

Л. І. ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»
К. В. МАХОТИЛО, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ «ХПІ»
Д. М. КОСАТИЙ, ТОВ «Буренерго»

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Проаналізовано результати експериментального дослідження впливу різних факторів на ефективність роботи сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в умовах Харківської області.

Ключові слова: сонячні колектори, фотоелектричні панелі, ефективність, фактори впливу.

Вступ. Останні три роки в Україні великими темпами здійснюється реалізація масштабних проєктів відновлюваної енергетики, що дозволило країні стати повноцінним гравцем світовому рівня в цієї сфері. Однак стосовно використання відновлювальних джерел енергії в системах малої енергетики ситуація не така райдушна. Приватного інвестора головним чином цікавить ефективність і економічність його автономної системи. У зв'язку з цим виникає актуальна проблема раціонального використання відповідного обладнання, зокрема сонячних колекторів (СК) та фотоелектричних панелей (ФЕП). Щоб отримати максимально вигідні для споживача показники вироблення енергії, необхідно знати реальні енергетичні характеристики обладнання в умовах конкретної місцевості. Метою даної роботи є визначення ступеня впливу різних факторів на ефективність вироблення енергії СК та ФЕП в умовах Харківської області.

Базою для проведення експериментальних досліджень став демонстраційно-освітній Енергопарк «Схід» ТОВ «БУРЕНЕРГО», розташований неподалік м. Харкова, в сел. Солоніцевка, Харківської області. Географічні координати енергопарку: 49°60' північної широти, 36°28' східної довготи. В роботі використані результати досліджень, виконаних в межах магістерських дипломних робіт студентів НТУ «ХПІ» Соседовой К. С. і Огарко О. В. та співробітників ТОВ «Буренерго», м. Харків.

Кліматичні умови. У табл. 1 приведені дані інтенсивності сонячної радіації [1] на півночі та півдні Харківській області за 2012

© Л. І. Лисенко, К. В. Махотило, Д. М. Косатий, 2013

рік, які зібрані і порівняні з даними Німеччини, країною, яка на сьогоднішній день є лідером за темпами впровадження сонячних систем та за їх сумарною потужністю.

Як видно з таблиці, Харківська область має аналогічний, а в деякі місяці навіть кращий, потенціал у використанні сонячних систем тепло- та електропостачання, але їх впровадження відбувається значно повільніше. Особливо це справедливо для геліосистем. Така ситуація зумовлена декількома факторами, до яких можна віднести, зокрема, відсутність чіткої законодавчої бази розвитку сонячної теплоенергетики та державної підтримки і субсидій, що не сприяє зацікавленості у потенційних інвесторів

Таблиця 1 – Рівень сонячної інсоляції, МДж/м² у 2012 році

Місцевість, пн.ш.	Місяць року											
	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Вовчанськ, 50°17'	2,94	8,44	11,39	14,94	21,32	22,76	23,87	18,07	14,42	7,26	3,51	2,14
Лозова, 48°53'	3,55	9,20	11,34	16,25	20,63	24,04	24,61	19,26	14,95	8,83	4,42	2,72
Німеччина, 50°	2,95	6,10	11,23	14,05	19,57	15,89	18,31	18,10	12,87	7,30	3,03	2,09

Дослідження ефективності геліоколекторів. Для оцінки ефективності використання геліосистем були використані пласкі та вакуумні СК Vaillant auroTHERM VFK 145 V і VTK 1140/2, відповідно, (див. табл. 2) [2]. Розрахунок вироблення теплової енергії геліосистемою з двох пласких і з двох вакуумних СК проводився для середньодобової максимальної і середньої сонячної радіації з березня по жовтень [1]. Для кожного з цих місяців був визначений оптимальний кут нахилу (аналіз проводився в діапазоні кутів 30-50°).

Таблиця 2 – Технічні характеристики СК Vaillant auroTHERM

Характеристика	Значення	
	VFK 145 V	VTK 1140/2
Абсорбуюча поверхня, м ²	2,35	2
ККД згідно EN 12975, %	80,1	64,2
Коефіцієнт поглинання абсорбера α , %	94	93,5
Пропускна здатність скла τ , %	91	85
Термічний опір поверхні СК, м ² К/Вт	0,13	0,13

За результатами розрахунку і збору фактичних даних отримано співвідношення теоретичного і реального вироблення теплової енергії геліосистемою. На рис. 1 показано результати розрахунків для липня. Як видно з рисунку, в період з низькою інтенсивністю (високою хмарністю) розрахункові і фактичні значення майже не відрізняються, а в усі інші дні спостерігається значне (в 2-3 рази) відхилення реального вироблення теплової енергії від розрахунку. Для визначення причин розходження розрахункових і фактичних значень були проаналізовані фактори, які могли вплинути на відхилення реального вироблення теплової енергії від розрахункового.

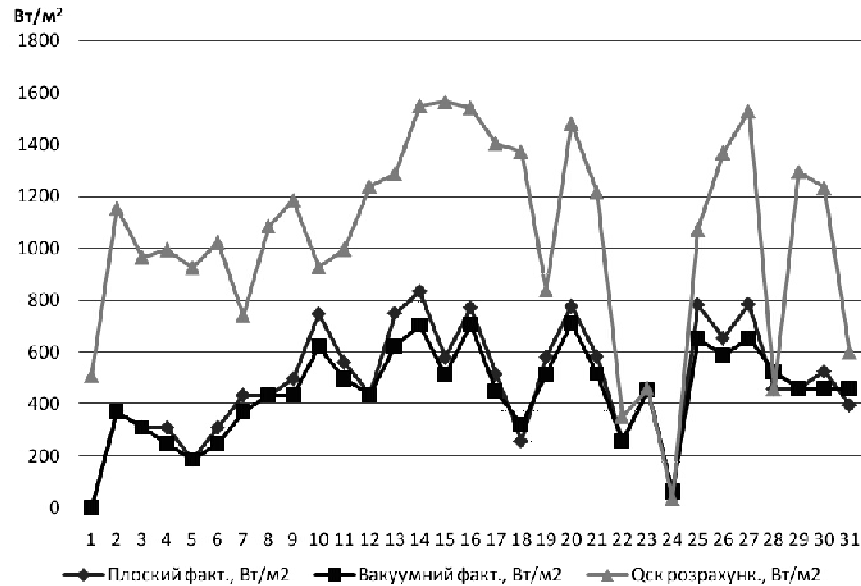


Рис. 1 – Розрахункове і фактичне середньоденне вироблення тепла СК

Ефективність СК залежить від метеоумов місцевості, прозорості скла, кута нахилу колектора, способу установки, часу використання (протягом усього року або сезонно), обслуговування та ін. В роботі досліджено, як саме зміниться вироблення теплової енергії в залежності від значень деяких з цих показників.

Для визначення залежності ККД від цих факторів використано рівняння теплового балансу: в будь-який момент часу кількість сонячної радіації, що поглинається поверхнею абсорбера СК $Q_{\text{пов}}$, дорівнює сумі корисної теплоти для нагріву води $Q_{\text{СК}}$, теплоти, яка

витрачається на нагрів самого СК, $Q_{\text{НАГР}}$, і тепловтрат в навколишнє середовище $Q_{\text{ВТР}}$. З моменту стабілізації температури і надходження сонячної радіації теплою $Q_{\text{НАГР}}$ можна знехтувати, тобто

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{ВТР}}. \quad (1)$$

ККД СК визначається як відношення корисної теплоти $Q_{\text{СК}}$ до кількості сонячної радіації, поглиненої поверхнею абсорбера $Q_{\text{пов}}$.

Корисну теплоту для нагріву води $Q_{\text{СК}}$, Вт, представляємо у вигляді, Вт:

$$Q_{\text{СК}} = A[\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I - (T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}], \quad (2)$$

де A – площа освітлюваної поверхні колектора (площа нетто), м²; $\tau_{\text{пов}}$ – коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання прозорим покриттям; $\alpha_{\text{П}}$ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання приймальною поверхнею колектора; I – сумарна інтенсивність потоку сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м²; $T_{\text{П}}$ – температура приймальної поверхні СК, К; $T_{\text{НС}}$ – температура навколишнього повітря, К; $R_{\text{П}}$ – термічний опір приймальної поверхні СК.

Годинна кількість тепла, поглинена абсорбером СК, Вт, розраховується як:

$$Q_{\text{пов}} = \tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}AI. \quad (3)$$

Зворотній тепловий потік в навколишнє середовище за рахунок підвищення температури поверхні СК у процесі поглинання енергії дорівнює, Вт:

$$Q_{\text{ВТР}} = A(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}, \quad (4)$$

де $T_{\text{НС}}$ – температура навколишнього повітря, К.

Температура приймальної поверхні СК розраховується за формулою:

$$T_{\text{П}} = (T_{\text{НС}} + T_{\text{Б}})/2, \quad (5)$$

де $T_{\text{Б}}$ – температура води в буферній ємності.

Остаточно залежність ККД СК від факторів впливу визначається як

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{ВТР}}}{Q_{\text{пов}}} = 1 - \frac{A(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}}{A\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I} = 1 - \frac{(T_{\text{П}} - T_{\text{НС}})/R_{\text{П}}}{\tau_{\text{пов}}\alpha_{\text{П}}I}. \quad (6)$$

Чистота поверхні СК безпосередньо впливає на продуктивність будь-якої геліосистеми і збільшення забруднення скла (частки пилу, опале листя тощо) призводить до зменшення ефективності роботи СК. На рис. 2 наведено залежність ККД від прозорості скла $\tau_{\text{пов}}$ плоского колектора VFK 145 V.

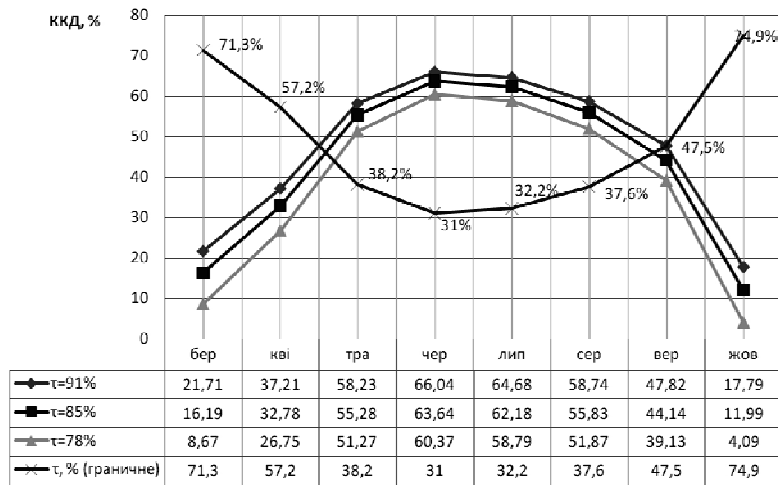


Рис. 2 – Залежність ККД від рівня прозорості скла СК

Як видно, ККД значно знижується при зменшенні τ від 91 % до 78 % (табл. 3)

Таблиця 3 – Зменшення ККД, %, СК VFK 145 V при зменшенні прозорості скла τ на 15%

Місяць	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов
Δ ККД, %	60	29	12	9	10	12	19	77

Розрахункове граничне значення прозорості $\tau_{\text{ГРАН}}$, при якому ККД = 0, змінюється від 31 % в червні до 74,9 % в жовтні, що свідчить про більшу значущість цього фактора. Отже, чим нижча інтенсивність сонячної радіації, тим більша вимога до чистоти скла і відсутності затінення СК.

На рис. 3-4 наведено залежність ККД від температури навколишнього середовища $T_{\text{НС}}$. Для аналізу відібрано дані про фактичне вироблення теплової енергії СК з березня по жовтень для доби з середньою і максимальною середньою інтенсивністю сонячної радіації.

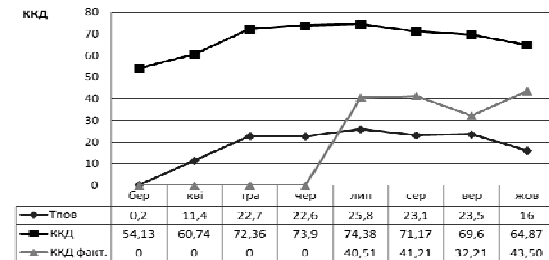


Рис. 3 – Залежність ККД від температури повітря в день з максимальною добовою інтенсивністю сонячної радіації

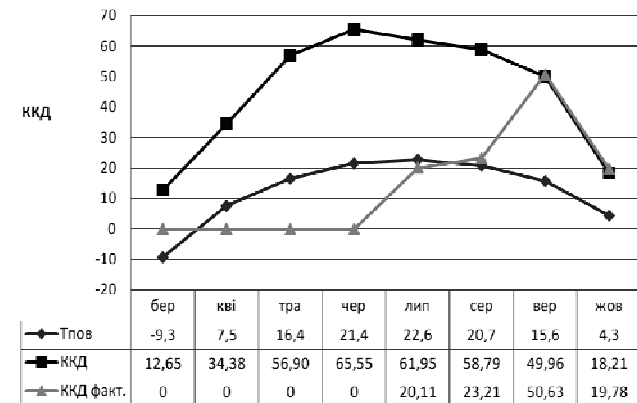


Рис. 4 – Залежність ККД від температури повітря в день з середньою добовою інтенсивністю сонячної радіації

Як видно, незважаючи на зміну частки розсіяної радіації і зміну коефіцієнта прямої радіації по місяцям, залежність ККД від $T_{\text{НС}}$ є прямопропорційною. При високих температурах зовнішнього повітря в дні з максимальною інтенсивністю сонячної радіації ККД значно знижується, а у вересні-жовтні, коли і $T_{\text{НС}}$, і I менше, розрахункові і фактичні дані співпадають (див. рис.4). Таким чином, нагрів скла СК, обумовлений високою температурою і високою інтенсивністю сонячної радіації, яка додатково підвищує температуру скла, значно знижує ККД за рахунок збільшення втрат в навколишнє середовище.

На рис. 5 наведено результати дослідження впливу оптимального кута нахилу β СК на інтенсивність сонячної радіації, яка падає на його поверхню. В розрахунках використано дані про фактичну сонячну радіацію на горизонтальній поверхні з березня по жовтень 2011-2012 років [1].

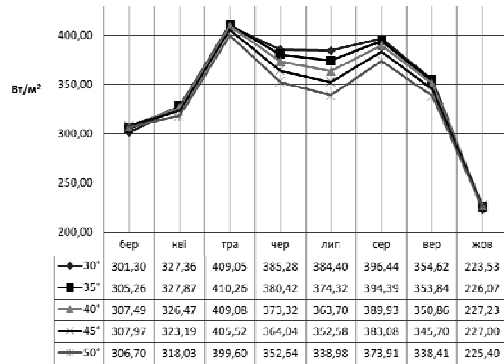


Рис.5 – Залежність інтенсивності сонячної радіації на поверхні СК від кута нахилу β

З графіків видно, що чим більша інтенсивність сонячного випромінювання, тим важливіше вимога до кута нахилу СК. При відносно низькому рівні сонячної радіації оптимальний кут нахилу колектора знаходиться в інтервалі 30-50°, тобто цей фактор не здійснює помітного впливу на ефективність роботи СК (наприклад, в жовтні зміна I в залежності від β складає 1,6 %). В літні місяці, коли рівень сонячної радіації зростає майже вдвічі, оптимальний кут нахилу СК стає досить значним фактором. При цьому зменшення інтенсивності сонячної радіації на поверхні СК при відхиленні від оптимального значення кута нахилу сягає 12 %. Результати розрахунків показують, що для умов Харківської області оптимальним кутом нахилу сонячного колектору є 30°.

Підсумовуючи, можна відмітити, що в літні місяці на ефективність СК впливає як температура навколишнього середовища, так і прозорість скла й кут нахилу СК, а в осінні й весняні – переважно прозорість скла СК.

Враховуючі, що дослідні СК встановлені під оптимальним кутом нахилу 30°, фактор кута практично не впливає на їх ефективність. Тому виявлене розходження фактичного та розрахункового вироблення тепла в літні місяці (див. рис. 1) визначається перш за все недостатнім очищенням поверхні скла СК і підвищеними втратами тепла через його високу температуру.

Дослідження ефективності фотоелектричних панелей. Достатньо великий середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні, і в Харківській області, зокрема (див. табл. 1), дозволяє розраховувати на високу ефективність використання ФЕП для вироблення електроенергії. Проте, як і у

випадку СК, крім інтенсивності сонячного випромінювання на продуктивність ФЕП впливає низка факторів, пов'язаних з її розташуванням: орієнтація на сторони світу, кут нахилу та затінення. В даній роботі вплив цих факторів був експериментально досліджений на прикладі ФЕП з монокристалічного кремнію. Панелі цього типу відрізняються найбільшим ККД, але й найбільш залежні від умов роботи. Технічні характеристики дослідної ФЕП наведені в табл. 4. Фактори впливу розглядалися, перш за все, з точки зору ефективності малих дахових фотоелектричних систем потужністю до 1-3 кВт. Дослідження виконувались в осінній період.

Таблиця 4 – Технічні характеристики дослідної ФЕП з монокристалічного кремнію

Потужність в стандартних умовах, Вт	80
Номинальна напруга, В	30
Номинальний струм, А	2,8
Розміри вхщ, ммхмм	1580х808
Розташування комірок	9х4

Найбільшу кількість енергії від ФЕП можна отримати, коли її поверхня перпендикулярна сонячним променям. Проте кут підйому Сонця змінюється на протязі доби та року. В Україні для орієнтованої на південь ФЕП оптимальний для усього року кут нахилу к горизонту знаходить в діапазоні 32°–34°. Але при використанні найбільш дешевого способу монтажу ФЕП: безпосередньо на даху будинку, забезпечення цього кута нахилу не завжди можливе.

На рис. 6 наведено результати оцінки потужності орієнтованої на південь дослідної ФЕП в середині доби при різних кутах нахилу. Як видно, відхилення від оптимального кута на 15° зменшує потужність на 20 %, а відхилення на 30° – до 45 %. Це вдвічі більше, ніж теоретична зміна обсягу інсоляції на похилій поверхні.

При закріпленні ФЕП на даху будинку неоптимальним може бути не лише кут нахилу, але й її азимут. Теоретично, навіть при північній орієнтації, вдень на поверхню ФЕП у вигляді розсіяного світла потрапляє до 50 % від загальної інсоляції. Проте, через нездатність монокристалічних комірок виробляти електрику у розсіяному світлі ця енергія не використовується. Підчас експериментів було з'ясовано, що при повороті ФЕП на 90° вліво чи вправо від півдня фактичне вироблення електроенергії падає до нуля.

Ще одним важливим чинником, що впливає на ефективність ФЕП, є затінення. ФЕП складається з кількох груп послідовно з'єднаних комірок, і навіть при незначному затіненні однієї комірки фактично відключається вся пов'язана з нею група. Щоб зберегти працездатність ФЕП при частковому затіненні, кожна група захищається шунтуючим діодом, через який тече струм від інших груп. Таким чином, напрям, з якого відбувається затінення ФЕП, стає критично важливим фактором для її ефективності.

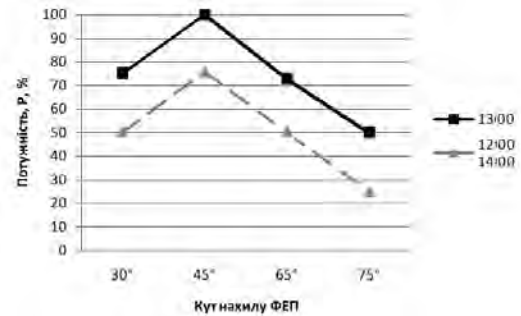


Рис. 6 – Залежність потужності ФЕП від кута нахилу

На рис. 7 представлені результати експериментального дослідження потужності ФЕП при різних варіантах затінення.

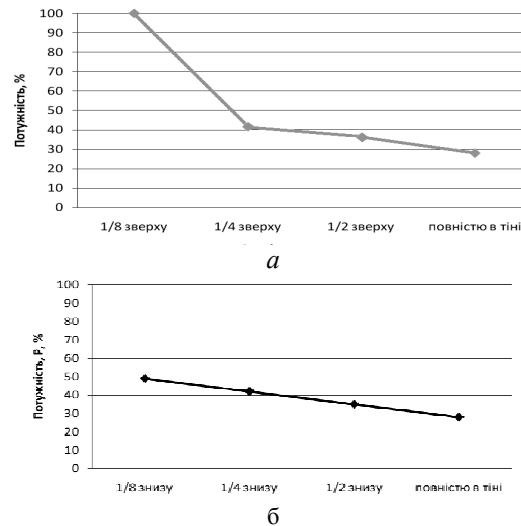


Рис 7 - Залежність потужності ФЕП від ступеня затінення: а – зверху; б – знизу

На рис. 7,а поступове затінення модуля відбувалося зверху-вниз, а рис. 7,б – в зворотному напрямку. Як видно, завдяки сприятливому місцю підключення шунтуючих діодів, затінення панелі на 1/8 зверху не дає суттєвого зниження потужності ФЕП, тобто є допустимим при встановленні ФЕП. Затінення більшої площі ФЕП призводить до різкого зниження її потужності на 60–70 %.

Якщо затінення ФЕП відбувається в протилежному напрямку, воно одразу викликає зниження потужності на 50 % і далі до 70 %, як при затіненні зверху. Цю особливість необхідно враховувати при плануванні місця розташування ФЕП на даху при неможливості уникнення часткового затінення.

Для збільшення вироблення енергії ФЕП використовуються одно- та двокоординатні системи стеження за Сонцем. Ефект від них тим більш виражений, чим північніше розташовано ФЕП. Для західної України цей показник знаходиться на рівні 20-30 %, а для центральної та східної України – 30-40 %.

На рис. 8 подано результати експериментального оцінювання ефективності однокоординатної системи стеження (по азимуту від напрямку на південь) по даним про потужність ФЕП в першій половині доби. Як видно, в умовах Харківської області однокоординатна система стеження здатна збільшити вироблення енергії на 10-20 %. Це майже вдвічі менше, ніж теоретична оцінка, але слід відмітити, що період оцінювання був обмежений лише осінню.

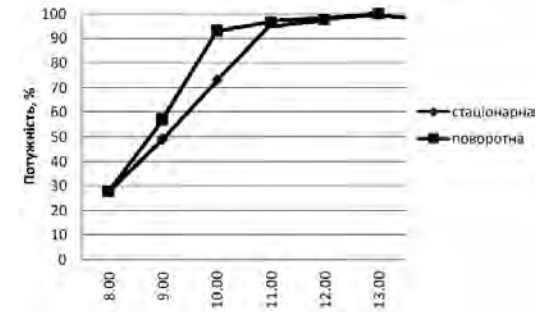


Рис 8 – Порівняння ФЕП в стаціонарному та поворотному режимах

Підсумовуючи результати проведених дослідів з ФЕП, можна заключити, що вони підтверджують значущість перерахованих факторів. Оцінки їх фактичного впливу на продуктивність ФЕП в умовах Харківської області зведені в табл.5.

Таблиця 5 – Вплив факторів на продуктивність ФЕП

Фактор	Величина, тип	Зміна потужності, %
Відхилення від оптимального кута нахилу	до 15°	до -20
	до 30°	до -40
Відхилення від півдня	± 90°	до -100
Затінення панелі	Тимчасове, незначне	від -10 до -20
	Систематичне, значне	від -50 до -60
Система стеження за Сонцем	Однокоординатна	від +10 до +20

Висновки. При проектуванні сонячних систем тепло- та електропостачання важливо забезпечити оптимальні умови роботи обладнання. Однак в реальності це не завжди можливо або призводить до подорожчання проекту. В роботі експериментально визначено залежності продуктивності СК та ФЕП від впливу факторів розміщення і погодних умов на прикладі Харківської області. Вони дозволяють оцінити реальну ефективність системи та обрати проектні рішення, оптимальні за продуктивністю і вартістю. В той же час, виявлена для більшості факторів різниця між теоретичними й експериментальними оцінками вимагає проведення подальших, більш детальних та тривалих досліджень їх впливу на продуктивність СК і ФЕП.

Список літератури: 1 – Climatology Resource for Agroclimatology Daily Averaged Data (Evaluation Version) [електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://power.larc.nasa.gov>.; 2 – Махотіло К. В., Косатий Д. М. Експериментальна оцінка ефективності сонячних колекторів Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит – №12, 2012 – с. 43-48.

Надійшла до редколегії 30.09.2013

УДК 644.11:УДК 728.1

Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в харківській області / Л. І. Лисенко, К. В. Махотіло, Д. М. Косатий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Энергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59(1032). – С. 96 – 105. – Бібліогр: 2 назв.

Проанализированы результаты экспериментального исследования влияния различных факторов на эффективность работы солнечных коллекторов и фотоэлектрических панелей в Харьковской области.

Ключевые слова: солнечный коллектор, фотоэлектрическая панель, эффективность, экспериментальная оценка.

Results of experimental studies of various influential factors action on the performance of solar collectors and photovoltaic panels in Kharkiv region are analyzed.

Key words: solar collectors, photovoltaic, efficiency, experimental evaluation.