

В. В. ВИСОЧИН, В. Р. НІКУЛЬШИН, А. Є. ДЕНИСОВА, В. О. БУДАРІН**ОСОБЛИВОСТІ ОПРОМІНЕННЯ ДВОСТОРОННІХ ФОТОПАНЕЛЕЙ**

Розроблено метод розрахунку опромінення двосторонніх сонячних фотопанелей. Зокрема, метод дозволяє зробити оцінку опромінення поверхні, що розташовані на тильній стороні панелі, при різній просторовій орієнтації. Система рівнянь, що описують опромінення, включає співвідношення для визначення сонячної радіації на території України для горизонтальної поверхні й коефіцієнти перерахунку опромінення з горизонтальної на похилу поверхню з урахуванням особливостей їхньої просторової орієнтації при прямому опроміненні й опроміненні відбитим розсіяним світлом. Проведено аналітичні дослідження інтенсивності опромінення сонячних панелей для умов, які відрізняються азимутальною спрямованістю й кутом нахилу. Показані особливості опромінення передньої й тильної сторін сонячних панелей. Розглянуті можливості формування раціональних умов просторової орієнтації панелей за фактором двостороннього опромінення. У якості характерних розрахункових розглянуті напрямки панелі по осях "південь-північ" і "схід-захід". Кути нахилу, прийняті для аналізу (90 і 45°), дозволяють зробити оцінку опромінення панелі в найбільш використовуваному діапазоні реальних умов експлуатації. Зі зменшенням кута нахилу, починаючи від рівня 90°, сумарне опромінення панелі зростає. Однак вертикальне розташування (90°) може диктуватися умовами її застосування, наприклад, для огорожі або облицювання фасаду. Показано особливості опромінення передньої й задньої частин сонячних панелей і запропоновані раціональні умови просторової орієнтації панелей. Найбільший ефект від двостороннього опромінення сонячної панелі може бути отриманий при орієнтації "схід-захід". Разом з тим для всіх орієнтацій застосування двосторонньої фотопанелі є позитивним. Найбільший вплив на опромінення панелі кут нахилу має при орієнтації "південь-північ", при орієнтації "схід-захід" залежність від величини кута практично не істотна. Використання запропонованої методики й результатів аналізу, проведених на її основі, дозволяє вибрати раціональну архітектуру сонячної електростанції.

Ключові слова: двосторонні сонячні фотопанелі, опромінення панелей.

Вступ. Останнім часом з'являються двосторонні сонячні модулі для генерації електричного струму [1, с. 342; 2, с. 362]. Двосторонні сонячні елементи виготовляються з фотоелементів, які поглинають сонячне випромінювання як з лицьового, так і з тильної сторони. При цьому потужність тильної сторони може досягати 70% щодо лицьової. У певних випадках такі панелі дозволяють отримати надбавку до вироблення електроенергії від 10 до 50 відсотків в порівнянні традиційними односторонніми сонячними батареями. Вважається, що завдяки новому двосторонньому сонячному модулю виробництво електроенергії в найближчому майбутньому може стати більш ефективним.

Аналіз стану питання. Слід зазначити, що впливу орієнтації щодо сонячного випромінювання приділяється достатня увага не тільки в фотовольтажних установках [3, с. 259; 4, с. 27; 5, с. 345], але і в іншому устаткуванні, що використовує сонячне випромінювання. Наприклад, [6, с. 282; 7, с. 753; 8, с. 110] в сонячних колекторах, [9, с. 417; 10, с. 172] системах охолодження, [11, с. 136] сонячних ставках тощо. Додаткову енергію фотоелектричної системи, яку можна отримати при використанні двосторонніх модулів залежить від кількості випромінювання, що потрапляє на тильну сторону батареї. Використання двосторонніх модулів вигідно там, де тильна сторона теж доступна для сонячного світла, або безпосередньо, або за допомогою розсіяного відображення. Області застосування: паркани, бар'єри та інші вертикальні конструкції. Основною перевагою вертикальних двосторонніх панелей є можливість опромінення прямої радіацією обох сторін панелей, проте в різний час дня.

Найважливішим фактором впровадження таких конструкцій є можливість досягнення високої опромінення як однієї, так і іншої сторони. Для односторонніх панелей вигідною орієнтацією є південна з кутом нахилу, величина якого досить добре обгрунтована.

У разі двосторонніх панелей думки дослідників щодо оптимальної орієнтації розходяться: одні рекомендують установку панелі по осі «північ-південь» [12, с. 48], інші – по осі «схід-захід» [13, с. 141]. Причому на вибір орієнтації впливають одночасно не тільки опромінення, але і ряд інших чинників.

Ситуація, що склалася вимагає проведення спеціальних досліджень для обгрунтування способу установки двосторонніх панелей.

При дослідженні режимів роботи сонячних перетворювачів використовують емпіричні дані і дані аналітичних модельних досліджень [14, с. 47; 15, с. 338]. Аналітичні моделі, як найбільш привабливі для досліджень, розрізняються способом і детальністю математичного опису процесів, які протікають в сполучених і суттєво змінних умовах. Отримання необхідної інформації безпосередньо залежить від повноти та адекватності опису.

Розробку необхідного математичного опису стримує та обставина, що не опрацьований спосіб оцінки опромінення поверхонь, що знаходяться в затіненій стороні панелі.

Мета. Розробка інтегрованої математичної моделі для визначення раціональних режимів роботи двостороннього сонячного колектора в різних умовах експлуатації.

© Височин В.В., Нікульшин В.Р., Денисова А.Є., Бударін В.О., 2021

Метод дослідження. Орієнтація по осі «північ-південь» (S-N) реалізується, коли нормаль до передньої (аверсного) поверхні сонячної панелі (СП) спрямована на південь з азимутом 0 градусів. Орієнтація «схід-захід» (E-W) передбачає направлення нормалі аверсного поверхні на схід.

Для аналітичного опису опромінення поверхні можна застосувати метод, запропонований в [16, с. 126,] для умов України. Середньодобова сонячна радіація на горизонтальну поверхню, що включає пряму і дифузну складові, визначається наступним виразом

Системи теплолокалізації захищають відкриті отвори будівель штучно сформованим повітряним струменем, який спрямовують поперек проникаючого крізь двері і ворота зовнішнього холодного потоку повітря.

$$H_{h.day} = A + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi(n-180)}{365} \right],$$

де $A = 37,71 - 0,5289\varphi$; $B = 20,0 - 0,2013\varphi$,
 φ – географічна широта місцевості, град;
 n – порядковий номер дня року.

Для ясного дня можна отримати миттєву щільність потоку радіації на горизонтальну поверхню, приймаючи синусоїдальний закон зміни функції протягом світлового дня [16, с. 126]

$$H_h = \frac{520 \cdot H_{h.day}}{N} \sin \left(\frac{\pi \cdot (t - 12,27 + 0,52N)}{N} \right),$$

де N – тривалість світлового дня; t – заданий час.

Відношення потоку прямої сонячної радіації, яка надходить по нормалі на похилу поверхню, до потоку радіації, яка надходить на горизонтальну поверхню, [17, с. 224]

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H_h} \right) R_b + \frac{H_d}{H_h} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \rho,$$

де H_d – прихід дифузійної радіації; R_b – відношення приходів прямої сонячної радіації на похилу й горизонтальну поверхні; ρ – відбивна здатність землі.

Ця залежність може бути застосована для поверхні, що знаходиться на південній стороні. Вона враховує пряму сонячну радіацію (перший член), розсіяну в атмосфері (другий член, який показує, яка частина небосхилу видно з поверхні) і відбиту від поверхні землі (третій член, який показує частку відбитої сумарної радіації).

Дифузну складову H_d можна визначити за методикою викладеною в [18, с. 53].

Ставлення надходження прямої сонячної радіації на нахилу і горизонтальну поверхні [17]

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)},$$

де θ – кут падіння прямого сонячного випромінювання; θ_z – зенітний кут падіння променя на майданчик.

Для тильної сторони приймача, орієнтованого по осі «північ-південь» пряма складова відсутня. Сектор небосхилу дифузного випромінювання, який бачимо з поверхні, відповідає ракурсу

$$1 - \frac{1 + \cos \beta}{2} = \frac{1 - \cos \beta}{2}.$$

Відповідно, для тильної сторони ракурс сприйняття відбитого від землі дифузного випромінювання визначається так

$$1 - \frac{1 - \cos \beta}{2} = \frac{1 + \cos \beta}{2}.$$

Складова відбитого випромінювання для зворотного боку не включає пряме випромінювання.

Таким чином, для тильної сторони відношення потоків радіації визначиться у вигляді

$$R_r = \frac{H_d}{H_h} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} + \frac{1 + \cos \beta}{2} \rho \right).$$

Для поверхонь, орієнтованих по осі «схід-захід» метод розрахунку той же, однак для орієнтації «на схід» кут азимута = + 90; «На захід» = -90. Пряма складова для заднього боку з'являється після полуденного часу при зенітному куті $\theta_z \geq 90 - \beta$.

Результати досліджень. Дані аналізу інтенсивності потоку випромінювання на аверсну і реверсну поверхні фотопанелі при орієнтації "S-N" в літній період (7 місяць) показані на рис. 1.

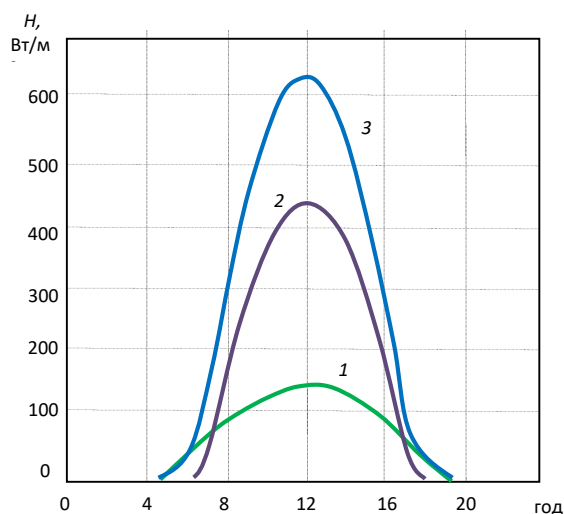


Рис. 1. Густина потоку випромінювання, падаючого на СП при орієнтації «S-N», орієнтація сторін: 1 – північна; 2 – південна; 3 – сумарна

Кут нахилу поверхні 90 град. Коефіцієнт відображення землі прийнятий рівним 0,2 [17]. При такій орієнтації пряма складова сонячного випромінювання потрапляє тільки на аверсну поверхню. Тому зворотна сторона, як впливає з отриманих даних, отримує приблизно третю частину від потоку на передній панелі. Однак сумарна радіація в порівнянні з односторонньою опромінення в цілому значна.

Показанні закономірності відрізняються практично симетричним характером з максимумом в полудень (12 годин).

При орієнтації аверсного боку строго на схід (рис. 2) опромінення різко зростає на початку дня – з 4 до 5 годин, а потім з меншим темпом знижується. Картина зміни опромінення для східної і західної сторін дзеркальна щодо полуденного часу.

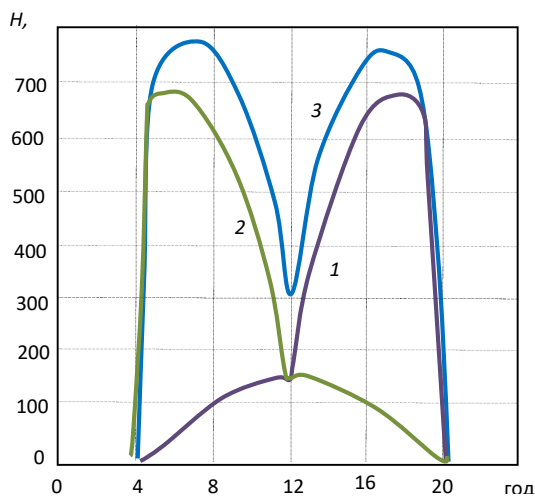


Рис. 2. Густина потоку випромінювання, падаючого на СП при орієнтації «E-W»; нахил 90°, орієнтація сторін: 1 – західна; 2 – східна; 3 - сумарне опромінення

У першій половині дня превалує інтенсивність випромінювання на аверсній панелі, в другій – на реверсній. Пряме випромінювання потрапляє на обидві сторони.

Сумарне опромінення, на відміну від того, що падає на кожену сторону, виявляється більшою мірою згладженим, хоча і зі спадом в полуденний час.

При порівнянні з орієнтацією «S-N» максимальне значення опромінення в цьому варіанті для літнього періоду менше, ніж при орієнтації «E-W». Додаткові дані, представлені на рис. 3 і рис. 4 (нахил 45 градусів), дозволяють говорити про вплив кута нахилу.

При орієнтації "S-N" (рис. 3) закономірності зміни опромінення схожі для кутів нахилу 90 і 45 градусів, однак максимальне значення функції в останньому випадку більше, при тому, що інтенсивність опромінення задньої панелі менше.

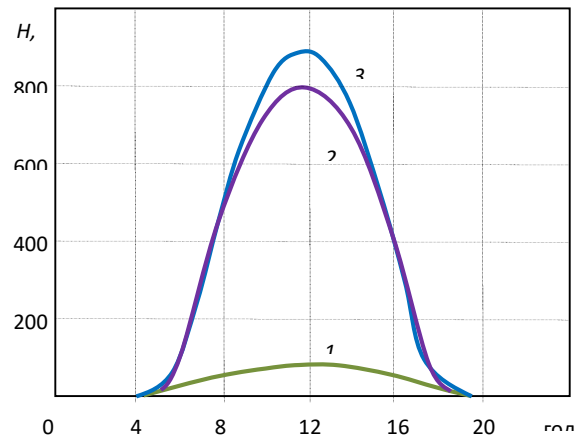


Рис. 3. Густина потоку випромінювання, падаючого на СП при орієнтації «S-N», спрямованість сторін: 1 – північна; 2 – південна; 3 - сумарна

Для орієнтації «E-W» (рис. 4) при досить великій схожості закономірностей опромінення з вертикальною панеллю проявляється характерна особливість. У післяполудневі години зворотна сторона нахиленої панелі деякий час «не бачить» пряме сонце, тому загальне опромінення її в цей період менше. Опромінення зростає, коли зенітний кут досягає значення $\theta_z = 90 - \beta$.

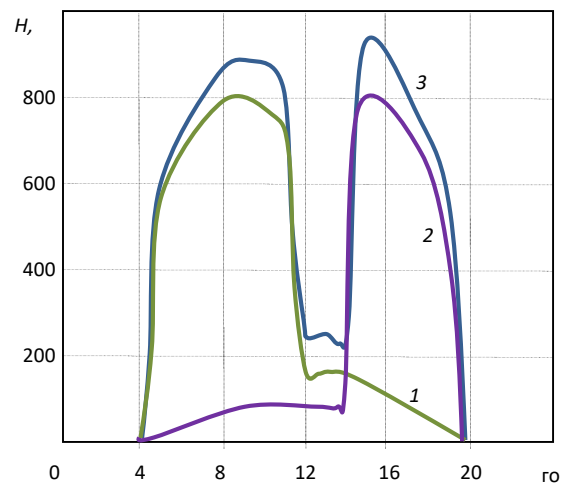


Рис. 4. Густина потоку випромінювання, падаючого на СП при орієнтації «E-W», спрямованість сторін: 1 – східна; 2 – західна; 3 – сумарна

Для вертикальної панелі такий перехід відбувається практично непомітно. При зіставленні інтегральних даних за денною опромінення в розгортці року (рис. 5) видно, що орієнтація «E-W» незалежно від кута нахилу протягом більшості місяців року (з 3 по 10) виявляється більш привабливою, ніж «S-N».

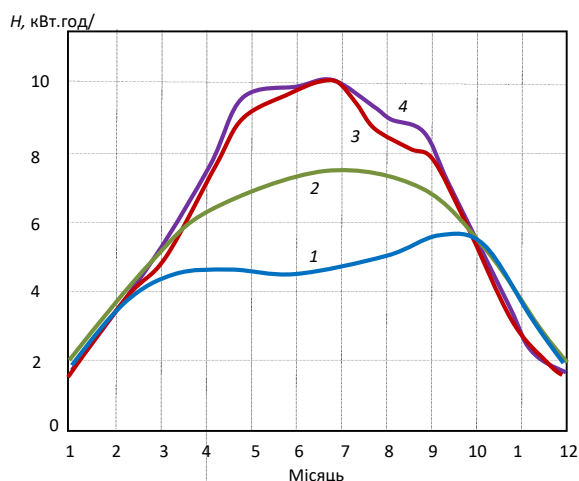


Рис. 5. Вплив орієнтації і кута нахилу СП на денну кількість сонячного опромінення в розгортці року:

1 – «S-N» 90°; 2 – «S-N», 45°; 3 – «E-W», 90°; 4 – «E-W», 45°

Разом з тим треба відзначити, що в періоди, які охоплюють з 1 по 3 місяць і з 10 по 12, рівні опромінення панелі стають близькі для всіх орієнтацій і кутів нахилу.

Сумарна річна кількість сонячного опромінення, що падає на панель з орієнтацією «E-W» при куті нахилу 45°, становить 2264 Вт·год/(м²·рік), а з орієнтацією «S-N» – 1975 Вт·год/(м²·рік).

Список використаних джерел

1. Двухсторонние солнечные батареи на 30% увеличат КПД / ЭкоТехника <http://ecotechnica.com.ua/energy/solntse>, 2017.
2. Двухсторонние солнечные батареи LONGi Solar серии Hi-MO2 на 72 элемента достигают 360–365 Вт/ SUNNIK. <https://www.pv-tech.org/products/longi-solar-hi-mo2-bifacial-mono-perc-module-reaches-360-365w-in-72-cell-co>, 2017.
3. Yunus Emre Yuksel. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application. /Yunus Emre Yuksel, Murat Ozturk. // Int. J. of Exergy 2017 – Vol. 22, N.3 PP. 250–278.
4. Mingjiang Ni. Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle combined with fuel reforming for solar thermal power generation. / Mingjiang Ni, Tianfeng Yang, Gang Xiao, Dong Ni, Kefa Cen. // Energy, Vol. 137, 2017, PP. 20–30.
5. Dianhong Li. Exergy and energy analysis of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems. / Dianhong Li, Yimin Xuan, Qiang Li, Hui Hong. // Energy, Vol. 126, 2017, PP. 343–351.
6. Arsham Mortazavi. Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors. /Arsham Mortazavi, Mehran Ameri // Energy, Vol. 142, 2018, PP. 277–288.
7. R. Loni. Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids. / R. Loni, E. Askari Asli-ardeh, B. Ghobadian, A.B. Kasaeian, Sh. Gorjian. // Energy, Vol. 133, 2017, PP. 749–760.
8. Reyhaneh Loni. Exergy analysis of a solar organic Rankine cycle with square prismatic cavity receiver. /Reyhaneh Loni, Alibakhsh Kasaeian, Omid Mahian, Ahmet Z. Sahin, Somchai Wongwises. // Int. J. of Exergy 2017 – Vol. 22, N.2 PP. 103–124.
9. Rabah Touaibi. Parametric study and exergy analysis of solar water-lithium bromide absorption cooling system. / Rabah Touaibi, Michel Feidt, Elena Eugenia Vasilescu, Miloud Tahar Abbes. // Int. J. of Exergy, 2013, – Vol. 13, N.3 PP. 409–429.
10. H.Z. Hassan. Thermodynamic analysis and theoretical study of a continuous operation solar-powered adsorption refrigeration system. / H.Z. Hassan, A.A. Mohamad. // Energy, Vol. 61, 2013, PP. 167–178.
11. K.R. Ranjan. Energy and exergy analyses of solar ponds in the Indian climatic conditions. /K.R. Ranjan, S.C. Kaushik, N.L. Panwar. // Int. J. of Exergy, 2014, – Vol. 15, №.2, pp. 121–151.
12. Двухсторонние солнечные батареи: технология и преимущества. / <https://tridentenergy.ua>, 2019.
13. ЕлектроВести – Двухсторонние солнечные панели: <https://elektrovesti.net>, 2017.
14. Харченко В.В., Никитин Б.А., Беленов А.Т., Тихонов П.В. Повышение эффективности энергетических установок на базе тепловых фотоэлектрических модулей. *Наук. вісник НУБП України*. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194. Ч. 3. с. 45-51.
15. Сабирзянов, Т.Г., Кубкин М.В., Солдатенко В.П. Математическая модель фотобатареи как источника электрической энергии. *Техніка в сільськогосподарському виробництві*. 2012. Вип.25. Ч.1. С. 331–335.
16. Высочин, В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла *Пр.Одес.політехн.ун—ту*. 2011. Вип. 2(36). С.125–129.
17. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А.Даффи, У.А.Бекман. – М.: Мир, 1977, 420 с.

Для тих же орієнтацій, але при куті нахилу 90° отримано відповідно наступні характеристики: 2175 Вт·год/(м²·рік) (менше на 4%) і 1566 Вт·год/(м²·рік) (менше на 26%).

З отриманих даних видно, що для орієнтації «E-W» залежність від кута нахилу невелика і його вибір може диктуватися іншими умовами, ніж опромінення.

При орієнтації «S-N» опромінення вже є визначальною.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у цьому напрямку. В результаті аналізу узагальнених результатів експериментальних досліджень можна визначити наступні характеристики системи.

1. Найбільший ефект від опромінення двосторонньої сонячної панелі може бути отриманий при орієнтації «E-W».

2. Для всіх орієнтацій застосування двосторонньої фотопанелі є позитивним.

3. Зі зменшенням кута нахилу, починаючи від рівня 90°, сумарне опромінення панелі зростає. Однак вертикальне розташування (90°) може диктуватися умовами її застосування, наприклад для огорожі або облицювання фасаду.

4. Найбільший вплив на опромінення панелі кут нахилу має при орієнтації "S-N", при орієнтації «E-W» залежність від величини кута практично не суттєва.

18. Бекман У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман, С.Клейн, Дж.Даффи / М.:Энергиздат, 1982, 80 с.
19. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., ДЕНИСОВА А.С. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи): Підр. К.: ЦНЛ, 2016. – 470 с.

References (transliterated)

1. Dvuhstoronnie solnechnye batarei na 30% uvelichat KPD / JekoTehnika [Double-sided solar panels will increase efficiency by 30%] <http://ecotechnica.com.ua/energy/solntse>, 2017.
2. Dvuhstoronnie solnechnye batarei LONGi Solar serii Hi-MO2 na 72 jelementa dostigajut 360 - 365 Vt/ SUNNIK [Double-sided solar panels LONGi Solar Hi-MO2 series for 72 cells reach 360–365 W] <https://www.pv-tech.org/products/longi-solar-hi-mo2-bifacial-mono-perc-module-reaches-360-365w-in-72-cell-co>, 2017.
3. Yunus Emre Yuksel. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application. /Yunus Emre Yuksel, Murat Ozturk. // Int. J. of Exergy 2017 – Vol. 22, N.3 PP. 250–278.
4. Mingjiang Ni. Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle combined with fuel reforming for solar thermal power generation. / Mingjiang Ni, Tianfeng Yang, Gang Xiao, Dong Ni, Kefa Cen. // Energy, Vol. 137, 2017, PP. 20–30.
5. Dianhong Li. Exergy and energy analysis of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems. / Dianhong Li, Yimin Xuan, Qiang Li, Hui Hong. // Energy, Vol. 126, 2017, PP. 343–351.
6. Arsham Mortazavi. Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors. /Arsham Mortazavi, Mehran Ameri // Energy, Vol. 142, 2018, PP. 277–288.
7. R. Loni. Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids. / R. Loni, E. Askari Asli-ardeh, B. Ghobadian, A.B. Kasaeian, Sh. Gorjian. // Energy, Vol. 133, 2017, PP. 749–760.
8. Reyhaneh Loni. Exergy analysis of a solar organic Rankine cycle with square prismatic cavity receiver / Reyhaneh Loni, Alibakhsh Kasaeian, Omid Mahian, Ahmet Z. Sahin, Somchai Wongwises // Int. J. of Exergy 2017. Vol. 22, No. 2, pp. 103–124.
9. Rabah Touaibi. Parametric study and exergy analysis of solar water-lithium bromide absorption cooling system. / Rabah Touaibi, Michel Feidt, Elena Eugenia Vasilescu, Miloud Tahar Abbes. // Int. J. of Exergy, 2013, – Vol. 13, N.3 PP. 409–429.
10. H.Z. Hassan. Thermodynamic analysis and theoretical study of a continuous operation solar-powered adsorption refrigeration system. / H.Z. Hassan, A.A. Mohamad. // Energy, Vol. 61, 2013, PP. 167–178.
11. K.R. Ranjan. Energy and exergy analyses of solar ponds in the Indian climatic conditions /K.R. Ranjan, S.C. Kaushik, N.L. Panwar. // Int. J. of Exergy, 2014, – Vol. 15, N.2. PP. 121–151.
12. Dvuhstoronnie solnechnye batarei: tehnologija i preimushhestva [Double-sided solar panels: technology and advantages] <https://tridentenergy.ua>, 2019.
13. JelektroVesti – Dvuhstoronnie solnechnye paneli [Double-sided solar panels] <https://elektrovesti.net>, 2017.
14. Harchenko V.V., Nikitin B.A., Belenov A.T., Tihonov P.V. Povyshenie jeffektivnosti jenergeticheskikh ustanovok na baze teplovyh fotoelektricheskikh modulej. . [Improving the efficiency of power plants based on thermal photovoltaic modules.] Nauk. visnyk NUBIP Ukrainy. Serija: Tehnika ta energetyka APK. 2014. № 194. Vol.3. PP. 45-51.
15. Sabirzjanov, T.G., Kubkin M.V., Soldatenko V.P. Matematicheskaja model' fotobatarei kak istochnika jelektricheskoi jenerгии. [Mathematical model of a photo battery as a source of electrical energy]. *Tehnika v sil'skogospodars'komu vyrobnyctvi*. 2012. Vol.25. Ch.1. PP. 331–335.
16. Vysochin, V.V. Matematicheskaja model' geliosistemi s sezonnym akkumuljatorom tepla. [Mathematical model of a solar system with a seasonal heat accumulator]. Pr. Odes.politehn. un–tu. 2011. Vol. 2(36), pp.125 – 129.
17. Daffi Dzh.A. Teplovyje processy s ispol'zovaniem solnechnoj jenerгии [Thermal processes using solar energy]. / Dzh.A.Daffi, U.A.Bekman. – М.: Mir, 1977, 420 p.
18. Bekman U. Raschet sistem solnechnogo teplosnabzhenija. [Calculation of solar heat supply systems]. / U. Bekman, S. Klejn, Dzh. Daffi / М.:Jenergizdat, 1982, 80 p.
19. Tovazhnjanskij L.L., Bukhhalo S.I., Denisova A.C. ta in. Zagal'na tehnologija harchovoї promislovosti u prikladah i zadachah (innovacijni zahodi): Pidr. – К.: CNL, 2016. – 470 p.

Надійшла (received) 19.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Высочин Виктор Васильевич (Высочин Виктор Васильевич, Wysochin Viktor Vasylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна;

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2279-203X>;

e-mail: vvwin.od@gmail.com

Нікульшин Володимир Русланович (Нікульшин Владимир Русланович, Nikulshin Volodymyr Ruslanovych) – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики; м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5946-8562>;

e-mail: vnikul@paco.net

Денисова Алла Євсїєвна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiiivna) – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, директор Українсько-польського інституту; м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3906-3960>;

e-mail: alladenysova@gmail.com

Бударин Віталій Олександрович (Бударин Виталий Александрович, Budarin Vitalii Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, м. Одеса, Україна;

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-4841-2189>;

e-mail: vit.bsci@gmail.com

В. В. ВЫСОЧИН, В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, В. А. БУДАРИН

ОСОБЕННОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ ДВУХСТОРОННИХ ФОТОПАНЕЛЕЙ

Разработан метод расчета облучаемости двухсторонних солнечных фотопанелей. В частности, метод позволяет произвести оценку облучаемости находящихся на тыльной стороне панели поверхности при различной пространственной ориентации. Система уравнений, описывающих облучаемость, включает соотношения для определения солнечной радиации на территории Украины для горизонтальной поверхности и коэффициенты пересчета облучаемости с горизонтальной на наклонную поверхность с учетом особенностей их пространственной ориентации при прямом облучении и облучении отраженным рассеянным светом. Проведены аналитические исследования интенсивности облучения солнечных панелей для условий, которые отличаются азимутальной направленностью и углом наклона. Показаны особенности облучения передней и тыльной сторон солнечных панелей. Рассмотрены возможности формирования рациональных условий пространственной ориентации панелей по фактору двухсторонней облучаемости. В качестве характерных расчетных рассмотрены направления панели по осям «юг-север» и «восток-запад». Углы наклона, принятые для анализа (90 и 45 градусов), позволяют произвести оценку облучаемости панели в наиболее используемом диапазоне реальных условий эксплуатации. С уменьшением угла наклона, начиная от уровня 90°, суммарное облучение панели растет. Однако вертикальное положение (90°) может диктоваться условиями ее применения, например, для ограждения или облицовки фасада. Показаны особенности облучения передней и задней частей солнечных панелей и предложены рациональные условия пространственной ориентации панелей. Наибольший эффект от двухсторонней облученности солнечной панели может быть получен при ориентации «восток-запад». Вместе с тем для всех ориентаций применение двухсторонней фотопанели является положительным. Наибольшее влияние на облученность панели угол наклона оказывает при ориентации «юг-север», при ориентации «восток-запад» зависимость от величины угла практически не существенна. Использование предложенной методики и результатов анализа, проведенных на ее основе, позволяет выбрать рациональную архитектуру солнечной электростанции.

Ключевые слова: двухсторонние солнечные фотопанели, облучаемость панелей.

V. V. WYSOCHIN, V. R. NIKULSHIN, A. E. DENYSOVA, V. O. BUDARIN

FEATURES OF PHOTO PANELS BILATERAL IRRADIATION

A method for calculating the irradiance of double-sided solar photo panels has been developed. In particular, the method makes it possible to assess the irradiation of the surfaces on the back side of the panel at different spatial orientations. The system of equations describing the irradiation includes ratios for determining solar radiation on the territory of Ukraine for a horizontal surface and the coefficients for recalculating irradiation from a horizontal to an inclined surface, taking into account the peculiarities of their spatial orientation under direct irradiation and irradiation with reflected scattered light. Analytical studies of the irradiation intensity of solar panels have been carried out for conditions that differ in azimuthal direction and angle of inclination. The features of the irradiation of the front and back sides of solar panels are shown. The possibilities of forming rational conditions for the spatial orientation of panels by the factor of two-sided irradiation are considered. The directions of the panel along the "south-north" and "east-west" axes are considered as characteristic calculated ones. The angles of inclination adopted for the analysis (90 and 45 degrees) allow assessing the irradiance of the panel in the most used range of real operating conditions. With a decrease in the angle of inclination, starting from the level of 90°, the total irradiation of the panel increases. However, the vertical position (90°) can be dictated by the conditions of its application, for example, for a fence or facade cladding. The features of the irradiation of the front and rear parts of solar panels are shown and rational conditions for the spatial orientation of the panels are proposed. The greatest effect of the two-sided irradiation of the solar panel can be obtained with the "east-west" orientation. At the same time, for all orientations, the use of a double-sided photo panel is positive. The angle of inclination has the greatest influence on the irradiance of the panel when the orientation is "south-north", with the orientation "east-west" the dependence on the value of the angle is practically insignificant. The use of the proposed method and the results of the analysis carried out on its basis makes it possible to choose a rational architecture of a solar power plant. References 18, figures 5.

Key words: Two-sided solar photopanel, irradiance panels.