

**В. В. Филенко**

**В. В. Соловей**, д-р техн. наук

Інститут проблем  
машинобудування  
ім. А. М. Підгорного  
НАН України, м. Харків,  
e-mail: fylenko@gmail.com,  
solovey@ipmach.kharkov.ua

УДК 620.92

## **КОМБІНОВАНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА З КОНЦЕНТРАТОРОМ ТА ВОДНЕВИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ**

*Наведено методику розрахунку фотоелектричної установки зі стаціонарним параболоциліндричним концентратором. Розглянуто можливість комбінованого використання сонячного електроенергії у поєднанні з електролізерами водню високого тиску для зниження екологічного навантаження на урбанізовані території.*

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, фотоелектричний перетворювач, електролізер, водень, концентратор.

### **Постановка проблеми**

Сонячна електроенергетика невпинно збільшує свою частку в світовому енергетичному балансі. Серед головних перешкод ефективного використання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання слід виділити його низьку щільність та високу нерівномірність надходження як протягом світлового дня, так і в залежності від пори року. Одним зі шляхів подолання або мінімізації вказаних перешкод може стати створення спеціалізованих систем концентрування сонячного випромінювання у поєднанні з системами акумулювання енергії або виробництва екологічно чистого палива. Доцільність першої частини такого підходу для фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) науково обґрунтовано та реалізовано на практиці [1].

Друга частина пропонованого підходу полягає у використанні системами акумулювання енергії або виробництва екологічно чистого палива. Як перспективні проекти у цьому напрямі, можна виділити роботи, направлені на використання інноваційних водневих технологій в інфраструктурі паливно-енергетичного комплексу, що може істотно зменшити споживання вуглеводневих палив і дозволити поліпшити стан навколишнього середовища у техногенно-навантажених промислових регіонах.

За рахунок використання систем концентрування можливо не лише підвищити енергетичну ефективність використання ФЕП, знизивши при цьому використання дорогих напівпровідникових матеріалів, але й згладити нерівномірність надходження сонячної радіації і покращити економічні та експлуатаційні показники, зокрема систем з використання відновлюваних джерел енергії. Слід зазначити, що такий підхід вимагає чіткого узгодження параметрів концентратора з параметрами енергоперетворювачів. Як наслідок, необхідно забезпечити високу точність розрахункових характеристик концентруючих систем з урахуванням розподілу щільності сконцентрованого випромінювання на поверхні ФЕП.

### **Виклад основного матеріалу**

Зважаючи на актуальність проблеми, в сучасній науковій літературі багато уваги приділяється різноманітним видам та моделям концентраторів сонячного випромінювання, що передбачають наявність систем стеження за сонцем (параболічні концентратори) або створення принципово нових фотоелектричних панелей (з використанням призмokonів, лінз Френеля, фоконів та фоклінів, голографічних та люмінесцентних концентраторів, жалюзійних геліостатів – концентраторів та ін.). Окремо слід виділити стаціонарні циліндричні концентратори з U-подібним профілем та їх варіації (концентратори з S-подібним вторинним рефлектором, циліндричні  $\omega$ -подібні концентратори, багаторівневі системи концентрації та ін.), для яких передбачається використання фотоелементів з двосторонньою робочою поверхнею [2].

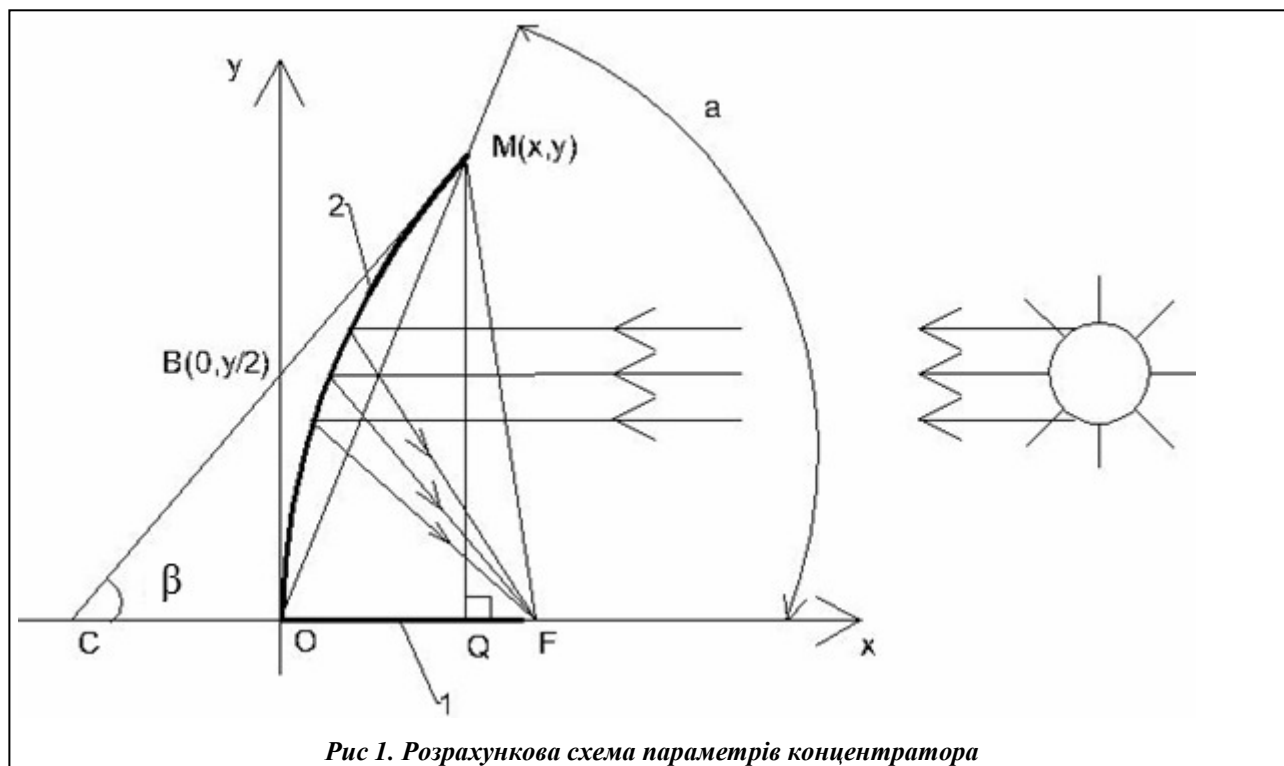


Рис 1. Розрахункова схема параметрів концентратора

З метою підвищення ефективності використання сонячної інсоляції пропонуємо застосовувати типові стаціонарні ФЕП у поєднанні з параболоциліндричним концентратором (2) та горизонтальним розміщенням фотоприймаючої поверхні(1) (рис. 1).

З метою визначення реальної геометричної концентрації та запобігання затіненню гілкою параболи необхідно розрахувати ширину концентратора (ширину по міделю) та його глибину. Крива OM є частиною гілки параболи, котра описується рівнянням

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x = 4 \cdot f \cdot x,$$

де  $p$  – фокальний параметр параболи;  $f$  – фокусна відстань параболи.

Граничний кут, що потрапить до концентратора та не буде затінитися його стінкою, проходить по дотичній до параболи в точці  $M(x, y)$  та буде направлений під кутом граничної висоти Сонця  $\beta$  до осі абсцис. В зазначеній проекції цю пряму можна описати рівнянням

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \beta + b,$$

де  $b$  – координата перетину дотичної до осі ординат,  $b = y/2$ .

Розв'язок системи таких рівнянь можна записати у вигляді

$$x = \frac{f}{\operatorname{tg}^2 \beta}, \quad y = \frac{2 \cdot f}{\operatorname{tg} \beta},$$

Легко бачити, що відстань до фокальної площини  $L$  в даному випадку співпадає з координатою  $y$  точки  $A$ , тобто

$$L = \frac{2 \cdot f}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Геометрична концентрація  $K_{r0}$  визначається через відношення ширини концентратора до ширини приймача за формулою

$$K_{r0} = \frac{L}{f},$$

або

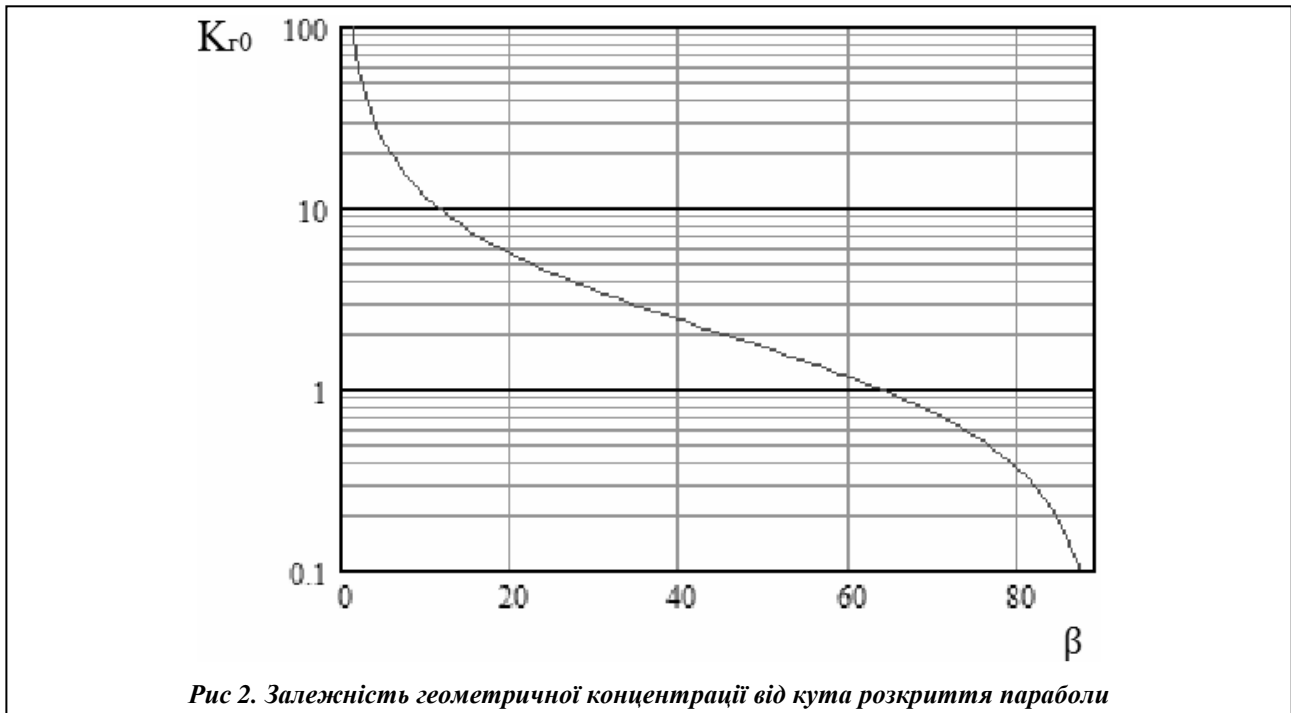


Рис 2. Залежність геометричної концентрації від кута розкриття параболи

$$K_{r0} = \frac{2}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Графік зміни геометричної концентрації при зміні кута  $\beta$  наведено на рис. 2.

Дані рис. 2 свідчать, що при значеннях  $\beta > 45^\circ$  коефіцієнт геометричної концентрації не перевищуватиме 2, а при  $\beta > 63,5^\circ$  стає менше 1. Тобто з точки зору ефективності немає сенсу використовувати установку з кутом розкриття параболи менше  $63,5^\circ$ , а рекомендований кут розкриття повинен бути не більше  $45^\circ$ .

Робочий кут системи зі стаціонарним концентратором можна знайти геометрично з рис. 1

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_n}{x_n} = \frac{2 \cdot f \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{\operatorname{tg} \beta \cdot f} = 2 \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(2 \cdot \operatorname{tg} \beta).$$

З метою забезпечення ефективної роботи системи необхідно уникнути затінення фотоелементів концентратором, тобто

$$\alpha \leq h_0,$$

де  $h_0$  – максимальна висота Сонця над горизонтом, град.

Максимальну висоту Сонце матиме у день літнього сонцестояння. Саме у цей день (21–22 червня) висота Сонця в астрономічний полудень може бути знайдена через широту місця спостереження

$$h_0 = 90^\circ - \varphi + \delta_0,$$

де  $\varphi$  – широта місцевості;  $\delta_0$  – кут нахилу земної осі обертання до нормалі площини обертання Землі,  $\delta_0 = 23,45^\circ$

Так, для м. Харкова, що лежить на широті  $50^\circ$ , висота Сонця складе  $63,45^\circ$ . Тоді, апертурний кут параболи  $\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{2}\right) = 44,77^\circ$ .

Відомо [1], що геометрична концентрація стаціонарного концентратора є величиною змінною і залежить від кута схилення Сонця  $\delta$  та часового кута  $\psi$

$$K_r = K_{r0} \cdot \cos \delta \cdot \cos \psi.$$

Враховуючи залежність кута схилення Сонця  $\delta$  від порядкового номера світлового дня від початку року, з достатньо високою точністю за формулою Купера можна отримати функцію зміни геометричної концентрації зазначеного концентратора протягом календарного року

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

де  $360^\circ$  – значення повного оберту Землі навколо Сонця за рік;  $365$  – число днів у році;  $284$  – кількість днів від 21 березня до 31 грудня;  $23,45^\circ$  – кут нахилу умовної земної осі обертання;  $n$  – порядковий номер календарного дня від початку року.

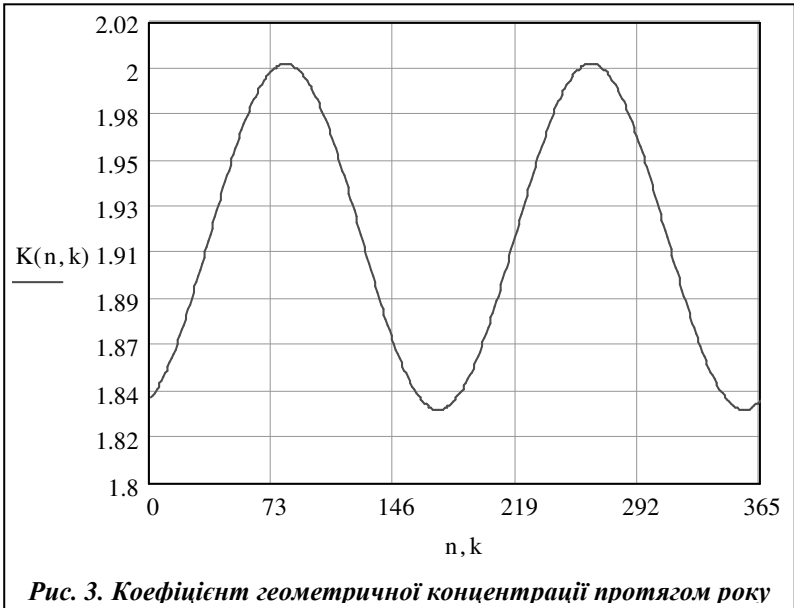


Рис. 3. Коефіцієнт геометричної концентрації протягом року

Вважаючи часовий кут  $\psi$  таким, що дорівнює 0, а кут схилення Сонця  $\delta$  незмінним протягом дня, функція геометричної концентрації матиме вигляд

$$K_r = K_{r0} \cdot \cos\left(23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right)\right),$$

або, враховуючи наведене вище

$$K_r = \frac{2}{\operatorname{tg}\beta} \cdot \cos\left(23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right)\right).$$

Для м. Харкова графік зміни геометричної концентрації протягом року наведено на рис. 3.

Довжину дуги параболі параболоциліндричного концентратора можна знайти, взявши визначений інтеграл

$$L_{\text{нар}} = \int_0^{y_n} \sqrt{1 + (x(y))^2} dy = \int_0^{y_n} \sqrt{1 + \left(\frac{y}{2 \cdot f}\right)^2} dy,$$

Взявши визначений інтервал, отримаємо таке рівняння:

$$L_{\text{нар}} = f \cdot \left[ \frac{\cos\beta}{\sin^2\beta} + \ln\left(\frac{1 + \cos\beta}{\sin\beta}\right) \right],$$

Результати аналізу свідчать, що з метою підвищення ефективності системи у широтах вище  $50^\circ$  доцільно виконувати підйом північної частини фотоелектричної панелі відносно горизонту на кут  $\alpha_{\text{пов}}$ . Методика розрахунку залишиться незмінною, додатково потрібно виконати перехід до нової системи координат.

Таким чином, знайти координати точки  $M$  з координатами  $(x_1, y_1)$  відносно координат  $(x, y)$  у вихідній системі

$$\begin{cases} x_1 = x \cdot \cos\alpha_{\text{пов}} - y \cdot \sin\alpha_{\text{пов}} + a \\ y_1 = x \cdot \sin\alpha_{\text{пов}} - y \cdot \cos\alpha_{\text{пов}} + b. \end{cases}$$

Легко бачити, що  $a = 0$ , коли  $b = f \cdot \sin\alpha_{\text{пов}}$ .

Інтегральна інтенсивність сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню фотоелемента, складається з суми безпосередньо сонячного випромінювання на горизонтальну площину фотоелемента  $I_{\text{зор}}$  та інтенсивності відбитого випромінювання від концентратора  $I_{\text{кон}}$

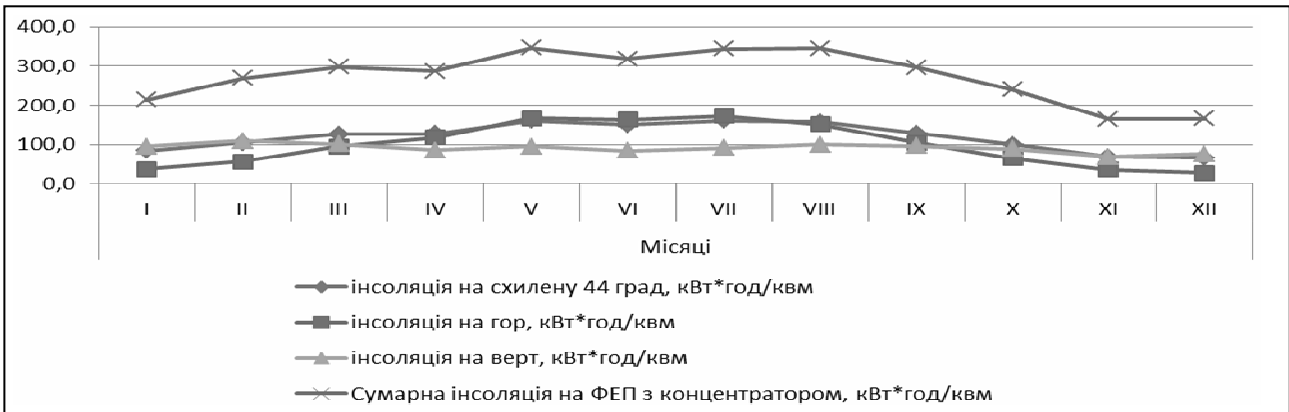


Рис 4. Сумарний місячний рівень сонячної інсоляції для різних кутів нахилу приймаючої поверхні

$$I = I_{гор} + I_{кон}$$

В свою чергу, інтенсивність сфокусованого концентратором випромінювання у нашому випадку може бути подана у вигляді

$$I_{кон} = I_{вер} \cdot K_{г0} \cdot \tau,$$

де  $I_{вер}$  – інтенсивність сонячного випромінювання на вертикальну поверхню у період  $0 < h_0 \leq \beta$ ;  $\tau$  – оптичний ККД концентратора, що залежить від матеріалу покриття концентратора та його технологічного виконання.

Результати розрахунку сонячної інсоляції на одиницю площі сонячної панелі для м. Харкова за даними довгострокових спостережень (липень 1983 – червень 2005 р.) [3] наведено на рис. 4.

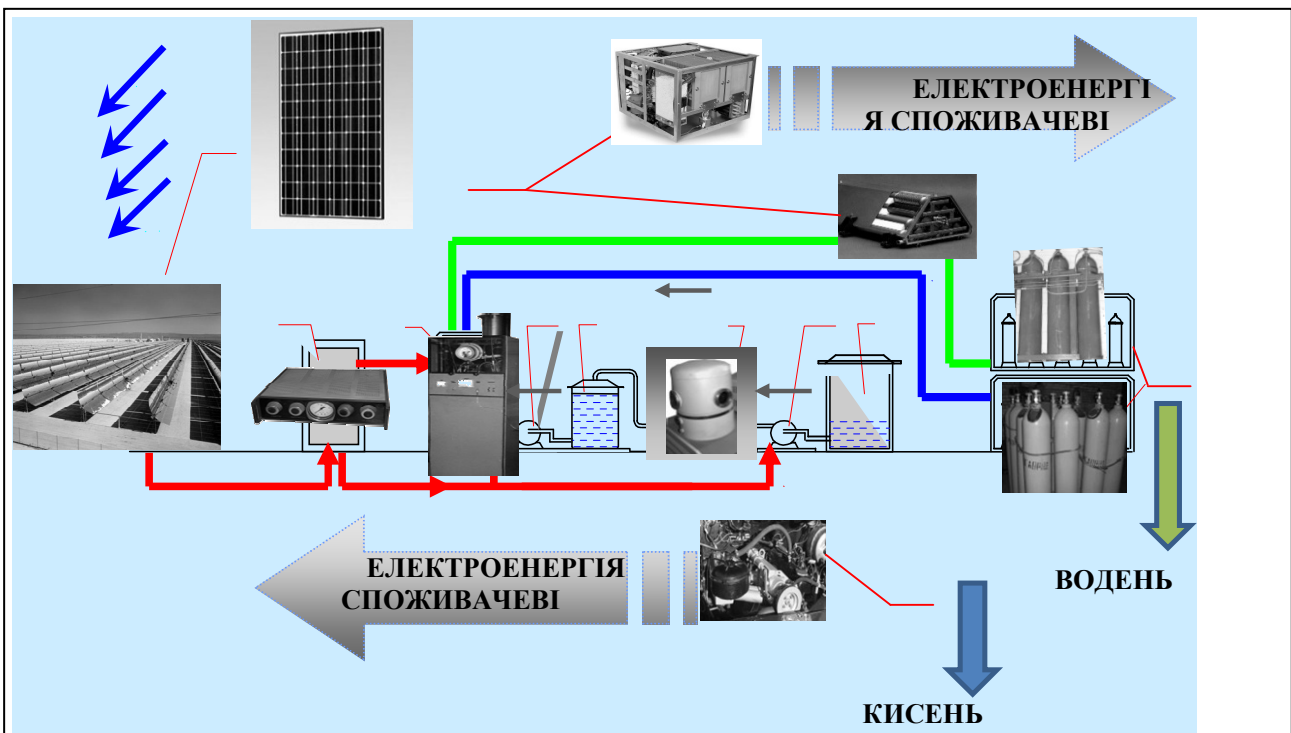


Рис 5. Принципова схема автономного геліоенергетичного водневого енерготехнологічного комплексу для заправки автотранспорту:

1 – фотоелектрична станція зі стаціонарним концентратором сонячного випромінювання; 2 – інвертор і система керування; 3 – електролізер високого тиску; 4 – балони для комерційної реалізації газів; 5 – насос; 6 – бак опрісненої води; 7 – бак початкової води; 8 – опріснювальний блок; 9 – накопичувальні ємності для водню і кисню; 10 – металогідридні модулі для тривалого зберігання і стискування водню



**Рис. 6. Потенціал геліоенергетичних ресурсів для виробітку електроенергії та водню на території України [5]**

Дані, наведені на рис. 4, демонструють, що використання сконструйованої системи концентрування протягом усього року дозволить у 2,3 рази підвищити надходження сонячного випромінювання на одиницю площі, знизивши при цьому рівень сезонних коливань сонячної інсоляції на поверхні приймача з 2,44 до 2,1.

При використанні стандартних полікристалічних фотоелектричних модулів з ККД 14,35% та інвертора з ККД 0,96 можна розрахувати питомі та сумарні добові значення виробітку електричної енергії для ФЕП з концентратором (таблиця).

**Розрахункові значення генерації електричної енергії**

Виробіток	Місяці												Рік
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Місячний, кВт·год/м <sup>2</sup>	29,5	37,1	40,9	39,5	47,6	43,8	47,3	47,5	40,8	33,1	22,7	22,9	452,7
Добовий 140 модулів КМ 235P-60, кВт·год	218,0	303,5	302,6	301,3	352,2	334,4	349,7	351,3	312,0	245,0	173,1	169,0	3346,7

Сучасний рівень водневих технологій, які реалізуються зокрема в електрохімічних установках, створених в ППМаш НАН України, дозволяє виробляти і накопичувати водень в системах з високим тиском, безпосередньо в умовах водневих заправних станцій і використовувати його як екологічно чисте паливо в автомобільних двигунах і паливних елементах, що знижує токсичність відпрацьованих газів транспортних засобів і забезпечує економію вуглеводневих енергетичних ресурсів [4].

З метою зниження гостроти енергоекологічної кризи пропонується розширити використання відновлювальних видів енергії шляхом створення сонячно-водневої заправної станції (СВС) на базі

новітніх технологій для забезпечення автотранспорту та побутових споживачів екологічно чистим паливом – воднем, схема, якої подана на рис. 5.

Дослідження енергетичних і режимних характеристик обладнання, яке було розроблено для використання в технологічних схемах СВС, дозволили визначити основні показники роботи установок залежно від геокліматичних умов експлуатації. Результати проведених теоретичних досліджень щодо залежності добового виробітку  $H_2$  (водню) і  $O_2$  (кисню) від місяця року та її розподіл по території України наведено на рис. 6.

### Висновок

Використання стаціонарних напівпараболічних концентраторів запропонованої конструкції протягом року дозволить у 2,3 рази підвищити надходження сонячного випромінювання на одиницю площі, знизивши при цьому рівень сезонних коливань сонячної інсоляції на поверхні приймача 14 %.

### Література

1. *Стребков, Д. С.* Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 318 с.
2. *Optimal orientation of non tracking solar concentrator in northern region* / D. S. Strebkov, A. E. Irodionov, V. P. Tarasov, E. G. Bazarova // 11-th International Conf. on Solar Energy at High Latitudes. – Riga. – 2007. – P. 62.
3. *Surface meteorology and Solar Energy* [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse>
4. *Соловей, В. В.* Активация водорода и водородсодержащих энергоносителей / В. В. Соловей, М. А. Оболенский, А. В. Бастеев. – Киев: Наук. думка, 1993. – 168 с.
5. *Филенко, В. В.* Комбіноване використання водневої та сонячної енергетики в Україні / В. В. Филенко, О. Л. Агапова // Наука і сучасність: виклики глобалізації: Зб. центру наук. публікацій «ВЕЛЕС» за матеріалами II міжнар. наук.-практ. конф. Ч. 1. – К.: Центр наук. публікацій, 2016. – С. 110–114.

*Надійшла до редакції 16.07.16*