

**В. П. Гальчак, В. М. Боярчук, С. В. Сиротюк,
С. В. Коробка, Т. О. Станицький**

СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ ТА ІНСОЛЯЦІЯ

Видавництво "Магнолія 2006"

Львів 2024

УДК 621.311.243

С - 72

Автори:

**В. П. Гальчак, В. М. Боярчук, С. В. Сиротюк, С. В. Коробка,
Т. О. Станицький**

Рецензенти:

О. А. Мікуліч, д. т. н., професор

(Луцький національний технічний університет);

С. П. Шаповал, д. т. н., доцент

(Національний університет Львівська політехніка);

С. В. Мягкота, д. т. н., професор

(Львівський національний університет природокористування)

Рекомендовано до друку

*вченою радою Львівського національного університету природокористування
(протокол № 10 від 21 червня 2023 р.)*

С-72 Сонячна енергія та інсоляція: монографія / В. П. Гальчак, В. М. Боярчук, С. В. Сиротюк, С. В. Коробка, Т. О. Станицький. Львів: Магнолія 2006, 2024. 242 с.

ISBN 978-617-574-305-8

Матеріали монографії стосуються природи і властивостей потоків променистої енергії Сонця, її просторових, часових та енергетичних характеристик на шляху до наземного приймача. Представлені сучасні підходи до кількісної оцінки механізмів взаємодії сонячних променів з компонентами земної атмосфери. Систематизовано методика оцінки ефективності сприймальної поверхні довільної орієнтації, зокрема при стеженні за Сонцем. Наведено методика оцінки режимів інсоляції поверхні приймача сонячної енергії протягом дня в рамках моделі Європейського атласу сонячної радіації (ESRA). Відпрацьовано оригінальну методика розрахунку потоків сонячної енергії з детальною ілюстрацією послідовності обчислень, редагування програм і типових результатів моделювання інсоляційних режимів у популярному середовищі Microsoft Excel.

Для студентів інженерних факультетів закладів вищої освіти 3 – 4-го рівнів акредитації, магістрів, аспірантів, наукових співробітників, інженерів, розробників та експлуатаційників обладнання відновлюваної енергетики.

ISBN 978-617-574-305-8

© В.П. Гальчак, В.М. Боярчук, С.В. Сиротюк,

С.В. Коробка, Т.О. Станицький, 2024

© ПП "Магнолія 2006", 2024

ЗМІСТ

| | Стор. |
|--|-------|
| Перелік позначень та скорочень | 6 |
| ВСТУП | 10 |
| РОЗДІЛ 1. СОНЯЧНІ ПРОМЕНІ ТА ЇХ ЕНЕРГІЯ | 12 |
| 1.1. Первинний потік сонячних променів | 12 |
| 1.2. Сонячні спектри і сонячна стала | 14 |
| 1.3. Планетарна інсоляція | 19 |
| 1.4. Відлік часу за Сонцем | 24 |
| 1.5. Системи небесних координат | 30 |
| 1.6. Співвідношення між горизонтальними та екваторіальними координатами Сонця | 36 |
| 1.7. Сонячні карти | 43 |
| РОЗДІЛ 2. ПОТОКИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ЯСНОГО НЕБА | 48 |
| 2.1. Сонячна радіація у земній атмосфері | 48 |
| 2.2. Вимірювання приземних потоків сонячної радіації | 53 |
| 2.3. Поточні, усереднені та інтегральні параметри сонячної радіації | 58 |
| 2.4. Фізична і оптична неоднорідність атмосфери | 63 |
| 2.5. Відносна і оптична маса атмосфери | 68 |
| 2.6. Модель стандартної атмосфери | 73 |
| 2.7. Фізичні механізми послаблення сонячних променів компонентами повітря | 80 |
| 2.8. Кількісна характеристика процесу взаємодії сонячних променів з атмосферою | 86 |
| 2.9. Оптична товщина реальної атмосфери і фактор мутності | 93 |
| 2.10. Енергетична експозиція прямого потоку за ясного неба | 100 |
| 2.11. Дифузний потік сонячної радіації за ясного неба | 104 |

| | |
|---|------------|
| РОЗДІЛ 3. ІНСОЛЯЦІЯ ПОВЕРХНІ ПРЯМИМИ ПРОМЕНЯМИ | 109 |
| 3.1. Орієнтаційні параметри освітленої поверхні | 109 |
| 3.2. Кут і тривалість освітлення поверхні південного нахилу | 112 |
| 3.3. Експозиційна ефективність поверхні південної орієнтації | 116 |
| 3.4. Просторово-часові параметри інсоляції поверхні довільної орієнтації | 119 |
| 3.5. Графоаналітичні методи оцінки інсоляційних величин | 123 |
| 3.6. Просторово-часові параметри поверхні стеження за Сонцем | 130 |
| 3.7. Інсоляція площини стеження при обертанні навколо горизонтальної осі | 132 |
| 3.8. Інсоляція площини стеження при обертанні навколо вертикальної осі | 139 |
| 3.9. Інсоляція площини стеження при обертанні навколо полярної осі | 142 |
| 3.10. Порівняння ефективності режимів стеження на широті 50° | 146 |
| 3.11. Підвищення освітленості сприймальної поверхні дзеркально відбитими променями | 149 |

| | |
|--|------------|
| РОЗДІЛ 4. ПАРАМЕТРИ ІНСОЛЯЦІЇ У РЕАЛЬНІЙ АТМОСФЕРІ | 158 |
| 4.1. Реальні потоки сонячної радіації | 158 |
| 4.2. Зміна фактору мутності протягом дня | 162 |
| 4.3. Емпіричні формули для розрахунку прямої радіації | 169 |
| 4.4. Інсоляція довільно орієнтованої поверхні всіма потоками | 174 |
| 4.5. Ефективність стеження з урахуванням непрямої сонячної радіації | 179 |

| | |
|--|-----|
| 4.6. Параметри інсоляції нахиленої поверхні за середньої хмарності | 182 |
| 4.7. Індекс ясності атмосфери | 187 |
| 4.8. Оцінювання радіаційних потоків за середньої хмарності | 191 |
| РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ІНСОЛЯЦІЇ ПОВЕРХНІ В СЕРЕДОВИЩІ MICROSOFT EXCEL | 198 |
| 5.1. Особливості моделювання таблично заданих інсоляційних величин | 198 |
| 5.2. Середньомісячні просторово-часові параметри сонячної радіації | 201 |
| 5.3. Розрахунок параметрів інсоляції горизонтальної поверхні | 203 |
| 5.4. Методика розрахунку денної експозиції поверхні довільного нахилу та орієнтації | 210 |
| 5.5. Розрахунок параметрів інсоляції нахиленої поверхні південної орієнтації | 212 |
| 5.6. Розрахунок параметрів інсоляції поверхні довільного нахилу та орієнтації | 218 |
| 5.7. Моделювання інсоляції поверхні стеження за Сонцем | 223 |
| ВИСНОВКИ | 234 |
| БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК | 236 |

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

| Символ | Тлумачення |
|--------------------------|---|
| | Латинський алфавіт |
| A_i | – індекс анізотропії – частки потоку від навколосонячного ореолу |
| A_{cx}, A_{zx} | – азимути точок сходу/заходу Сонця з відліком від полудня |
| D, d | – Діаметри: Сонця; земної кулі |
| D_λ | – функція зростання енергії випромінення з довжиною хвилі |
| E | – поправка рівняння часу |
| –//– | – енергетична освітленість |
| F_d | – множник функції просторового розподілу дифузного потоку |
| G_b | – густина (інтенсивність) наземного потоку прямої сонячної радіації |
| G_{bh}, G_{dh} | – прямий, дифузний, відбитий і сумарний потоки сонячної радіації до горизонтальної поверхні |
| G_{ph}, G_{th} | |
| $G_{b\beta}, G_{d\beta}$ | – прямий, дифузний, відбитий і сумарний потоки сонячної радіації до нахиленої поверхні |
| $G_{p\beta}, G_{t\beta}$ | |
| G_{sc} | – сонячна стала |
| G_{sn} | – густина (інтенсивність) потоку сонячної енергії на вході в атмосферу поточного дня року n |
| G_R | – густина (інтенсивність) вторинної хвилі розсіювання Релея |
| H | – висота; умовна висота атмосфери; товщина шару повітря |
| –//– | – енергетична експозиція |
| H_{bh}, H_{dh} | – денна експозиція горизонтальної поверхні потоками сонячної радіації |
| H_{ph}, H_{th} | |
| $H_{b\beta}, H_{d\beta}$ | – денна експозиція нахиленої поверхні потоками сонячної радіації |
| $H_{p\beta}, H_{t\beta}$ | |
| H_m | – сумарна денна експозиція поверхні, нормальної до прямого потоку |

| | |
|-----------------------|--|
| I | – годинна експозиція |
| L | – довжина траєкторії сонячного променя в атмосфері |
| M | – маса стовпа повітря одиничного перерізу |
| N | – кількість взаємодіючих частинок |
| R | – радіус земної орбіти |
| $-//-$ | – універсальна газова стала |
| R_{β} | – коефіцієнт перерахунку прямого потоку з горизонтальної поверхні на похилу |
| S | – площа; площа перерізу |
| T | – температура, Кельвіна |
| V | – об'єм області взаємодії |
| Z | – зеніт, нормаль горизонтальної поверхні |
| d | – діаметр частинки |
| g | – прискорення вільного падіння |
| h | – кутова висота Сонця над горизонтом: $h = 90^{\circ} - \theta_z$ |
| k | – коефіцієнт підсилення потоку сонячних променів |
| k_m, K_T | – годинний і денний коефіцієнти ясності атмосфери |
| m | – відносна оптична маса атмосфери |
| n | – порядковий номер дня у році |
| $-//-$ | – показник заломлення |
| $-//-$ | – нормаль поверхні |
| $-//-$ | – об'ємна концентрація взаємодіючих частинок |
| t | – температура, $^{\circ}\text{C}$ |
| $-//-$ | – поясний час |
| t_s | – місцевий сонячний час з відліком від нижньої кульмінації Сонця |
| T_{rd} | – передавальна функція від атмосферної (AM) маси до потоку сонячної радіації |
| T_L, T_{LK}, T_{LI} | – фактор мутності атмосфери Лінке і Лінке-Кастена, Лінке-Інейхена |
| $T_{LK}(AM2)$ | – значення фактору мутності при $AM = 2$ |
| b | – переріз взаємодії частинки з електромагнітною хвилею |
| p | – атмосферний тиск |

| | |
|--------|--|
| $-//-$ | – прозорість атмосфери |
| q | – питомий тепловий потік, Вт/м ² ·К |
| r | – кут заломлення скла |
| z | – висота над рівнем моря |

Грецький алфавіт

| | |
|------------------------|--|
| α | – коефіцієнт поглинання |
| $-//-$ | – кут розкриття дзеркального концентратора |
| β | – кут нахилу поверхні до площини горизонту |
| γ | – азимутальний кут поверхні |
| γ_s | – азимутальний кут Сонця – зміщення відносно місцевого меридіана |
| δ | – сонячне схилення |
| δ_R | – оптична товщина релєївської атмосфери |
| η | – ефективність (к.к.д.) процесу |
| θ | – кут падіння сонячних променів (кут освітлення поверхні) |
| θ_z | – зенітний кут |
| θ_s | – кутовий розмір видимого з Землі сонячного диска |
| θ_E | – кут розбіжності сонячних променів поблизу Землі |
| λ | – довжина електромагнітної хвилі |
| μ_V, μ_M | – відповідно об'ємний і масовий показники ослаблення |
| ρ | – густина повітря |
| $-//-$ | – коефіцієнт відбивання сонячних променів |
| σ | – коефіцієнт екстинкції |
| τ | – коефіцієнт пропускання |
| $-//-$ | – сонячний час з відліком від моменту полудня |
| τ_{cx}, τ_{zx} | – моменти природного сходу / заходу Сонця |
| φ | – географічна широта |
| $\varphi_{b\lambda}$ | – функція спектрального розподілу випромінювання |
| φ_b | – інтегральна густина (інтенсивність) випроміненого потоку |
| ψ, ψ_c | – географічна довгота середнього меридіана годинного поясу |

- ω – кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі
 ω_s, ω_t – годинний кут Сонця

Скорочення

- AM* – атмосферна маса
NASA – National Aeronautics and Space Administration
(НАСА) (Національне агентство з авіації і космонавтики, США)
WMO – World Meteorological Organization (Всесвітня
(ВМО) метеорологічна організація)
ESRA – European Solar Radiation Atlas (Європейський атлас сонячної радіації)
Ізотр. – ізотропний
Аніз. – анізотропний

ВСТУП

В інформаційному просторі вдосталь матеріалів, що відображають як загальні властивості потоків сонячної енергії, так і практичні аспекти її ефективного використання. Але пересічний розробник/користувач не завжди може ними скористатися через недостатню обізнаність у вузьких специфічних напрямках, залучених з багатьох суміжних наукових дисциплін. Частково заповнити цю прогалину допоможе видання із системним викладом просторово-часових та енергетичних особливостей потоків сонячної енергії на шляху від Сонця до наземного приймача.

Важливе для практиків питання – оцінка поточної потужності та денної продуктивності енергетичних установок. Її зазвичай оцінюють/прогнозують на підставі характеристик сонячної радіації, наведених в актинометричних базах даних. Відповідний довідник в Україні опублікований ще 1990 року і не відображає значних кліматичних змін останніх десятиліть. Сучасніші дані для України, наведені у зарубіжних виданнях обмеженого доступу, складені за результатами дистанційних вимірювань, не завжди підкріплені наземними спостереженнями. Але різниця переважно не перевищує випадкових погодозалежних відхилень, тому доцільніше орієнтуватися на закономірно змінні параметри всіх потоків сонячної енергії за умови ясного (безхмарного) неба. Вони розраховуються за відомими астрономічними співвідношеннями і фізичними моделями взаємодії сонячних променів з компонентами земної атмосфери та з урахуванням додаткових проміжних величин і понять. Для цілісного сприйняття специфічних термінів і положень усі матеріали тексту розподілені так, що їх послідовність органічно відповідає порядку розрахунку інсоляційних величин.

У першому розділі розглянуто основні астрономічні поняття і величини, якими характеризують фізичні та геометричні параметри потоку сонячної енергії як у міжпланетному просторі, так і на земній поверхні. Співвідношення для розрахунку переміщення Сонця небосхилом подано у двох системах небесних координат та залежно від справжнього сонячного часу з відліком від полудня. Методика обчислень ілюстрована прикладом розрахунку просторово-часових

параметрів сонячних променів з унаочненням результатів у табличному та графічному представленні.

Другий розділ присвячено особливостям земної атмосфери як оптично неоднорідного середовища з взаємозалежними актами взаємодії сонячних променів і компонентів повітря. Підкреслено фізичний зміст величин, за якими розраховують інтенсивність приземних потоків сонячної радіації в рамках моделі Європейського атласу сонячної радіації (ESRA).

У третьому розділі опрацьовано методику побудови практичних схем освітлення поверхні приймача сонячної енергії у двох системах сферичних координат з обґрунтуванням співвідношень для розрахунку кутів освітлення протягом дня. Розглянуто основні випадки орієнтації поверхні відносно Сонця, як стаціонарної, так і в режимі стеження. Складено таблиці режимів освітлення поверхні протягом дня з їх графічними ілюстраціями.

У четвертому розділі порівнюються особливості потоків сонячної енергії до поверхні приймача протягом дня, кількісно оцінених за даними актинометричних спостережень, емпіричними співвідношеннями або розрахованих за наближеними моделями *ESRA* з метою обґрунтування меж доцільності їх використання для розв'язування практичних задач.

У п'ятому розділі опрацьовано методику моделювання режимів інсоляції приймачів сонячної енергії всіх орієнтацій та протягом дня у популярному середовищі Microsoft Excel. Програми обчислень складені в логічній послідовності та відповідно до наведених у попередніх розділах формул. Формат таблиці Excel візуально відображає всі етапи моделювання, результати обчислень включно з графічними ілюстраціями змінних протягом дня величини.

У тексті використано методики й напрацювання суміжних дисциплін з детальним роз'ясненням їх нового фізичного змісту або посиланням на загальнодоступні першоджерела. Прикладні розрахунки адаптовані до умов України і доступні для сприйняття широким колом фахівців та осіб, зацікавлених у просуванні сонячних технологій.

Наукове видання

Гальчак Володимир Петрович,
Боярчук Віталій Мефодійович,
Сиротюк Сергій Валерійович,
Коробка Сергій Васильович,
Станицький Тарас Олегович

СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ ТА ІНСОЛЯЦІЯ

Монографія

Редактор: Д. Б. Дончак

Підп. до друку 18.08.2024 р.
Формат 60×84/16. Папір друк. №2. Гарнітура Times New Roman .
Умовн. друк. арк. 14,07. Наклад 300 прим.

Видавництво «Магнолія 2006»
м. Львів-53, 79053, Україна, вул. В. Великого, 51/50,
тел. +38 (050) 370-19-57
e-mail: magnol06@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції: серія ДК № 2534 від 21.06.2006 року,
видане Державним комітетом інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавця Марченко Т. В.