Leonhardt F., Kolbe G., Peter J. Temperature differences endanger prestressed concrete bridges. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1965. Vol. 7, P. 157–163.
2. Leonhardt F., Lippoth W. Folgerungen aus Schäden an Spannbetonbrücken. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1970. Vol. 65(10), P. 231–244.
3. Zichner T. Thermal Effects on Concrete Bridges. *C. E. B. Enlarged Meeting—Commission 2*, Pavia, 1981. P. 292–313.
4. Memorandum: In-Depth Inspection of the Creeks and Spalls Developing in the Walls and Bottom Slabs of the F-11-AK, F-11-AL Structures over Miller Creek on I-70. *Colorado Department of Highways*, Denver, 1982.
5. Larsson O. Climate related thermal actions for reliable design of concrete structures. Doctoral Thesis, Lund, 2012. P. 159.
6. Лучко Й. Й., Кархут І. І., Кравець І. Б. Дослідження мостів, збудованих в Україні в 1998 і 2001 роках, що були зруйновані тривалою експлуатацією та повеннями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2021. № 20, С. 26-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2021/245313>.
7. Лучко, Й. Тріщиностійкість бетонних та залізобетонних конструкцій з позицій механіки руйнування. *Наука та будівництво*, Київ, 2024. Вип. 39(1). С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-7>.
8. Сало В. Ю., & Сало О. Ю. До питання експлуатаційного стану залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів у західних областях України. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*, Львів, 2018. Вип. 888, С. 123–126.
9. Wang Y. G., He X. J., Ouyang F., He J., Wu W. W., Wu C. New method for fine calculation of bridge temperature field based on BIM solar radiation analysis. *Advances in Civil Engineering, Hindawi*. 2023. Vol. 2023(1), 6855116, P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6855116>.

10. Raghav Mahto. Thermal stress analysis in pre-stressed concrete bridges using COMSOL Multiphysics. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*. 2025; Vol. 6(1), P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.36>.
11. Priestley M. Structural Model of a Prestressed Concrete Box Girder Bridge Phase 2: Thermal Loading. Vol 1- Model Description and Temperature Results. *MWD Central Labs*, 1972. Report No. 440.
12. Priestley, M. Linear Heat-Flow Analysis of Concrete Bridge Deck. Research Report. Department of Civil Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1976. 48 p.
13. NZ Transport Agency. Bridge Manual (3rd edition) (SP/M/022). Wellington, NZ, 2013. 374 p.
14. Australian Standard AS 5100.2:2017 Bridge design. Part 2: Design loads, Sydney 2017. 137 p.
15. Imbsen R. A., Vandershaf D. E., Schamber R. A., Nutt R. V. Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures. National Cooperative Highway Research Program Report, 276. Washington, 1985. 99 p.
16. Potgieter I. C., Gamble W. L. Response of Highway Bridges to Nonlinear Temperature Distributions. Civil Engineering Studies, Structural Research Series N. 505. Illinois, 1983. 320 p.
17. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C., 2010. 1822 p.
18. Emerson M. The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 561. Department of the Environment, Crowthorne, 1973. 33 p.
19. Emerson M. Temperature differences in bridges: basis of design requirements. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 765. Department of the Environment, Crowthorne, 1977. 39 p.
20. BRITISH STANDARD BS 5400-2:1978. Steel, concrete and composite bridges — Part 2: Specification for loads. London 1978. 48 p.
21. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions – Thermal actions. Brussels, 2003. 49 p.
22. ДСТУ-НБ EN 1991-1-5:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-5. Загальні дії. Теплові дії (EN 1991-1-5:2003, IDT). Зміна № 1. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. 59 с. (Інформація та документація).
23. Athanasopoulou A., Sousa M.L., Dimova S., Rianna G., Mercogliano P., Villani V., Croce P., Landi F., Formichi P., Markova J. Thermal design of structures and the changing climate, EUR 30302 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. 70 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.2760/128894>.
24. Milić P., Kušter Marić, M. Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure. *Građevinar Časopis Hrvat. Saveza Građevinskih Inženjera*, 2023. Vol. 75, P. 893–906. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3756.2023>.
25. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. In *AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, p. 020033. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5038623>.
26. Liu C., DeWolf J. T. Effect of temperature on modal variability for a curved concrete bridge. In *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2006. Vol. 6174, P. 1050–1060. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.655811>.
27. Bian J., Wang Y., Li Y. Application of Thermodynamic Models in Bridge Temperature Field Simulation and Thermal Stress Analysis. *International Journal of Heat & Technology*, 2024. Vol. 42(4), P. 1317–1326. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420422>.
28. Лучко Й. Й., Ковальчук В.В. Розподіл температури у залізобетонних балкових конструкціях мостів. *Мости і тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2012. Вип. 3, С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2012/26483>.
29. Безбабічева О. І., Розенфельд М. В., Більченко А. В., Лукін О. М., Бойчук І. П. Науково-дослідна робота 0207U006841, 0107U004543. Звіт про науково-дослідну роботу розробити рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в мостових конструкціях з покриттям. Харків, ХНАДУ, 2007. 139 с.
30. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Алгоритм визначення граничних умов, для дослідження температурних напружень та деформацій балкових конструкцій залізничних мостів від кліматичних впливів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2012. Вип. 46, С. 233–243.

31. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, Київ, 2006. 359 с. (Інформація та документація).
32. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. Мінрегіонбуд України, Київ, 2009. 71 с. (Інформація та документація).
33. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Мінрегіонбуд України, Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).
34. Zhou G. D., Yi T. H.. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. Vol. 9(12), 217983. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/217983>.
35. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. 992 p.
36. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 936 p.
37. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Міністерство інфраструктури України, Київ, 2019. 62 с. (Інформація та документація).
38. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Проектування конструкцій на дії вогню. Мінрегіон України, Київ, 2013. 120 с. (Інформація та документація).
39. Mirzanamadi R., Johansson P., Grammatikos S. A. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. *Construction and Building Materials*, 2018. Vol. 158, P. 774–785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068>.
40. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. ДП "УкрНДНЦ", Київ, 2022. 156 с. (Інформація та документація).
41. Lu Y., Li D., Wang K., Jia S. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges. *Applied sciences*, 2021, Vol.11, 6332. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146332>.
42. Yang H., Zhao X., Fu L., Ruan X., Li Y., Chen D. Study of Periodical Temperature Change Induced Deformation of an Inclined Steel Arch Bridge Exposed to Actual Environment Based on Synchronous Multi-Member Thermal Simulation. *Sustainability*, 2022. Vol. 14(16), 10042. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610042>.
43. Rapti A. S. Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters. *Solar Energy*, 2000. Vol. 69(2), P.99–111. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00053-0).
44. Sayigh, A. A. M. Solar energy engineering. Academic Press, London, 2012. 526 p.

References

1. Leonhardt F., Kolbe G., Peter J. Temperature differences endanger prestressed concrete bridges. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1965. Vol. 7, P. 157–163 [in English].
2. Leonhardt F., Lippoth W. Folgerungen aus Schäden an Spannbetonbrücken. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1970. Vol. 65(10), P. 231–244 [in English].
3. Zichner T. Thermal Effects on Concrete Bridges. *C. E. B. Enlarged Meeting—Commission 2*, Pavia, 1981. P. 292–313 [in English].
4. Memorandum: In-Depth Inspection of the Creeks and Spalls Developing in the Walls and Bottom Slabs of the F-11-AK, F-11-AL Structures over Miller Creek on I-70. *Colorado Department of Highways*, Denver, 1982 [in English].
5. Larsson O. Climate related thermal actions for reliable design of concrete structures. Doctoral Thesis, Lund, 2012. P. 159 [in English].
6. Luchko J. J., Karkhut I. I., Kravets I. B. Study of the bridges built in Ukraine in 1998 and 2001, that were destroyed by long-term operation and floods. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2021. № 20, P. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245313> [in Ukrainian].

7. Luchko J. Trishchynostiikist betonnykh ta zalizobetonnykh konstrukttsii z pozytsii mekhaniky ruinuвання (Crack resistance of concrete and reinforced concrete structures from the standpoint of fracture mechanics). *Nauka ta budivnytstvo*, Kyiv, 2024. Vol. 39(1). P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-7> [in Ukrainian].
8. Salo V., Salo O. To the questionnaire of the operating condition of span constructions of road bridges in western areas of Ukraine. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika»*. *Teoriia i praktyka budivnytstva*, Lviv, 2018. Vol. 888, P. 123–126 [in Ukrainian].
9. Wang Y. G., He X. J., Ouyang F., He J., Wu W. W., Wu C. New method for fine calculation of bridge temperature field based on BIM solar radiation analysis. *Advances in Civil Engineering, Hindawi*. 2023. Vol. 2023(1), 6855116, P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6855116> [in English].
10. Raghav Mahto. Thermal stress analysis in pre-stressed concrete bridges using COMSOL Multiphysics. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*. 2025; Vol. 6(1), P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.36> [in English].
11. Priestley M. Structural Model of a Prestressed Concrete Box Girder Bridge Phase 2: Thermal Loading. Vol 1- Model Description and Temperature Results. *MWD Central Labs*, 1972. Report. No. 440 [in English].
12. Priestley, M. Linear Heat-Flow Analysis of Concrete Bridge Deck. Research Report. Department of Civil Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1976. 48 p. [in English].
13. NZ Transport Agency. Bridge Manual (3rd edition) (SP/M/022). Wellington, NZ, 2013. 374 p. [in English].
14. Australian Standard AS 5100.2:2017 Bridge design. Part 2: Design loads, Sydney 2017. 137 p. [in English].
15. Imbsen R. A., Vandershaf D. E., Schamber R. A., Nutt R. V. Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures. National Cooperative Highway Research Program Report, 276. Washington, 1985. 99 p. [in English].
16. Potgieter I. C., Gamble W. L. Response of Highway Bridges to Nonlinear Temperature Distributions. Civil Engineering Studies, Structural Research Series N. 505. Illinois, 1983. 320 p. [in English].
17. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C., 2010. 1822 p. [in English].
18. Emerson M. The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 561. Department of the Environment, Crowthorne, 1973. 33 p. [in English].
19. Emerson M. Temperature differences in bridges: basis of design requirements. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 765. Department of the Environment, Crowthorne, 1977. 39 p. [in English].
20. BRITISH STANDARD BS 5400-2:1978. Steel, concrete and composite bridges Part 2: Specification for loads. London 1978. 48 p. [in English].
21. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions – Thermal actions. Brussels, 2003. 49 p. [in English].
22. DSTU-N B EN 1991-1-5:2012. Yevrokod 1. Dii na konstrukttsii. Chastyna 1-5. Zahalni dii. Teplovi dii (Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-5. General actions. Thermal actions (EN 1991-1-5:2003, IDT). Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. 59 p. [in Ukrainian].
23. Athanasopoulou A., Sousa M.L., Dimova S., Rianna G., Mercogliano P., Villani V., Croce P., Landi F., Formichi P., Markova J. Thermal design of structures and the changing climate, EUR 30302 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. 70 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.2760/128894> [in English].
24. Milić P., Kušter Marić, M. Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure. *Građevinar Časopis Hrvat. Saveza Građevinskih Inženjera*, 2023. Vol. 75, p. 893-906. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3756.2023> [in English].
25. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. In *AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, P. 020033. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0038623> [in English].

26. Liu C., DeWolf J. T. Effect of temperature on modal variability for a curved concrete bridge. In *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2006. Vol. 6174, P. 1050-1060. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.655811> [in English].
27. Bian J., Wang Y., Li Y. Application of Thermodynamic Models in Bridge Temperature Field Simulation and Thermal Stress Analysis. *International Journal of Heat & Technology*, 2024. Vol. 42(4), P. 1317–1326. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420422> [in English].
28. Luchko J. J., Kovalchuk V. V. Distribution temperature in reinforced concrete beam bridge structures. *Mosty i toneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2012. Vol. 3, P. 111-119. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2012/26483> [in English].
29. Bezbabicheva O. I., Rozenfeld M. V., Bilchenko A. V., Lukin O. M., Boichuk I. P. Naukovo-doslidna robota 0207U006841, 0107U004543. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu: rozrobty rekomendatsii z rozrakhunku temperaturnykh poliv i napruzhen v mostovykh konstruktsiakh z pokryttiam (Research report: development of recommendations for temperature field and stress calculation in bridge structures with deck surfacing). Kharkiv, KhNADU, 2007. 139 p. [in Ukrainian]
30. Luchko J. J., Kovalchuk V. V. Alhorytm vyznachennia hranichnykh umov dlia doslidzhennia temperaturnykh napruzhen ta deformatsii balkovykh konstruktsii zaliznychnykh mostiv vid klimatychnykh vplyviv (Algorithm for determining boundary conditions for the study of thermal stresses and deformations in railway girder bridges under climatic effects). *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 2012. Vol. 46, P. 233–243 [in Ukrainian].
31. DBN V.2.3-14:2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravila proektuvannia (Transport structures. Bridges and culverts. Design rules). Kyiv: Ministry of Construction, Architecture and Housing of Ukraine, 2006. 359 p. [in Ukrainian].
32. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby (Transport structures. Loads and impacts. Bridges and culverts). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 2009. 71 p. [in Ukrainian].
33. DBN V.2.3-22:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (Transport structures. Bridges and culverts. Basic design requirements). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 2009. 73 p. [in Ukrainian].
34. Zhou G. D., Yi T. H. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. Vol. 9(12), 217983. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/217983> [in English].
35. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. 992 p. [in English].
36. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 936 p. [in English].
37. HBN V.2.3-37641918-559:2019. Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia (Automobile roads. Flexible pavement. Design). Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine, 2019. 62 p. [in Ukrainian].
38. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Yevrokod 2: Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni pravila. Proektuvannia konstruktsii na dii vohniu (Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design). Kyiv: Minregion Ukrainy, 2013. 120 p. [in Ukrainian].
39. Mirzanamadi R., Johansson P., Grammatikos S. A. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. *Construction and Building Materials*, 2018. Vol. 158, P. 774–785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068> [in English].
40. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvittlennia ta hariachoho vodosnabzhenia (Energy performance of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2022. 156 p. [in Ukrainian].
41. Lu Y., Li D., Wang K., Jia S. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges. *Applied sciences*, 2021, Vol.11, 6332. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146332> [in English].

42. Yang H., Zhao X., Fu L., Ruan X., Li Y., Chen D. Study of Periodical Temperature Change Induced Deformation of an Inclined Steel Arch Bridge Exposed to Actual Environment Based on Synchronous Multi-Member Thermal Simulation. *Sustainability*, 2022. Vol. 14(16), 10042. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610042> [in English].
43. Rapti A. S. Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters. *Solar Energy*, 2000. Vol. 69(2), P. 99–111. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00053-0) [in English].
44. Sayigh, A. A. M. Solar energy engineering. Academic Press, London, 2012. 526 p. [in English].
-

Danylo Lukin, <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>

Kharkiv National Automobile and Highway University (KHNADU), Kharkiv, Ukraine

MODELING DAILY TEMPERATURE EFFECTS ON A CONCRETE BRIDGE IN THE UKRAINIAN CLIMATE CONDITIONS

Abstract

Introduction. Temperature effects on bridge superstructure are a constant factor influencing their performance. Due to low thermal conductivity of concrete, temperature gradients develop across cross-section of the structure, causing additional deformations and internal stresses. With global climate change and rising average annual temperatures, this issue has become especially important.

Problem statement. Underestimating temperature effects during bridge design and operation can lead to structural damage, reduced service life, and decreased reliability. Although European and American standards include models for temperature effects, Ukraine lacks comprehensive studies considering local climate conditions. A significant gap exists in experimental data, which complicates adapting or developing accurate design models.

Purpose. The main goal is to develop and validate a mathematical model for temperature distribution in concrete bridge superstructure over a daily cycle, specific to the Ukrainian climate. The model incorporates external climate parameters and material properties. It is validated by field measurements to improve accuracy in estimating temperature-induced stresses and enhancing structural reliability.

Materials and methods. The study analyzes the impact of climatic factors on the temperature of concrete bridge structure under Ukrainian climate conditions. Both analytical and numerical modeling were used. Experimental temperature measurements were taken on the span surface, combined with theoretical temperature modeling over a daily cycle using the finite element method. The stress-strain state of the span elements was also analyzed.

Results. The model, accounting for solar radiation, air temperature, and wind speed, showed good agreement with field data, with errors mostly below 10 %. The maximum temperature difference recorded in May was 14.2 °C, indicating potential increases during summer. Results confirm the importance of considering real temperature fields in the design and condition assessment of bridges in Ukraine.

Conclusions. Temperature effects have a significant impact on the stress-strain state of concrete bridge superstructure, causing notable internal stresses and temperature gradients. The proposed model, which includes solar radiation, air temperature, and wind speed, proved accurate and suitable for predicting temperature distribution. The findings highlight the need to incorporate real climate conditions in bridge design and maintenance to ensure durability and reliability.

Keywords: road, thermal stress, concrete bridge, concrete superstructure, temperature field, temperature gradient, temperature difference, solar radiation, mathematical modeling, finite element method, stress-strain state, climatic conditions.