

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ, ЩО ПОТРАПЛЯЄ НА ПОВЕРХНЮ БУДІВЛІ АБО СПОРУДИ

Запропоновано методику для визначення кількості сонячної радіації, яка потрапляє на довільно орієнтовану поверхню конструкції в залежності від географічних координат будівлі, просторової орієнтації поверхні конструкції, дня року і часу доби. Методика призначена для визначення теплових напружень і деформацій у сталевих листових конструкціях.

Показано, що тепловий вплив сонячної радіації слід враховувати не тільки для теплої, але і для холодної пори року.

In paper is presented method for determination of amount of solar radiation, which falls on free-oriented surface of structure, depending on geographical coordinates of building, spatial orientation of structure surface, day of year and time of day. This method should be used for determination of thermal stresses and deformations in steel sheet structures.

Examples show that thermal action of solar radiation should be accounted not only for warm season but also for cold season.

Ключові слова: листові конструкції, сонячна радіація, кліматичні впливи.

У сучасному будівництві існує значна кількість будівель і споруд, де слід враховувати пряму сонячну радіацію. До них відносяться мости і надземні трубопроводи, баштові і щоглові споруди, димові труби, мембранні покриття громадських і промислових будівель, а також листові споруди: силоси, бункери, резервуари і об'єкти доменного виробництва. Від впливу прямого сонячного випромінювання виникає значна різниця температур між освітленою і затіненою частинами споруди. Освітлені частини конструкції від отриманої теплової енергії нагріваються і збільшуються в розмірах. Нерівномірне нагрівання призводить до викривлення осей стержнів, виникнення хлопунів, нерівномірних деформацій, а в статично невизначуваних системах – до значних внутрішніх напружень.

Нормативна база України дозволяє наближено визначати кількість сонячної радіації і перепад температур на освітленій і затіненій поверхнях. Ці дані можна отримати за ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» [1], а також за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [2]. В документі [1] наведено значення сумарної (прямої і розсіяної) сонячної радіації, яка потрапляє на горизонтальну і вертикальну поверхні, отримані за результатами метеорологічних спостережень. Ці значення не залежать від географічної широти і пори року, а орієнтація поверхні враховується понижувальним коефіцієнтом k .

Значення сонячної радіації, наведені в ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010, також отримані за результатами метеорологічних спостережень для широт України. За цим нормативом можна визначити значення сонячної радіації для будь-якого часу доби в липні або січні і для восьми основних напрямків орієнтації поверхні (Пн, Пн-Сх, Сх і т. д.).



О.І. Кордун

завідувач науково-дослідного відділу технічного розвитку ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»

Підхід російських будівельних норм [3] до визначення кількості сонячної радіації подібний до українських будівельних норм [1], але орієнтація поверхні враховується табличними значеннями для чотирьох основних напрямків (Пн, Сх, Пд, Зх). На відміну від українських та російських будівельних норм, у Єврокодах [4] приріст температури від кліматичних впливів не залежить від значень сонячної радіації. В цих нормах встановлені конкретні значення приросту температури, наприклад, для горизонтальної темної поверхні влітку приріст температури складає 42 °С.

Потрібно відзначити, що підхід розглянутих будівельних норм не надає можливості врахувати нагрівання похилих довільно орієнтованих поверхонь. Значення сонячної радіації, наведені в [1] і [2], визначені з врахуванням сезонного фактора мутності атмосфери і тому нижчі за максимально можливі.

Найбільш несприятливим для напружено-деформованого стану конструкції є випадок, коли на поверхню потрапляє максимально можлива кількість прямої сонячної радіації з урахуванням орієнтації поверхні у просторі. Такі випадки не передбачені нормативними документами, отже питання температурного кліматичного впливу потребує більш детального вивчення.

Втрата сонячної енергії в атмосфері. Перепад температур між освітленою і затіненою частинами будівлі чи споруди виникає від впливу сонячної радіації. Сонячна радіація – це енергетичний потік електромагнітних хвиль в інфрачервоному, світловому і ультрафіолетовому діапазонах. Сумарна інтенсивність потоку характеризується фундаментальною фізичною константою – сонячною сталою.

Сонячна стала – це сумарний потік сонячного електромагнітного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, орієнтовану перпендикулярно до потоку, на відстані 1 а. о. від центру Сонця. Інтенсивність сонячного випромінювання змінюється в залежності від відстані між Землею і Сонцем при русі Землі по орбіті та в залежності від активності Сонця. Проте сонячна стала вважається константою і прийнята такою, що дорівнює 1370 Вт/м^2 .

Перед попаданням на поверхню землі, сонячна радіація проходить крізь земну атмосферу, де вона частково поглинається і розсіюється, при цьому інтенсивність світла зменшується за експоненціальним законом

$$J = J_0 \exp(-kx), \quad (1)$$

де J_0 – початкова кількість сонячної енергії; J – кількість енергії, яка залишилась після проходження світла крізь товщу атмосфери x ; k – показник поглинання. Величина, обернена цьому показнику, чисельно дорівнює товщі атмосфери, яка послаблює енергію в 2,718 разів.

Цей закон був експериментально встановлений П. Бугером (P. Bouguer, 1729) і пізніше теоретично виведений Дж. Ламбертом (J.H. Lambert, 1760) [5].

Для визначення ступеня послаблення сонячної енергії потрібно знати довжину шляху x , який проходить світло в атмосфері (рис. 1). Промені сонця падають на перпендикулярний до них майданчик, який знаходиться на рівні поверхні землі. Промені спрямовані під кутом до вертикалі. Земля має радіус R і оточена шаром атмосфери завтовшки d .

Використовуючи теорему косинусів, отримуємо наступну залежність:

$$(R + d)^2 - x^2 = R^2 - 2xR \cos(\lambda). \quad (2)$$

Проте більш вживаним і зручним є безрозмірний параметр m

$$m = \frac{\sqrt{R^2 \cos^2 \lambda + 2Rd + d^2} - R \cos \lambda}{d}, \quad (3)$$

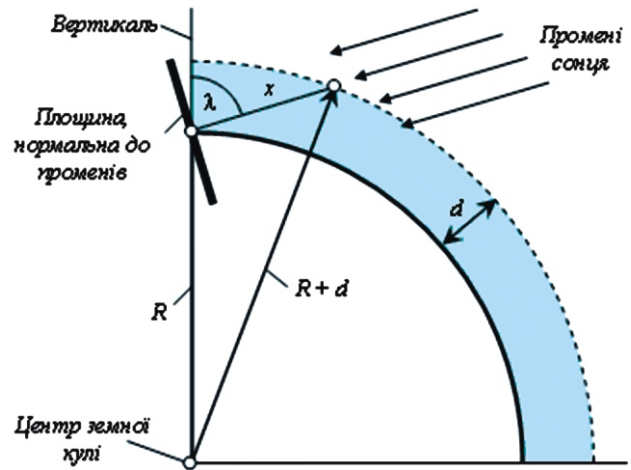


Рис. 1. До визначення довжини шляху x , який проходять промені Сонця в атмосфері

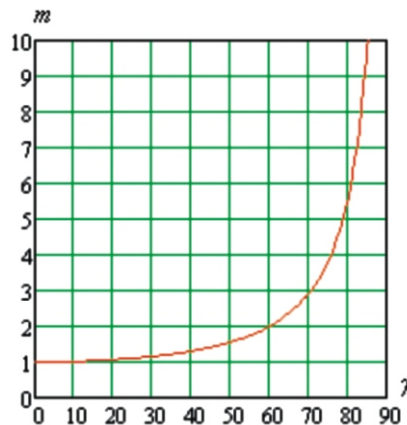


Рис. 2. Залежність маси атмосфери m від кута (3)

який визначає довжину шляху x , виміряну у товщинах d шару атмосфери. В метеорології і актинометрії цей параметр називають масою атмосфери [6].

Залежність m від λ визначається формулою (3), в графічному вигляді ця залежність показана на рис. 2. Тут прийнято що радіус землі $R = 6378,1 \text{ км}$, а товщина атмосфери $d = 10 \text{ км}$.

Потрібно відзначити, що на залежність m від λ мало впливає товщина атмосфери d , яка прийнята в розрахунку.

Кількість енергії, яка залишилась після проходження світла крізь товщину атмосфери, може бути виражена за допомогою формули (1). Проте в метеорології частіше користуються іншою формулою:

$$J = J_0 p^m, \quad (4)$$

де $J_0 = 1370 \text{ Вт/м}^2$ – сонячна стала; J – інтенсивність прямої сонячної радіації на рівні землі, Вт/м^2 ; m – маса атмосфери, що визначається за формулою (3); p – коефіцієнт прозорості атмосфери.

Формула (4) пов'язана з формулою (3). Коефіцієнт прозорості атмосфери p можна виразити через показник поглинання k із формули (3) і товщину шару атмосфери d наступним чином:

$$p = \exp(-kd). \quad (5)$$

Коефіцієнт прозорості атмосфери – це частка сонячної радіації, яка досягла Землі, для випадку, коли Сонце знаходиться в зеніті. Цей коефіцієнт визначається експериментально. Він не є константою, а залежить від довжини світлової хвилі і маси атмосфери m . З відомого спектра сонячного випромінювання можна отримати інтегральні значення коефіцієнта прозорості атмосфери, які охоплюють весь спектр. Інтегральні значення цього коефіцієнта для сухої і чистої атмосфери, визначені експериментально різними дослідниками, наведені в таблиці.

Інтегральний коефіцієнт прозорості для сухої і чистої атмосфери за даними роботи [6]

Маса атмосфери, m	За Фейснером і Дюбуа (1930 р.)	За Кастровим (1930 р.)	За даними Міжнародної комісії з радіації (1956 р.)
1	0,907	0,906	0,906
2	0,915	0,914	0,917
3	0,921	0,921	0,922
4	0,926	0,927	0,928
5	–	–	–
6	0,935	0,935	0,936

Для визначення впливу прямої сонячної радіації на будівлі та споруди потрібно розглянути випадок сухої і чистої атмосфери. Саме тоді буде досягнута максимальна температура освітленої поверхні.

Експериментальні дані різних дослідників добре кореспондуються між собою. Для подальших розрахунків вибираємо табличні дані Міжнародної комісії з радіації. Для зручності автоматизації розрахунків потрібно мати формулу. Табличні дані можна описати наступною апроксимуючою залежністю:

$$p(m) = \frac{4,616 - 0,972m}{5,166 - m}. \quad (6)$$

Коефіцієнти апроксимації, використані в формулі, отримані шляхом мінімізації суми квадратів відхилів кривої (6) від експериментальних значень, взятих із таблиці. Якість апроксимації можна оцінити за рис. 3.

Таким чином, інтенсивність прямої сонячної радіації, що потрапляє на Землю після про-

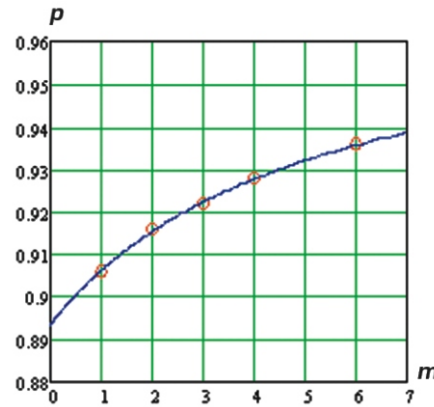


Рис. 3. Співставлення апроксимації (6) з експериментальними даними

ходження крізь атмосферу масою m , можна виразити формулою

$$J = 1370 \frac{4,616 - 0,972m}{5,166 - m} \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

в якій аргументом виступає маса атмосфери m . За формулою (3) можна перейти від аргументу m до аргументу α – кута падіння сонячних променів по відношенню до вертикалі (див. рис. 1). У графічному вигляді ці залежності показані на рис. 4.

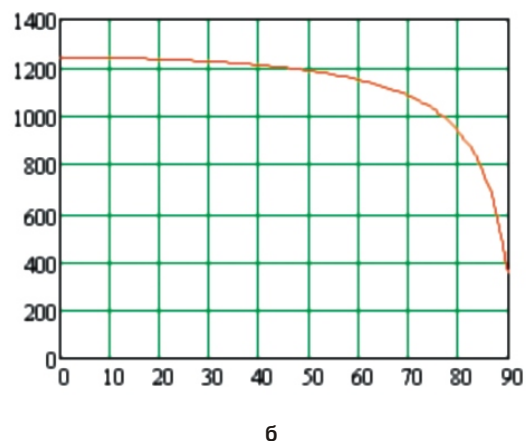
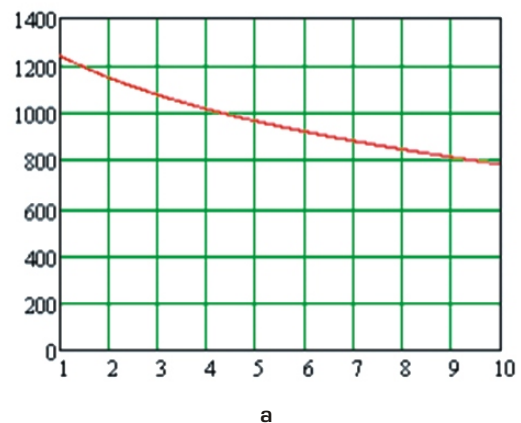


Рис. 4. Інтенсивність прямої сонячної радіації J , яка потрапляє на одиницю площі нормальної поверхні, Вт/м^2 , в залежності від маси атмосфери m (а) та кута α (б)

Наведені дані можна вважати верхньою межею інтенсивності сонячної радіації, яка досягла поверхні Землі. Ймовірність такої інтенсивності дуже невелика і реальне значення сонячної радіації буде нижчим.

Рівень радіації, яку потрібно враховувати при розрахунках, залежить від мети розрахунку. При цьому важливим чинником є час, протягом якого потрібно осереднювати дані. Якщо необхідно розрахувати обшивки або листові конструкції, час осереднення може становити десятки хвилин, якщо розглядаються масивні конструкції – час осереднення становить години. При розрахунках надійності конструкцій слід розглядати ймовірність перевищення температури протягом терміну служби конструкцій.

Залежність рівня сонячної радіації від часу осереднення або від ймовірності перевищення рівня температури конструкції визначається кліматичною зоною і місцем експлуатації конструкції. Значний вплив має інтенсивність хмарності, вологість і прозорість атмосфери, її загазованість, наявність смогу, пилу тощо.

Наведені вище дані інтенсивності сонячної радіації можна використовувати при розрахунку нагрівання конструкції в кліматичній зоні пустель. За умов помірного клімату рівень радіації може бути знижений на 10–20 %.

Визначення кількості сонячної радіації на довільно орієнтованій поверхні споруди в конкретний день і час. На поверхню конструкції потрапляє три види сонячної радіації:

пряма, розсіяна і відбита. Все наведене вище стосується прямої сонячної радіації. Розсіяна сонячна радіація надходить від атмосфери і хмар, а відбита – від земної поверхні і оточуючих предметів. Ці частини енергії менш детерміновані, ніж пряма і в достатній мірі описані в літературі [2, 7, 8].

Для вивчення нерівномірного нагрівання відкритих конструкцій важливою є пряма сонячна радіація, оскільки розсіяна і відбита частини сонячної радіації діють як на освітлену, так і на затінену поверхню. Далі розглядається тільки пряма сонячна радіація.

Для визначення кількості сонячної радіації, яка потрапляє на деяку поверхню конструкції, потрібно знати косинус кута нахилу сонячних променів до вертикалі $\cos \lambda$ і до нормалі до поверхні $\cos \theta$ (рис. 5).

Положення поверхні в просторі визначається двома кутами λ і β . Перший із них – азимут. Це кут між проекцією нормалі до поверхні на горизонтальну площину і напрямком на південь. Азимут відраховується від південного напрямку в напрямку заходу і приймає максимальне значення $\lambda = 180^\circ$ в напрямку на північ. У східній частині азимут має від'ємні значення і в напрямку на північ відповідає куту $\lambda = -180^\circ$. Другий кут β – кут нахилу поверхні до горизонту. Цей кут може змінюватися від 0 до 90° . На рисунку показані також θ – зенітний кут і α – кут нахилу сонячних променів до нормалі поверхні, що розглядається.

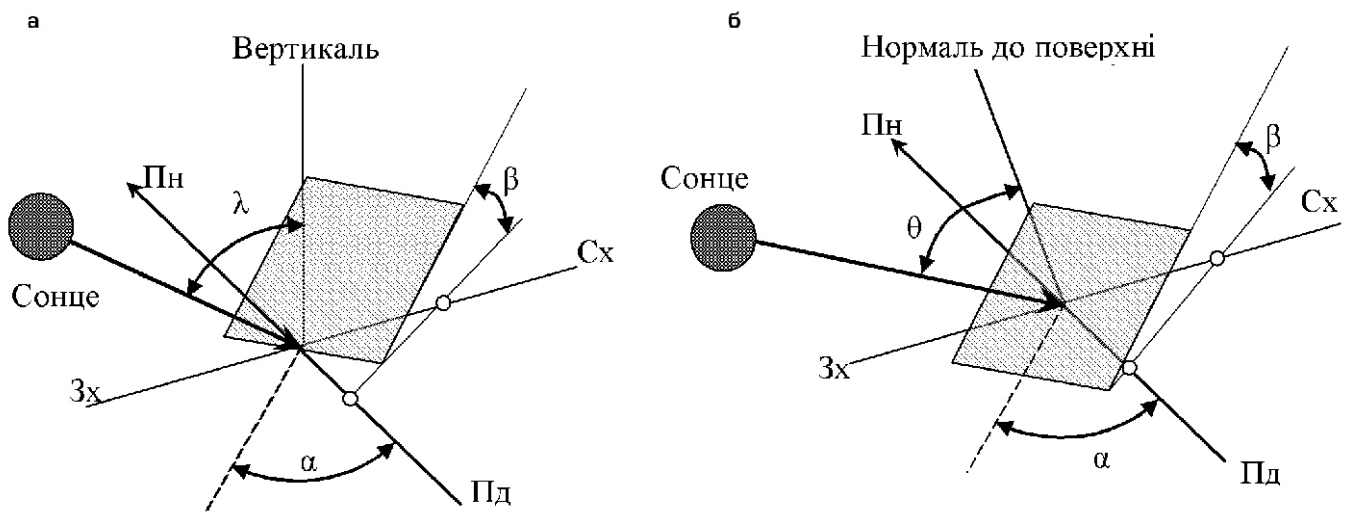


Рис. 5. Куты для визначення інтенсивності сонячної радіації:
а – зенітний кут λ ; б – кут падіння сонячних променів на довільну поверхню θ

Формула для визначення кількості сонячної радіації, яка потрапляє на освітлену Сонцем поверхню, має наступний вид:

$$J_0 = 1370 \frac{4,616 \cdot 0,972 m^m}{5,166 m} \cos \theta, \quad (8)$$

де θ – коефіцієнт умов освітлення. Для територій із помірним кліматом значення коефіцієнта знаходяться в межах 0,8–0,9.

Для визначення необхідних косинусів кутів θ і потрібно знати положення Сонця на небосхилі в потрібний час і орієнтацію поверхні на Землі. Положення Сонця на небосхилі в даний момент часу визначається трьома основними кутами: схиленням Сонця δ , часовим кутом ω і широтою місцевості ϕ (рис. 6). Кут схилення Сонця δ залежить від положення Землі на навколосонячній орбіті і змінюється протягом року від значення $23,45^\circ$ влітку до $-23,45^\circ$ взимку. Кут схилення стає рівним нулю два рази на рік у дні весняного і осіннього рівнодення.

Схилення Сонця для конкретно обраного дня визначається за формулою

$$23,45 \sin 360 \frac{284 n}{365}, \quad (9)$$

де n – порядковий номер дня року, 1-го січня $n = 1$.

Широта місцевості ϕ – те саме, що і географічна широта, яка змінюється від $\phi = -90^\circ$ на південному полюсі до $\phi = 90^\circ$ на північному полюсі і проходить через нуль на екваторі.

Часовий кут ω переводить місцевий сонячний час у число градусів, яке Сонце проходить по небу. За визначенням часовий кут дорівнює нулю опівдні. Земля повертається на 15° за одну годину. Зранку часовий кут від'ємний, ввечері – додатний.

Кут падіння сонячних променів по відношенню до вертикалі θ часто називають зенітним. Зенітний кут можна визначити для будь-якого дня року і часу доби, використовуючи його зв'язок з іншими основними кутами,

$$\cos \theta = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (10)$$

Косинус кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню площі пов'язаний з описаними вище кутами залежністю [7]

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta \cos \alpha + \sin \phi \cos \delta \cos \alpha \cos \omega + \cos \phi \sin \delta \sin \alpha + \cos \phi \cos \delta \sin \alpha \cos \omega \quad (11)$$

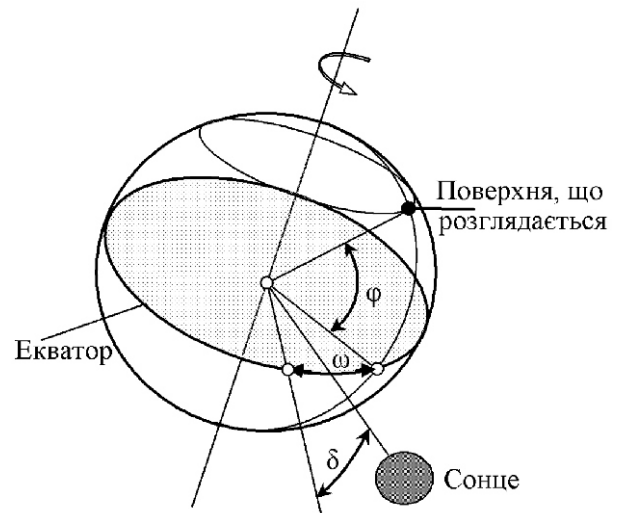


Рис. 6. Основні кути, що визначають положення Сонця на небосхилі

Для вертикальної поверхні кут $\alpha = 90^\circ$ і громіздка формула (11) матиме вид:

$$\cos \theta = \sin \phi \cos \delta \cos \omega + \cos \phi \sin \delta. \quad (12)$$

Для горизонтальної поверхні кут $\alpha = 0^\circ$ і формула визначення косинуса кута падіння сонячних променів спрощується до формули

$$\cos \theta = \cos \phi \sin \delta \sin \omega + \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (13)$$

у якій відмічено, що для розглянутого випадку кут θ дорівнює зенітному куту θ_z . Зенітний кут відраховується від вертикалі в напрямку Сонця і може мати значення в межах від 0° (сонячний південь на екваторі в дні рівнодення) до 90° (схід або захід Сонця).

Приклад застосування запропонованих залежностей. Як приклад можна розглянути надходження сонячної радіації 3-го січня ($n = 3$) в 12-00 (сонячний час $\omega = 0^\circ$), на вертикальну поверхню ($\alpha = 90^\circ$) у м. Київ ($\phi = 50,5^\circ$), орієнтовану на південний захід з азимутом $\alpha = 30^\circ$.

Для даного випадку

$$23,45 \sin 360 \frac{284 \cdot 3}{365} = 22^\circ 50'. \quad (14)$$

Відповідно до формули (13) косинус зенітного кута θ_z складає:

$$\cos \theta_z = \sin(22^\circ 50') \sin 50^\circ 30' + \cos(22^\circ 50') \cos 50^\circ 30' \cos 0^\circ = 0,2868. \quad (15)$$

Косинус кута падіння сонячних променів на поверхню, що розглядається, відповідно до формули (12) дорівнює

$$\cos \sin(22^\circ 50') \cos 50^\circ 30' \cos 30^\circ$$

$$\cos(22^\circ 50') \sin 50^\circ 30' \cos 30^\circ \cos 0^\circ \quad (16)$$

$$\cos(22^\circ 50') \sin 30^\circ \sin 0^\circ = 0,83,$$

що відповідає куту $3^\circ 54'$.

Значення маси атмосфери, яку пройдуть сонячні промені в Києві 3-го січня о 12-00, за формулою (3) складає:

$$m = \frac{\sqrt{6378,1^2 \cdot 0,2868^2 + 2 \cdot 6378,1 \cdot 10 \cdot 10^2}}{10} \quad (17)$$

$$\frac{6378,1 \cdot 0,2868}{10} = 3,457.$$

Кількість прямої сонячної радіації в сонячний безхмарний день, що потрапляє на одиницю площі поверхні споруди, розглянутої в прикладі, визначається за формулою (8)

$$J_C = 0,85 \cdot 1370 \cdot \frac{4,616 \cdot 0,972 \cdot 3,457^{3,457}}{5,166 \cdot 3,457} = 0,83$$

$$= 738,2 \text{ Вт/м}^2. \quad (18)$$

Розглянемо кількість сонячної радіації, яка потрапляє на ту ж споруду, але не 3-го січня, а влітку 3-го липня ($n = 184$) о 12-00:

$$23,45 \sin 360 \frac{284 \cdot 184}{365} = 22^\circ 58'. \quad (19)$$

Відповідно до формули (13) косинус зенітного кута у м. Києві 3-го липня о 12-00 становить:

$$\cos \sin 22^\circ 58' \sin 50^\circ 30'$$

$$\cos 22^\circ 58' \cos 50^\circ 30' \cos 0^\circ = 0,8867. \quad (20)$$

Косинус кута падіння сонячних променів на поверхню відповідно до формули (12) становить:

$$\cos \sin 22^\circ 58' \cos 50^\circ 30' \cos 30^\circ$$

$$\cos 22^\circ 58' \sin 50^\circ 30' \cos 30^\circ \cos 0^\circ \quad (21)$$

$$\cos 22^\circ 58' \sin 30^\circ \sin 0^\circ = 0,4003,$$

що відповідає куту $6^\circ 24'$.

Таким чином, косинус кута падіння соняч-

них променів в обраний час для м. Києва взимку вдвічі більший за косинус цього ж кута влітку.

Значення маси атмосфери, яку пройдуть сонячні промені в Києві 3-го липня о 12-00, за формулою (3) складає:

$$m = \frac{\sqrt{6378,1^2 \cdot 0,8867^2 + 2 \cdot 6378,1 \cdot 10 \cdot 10^2}}{10} \quad (22)$$

$$\frac{6378,1 \cdot 0,8867}{10} = 1,127.$$

Для цієї будівлі кількість прямої сонячної радіації в сонячний безхмарний день, що потрапляє на одиницю площі поверхні, складає:

$$J_W = 0,85 \cdot 1370 \cdot \frac{4,616 \cdot 0,972 \cdot 1,127^{1,127}}{5,166 \cdot 1,127} = 0,4003$$

$$= 417,84 \text{ Вт/м}^2. \quad (23)$$

Розглянутий приклад свідчить, що інтенсивність сонячної радіації у безхмарний сонячний день, що потрапляє на вертикальну поверхню, взимку вища ніж влітку. Такий висновок підтверджується табличними даними [2], в яких наведено експериментально отримані значення інтенсивності сонячної радіації в січні та липні.

Висновки. Наведена методика може бути використана при розрахунку сталевих листових конструкцій на температурні впливи від дії прямої сонячної радіації.

Потрібно зазначити, що в нормативній літературі України [1], Росії [3] і Європейського Союзу [4] для відкритих і неопалюваних будівель і споруд, не захищених від прямого сонячного проміння, приріст температури елемента від сонячної радіації в холодну пору року приймається таким, що дорівнює нулю. Такий підхід не враховує кількість сонячної радіації, що потрапляє на конструкції в холодну пору року, яка може бути навіть більшою ніж у теплу пору року. Очевидно, що тепловий вплив сонячної радіації слід враховувати не тільки для теплої, але і для холодної пори року.

[1] ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 76 с.

[2] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 124 с.

[3] СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: ОАО «ЦПП», 2011 – 80 с.

[4] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-5: General actions -Thermal actions. CEN. – 2003.

[5] Савельев И.В. Курс общей физики: Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 496 с.

[6] Кондратьев К.Я. Актинометрия. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство. 1965. – 692 с.

[7] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1982.

[8] S.-H. KIM, K.-I. CHO, J.-H. WON, A study on thermal behaviour of curved steel box girder bridges considering solar radiation / Archives of Civil and Mechanical Engineering 2009 // vol 9, no 3, p. 59-76.

Надійшла 13.05.2014 р.