

В.В. Дубровська¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4765-0484В.І. Шкляр¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-6879-7501

Є.В. Гавриленко, магістр, ORCID 0009-0006-2962-6076

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОСИСТЕМ НА БАЗІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЮДЖЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ

В даній статті проведено аналіз роботи геліосистеми в закладі вищої освіти, до складу якої входять фотоелектричні станції, що приєднані до електричної мережі з власним споживанням електроенергії, та сонячна установка гарячого водопостачання з колекторами та баком-акумулятором. Моделювання роботи системи проводилось в програмних середовищах RETScreen, T*SOL та PV*SOL на базі усереднених кліматичних даних отриманих з метеостанції «Жуляни». Розташування фотоелектричних модулів з монооксиду кремнію типу Trina Solar TSM-DE08M (II) потужністю 370 Вт та вакуумних трубчастих колекторів фірми Veissmann Vitosol 300-T SP3 потужністю 1,3 кВт проведено за допомогою моделювання з урахуванням їх розмірів, особливостей конструкції даху, розміщення вентиляційних систем, затінення поверхонь даху іншими елементами будівлі в м. Києві. В результаті енергетичного моделювання визначено: кількість отриманої теплової та електричної енергії, потужності інверторів, коефіцієнт заміщення традиційного палива, строки окупності та зменшення викидів шкідливих речовин (CO₂). Враховуючи аналіз отриманих даних в подальшому рекомендується встановлення таких систем в бюджетних закладах вищої освіти для зниження споживання електричної енергії або природного газу, зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

Ключові слова: фотоелектричні модулі, сонячний колектор, програмне забезпечення, енергетичне моделювання, ступінь заміщення палива, викиди CO₂.

Вступ. В останні роки Україна і інші держави світу починають стикатися з наслідками глобальної зміни клімату. Однією з причин глобального потепління є зростання викидів вуглекислого газу.

Основним джерелом викидів є використання викопного палива в традиційній енергетиці для виробництва теплової та електричної енергії. У зв'язку зі збільшенням тарифів на енергію та у відповідності до енергетичної Стратегії України [1], більш актуальним стає впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в бюджетних установах, що дозволить значно зменшити використання первинних енергетичних ресурсів. Щорічне подорожчання енергетичних ресурсів, невпинне зменшення покладів викопного палива та зростання забруднення навколишнього середовища призводить до збільшення частки використання поновлюваних джерел енергії в усьому світі.

Однією з перспективних альтернатив традиційним видам палива є енергетичний потенціал сонячної енергії, який може бути використаний для зменшення використовуваних об'ємів органічного палива при виробництві теплової та електричної енергії.

Сонячна радіація – це практично невичерпне та екологічно чисте джерело енергії, що дозволяє використовувати його у все більш зростаючих масштабах без негативного впливу на довкілля. Вона використовується для отримання теплоти в системах гарячого водопостачання шляхом прямої абсорбції сонячного випромінювання в сонячних колекторах та перетворення його на електричну енергію в фотоелектричних системах.

В середній смузі Європи в літній період квадратний метр плоского сонячного колектору забезпечує нагрівання 50-60 літрів води в день до температури 60-70 °С, а вакуумного – до 70-90 літрів.

ККД плоского сонячного колектору складає до 70%, а вакуумного до 92% та залежать від температури довкілля, густини потоку сонячної енергії і температури, до якої необхідно нагрівати воду в геліосистемі.

Одним з основних економічних показників сонячного колектору, поряд з його вартістю, є надійність та довговічність. Термін служби геліоколектору не менше 10 років.

Середньорічна кількість сумарної енергії сонячного випромінювання, що надходить щорічно на територію України, знаходиться в межах 1000-1400 кВт·год/м² [2]. Таку сонячну активність можна порівняти з умовами Німеччини, де дахових геліоустановок налічується майже в 1400 разів більше, ніж в Україні. Для збільшення частки сонячної енергії у загальному споживанні енергії у містах, Палата

депутатів Берліну [3] прийняла закон про обов'язковість встановлення сонячних модулів з 1 січня 2023 року на нові будівлі, а також у разі капітального ремонту дахів існуючих споруд.

Фотоенергетичне обладнання може експлуатуватися весь рік, проте максимально ефективно його використання з квітня до жовтня. При цьому найбільш сприятливими для цього є південні регіони України (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та частина Донецької області, АР Крим), де сьогодні зосереджено понад 60% промислових сонячних електростанцій. Станом на кінець 2021 року сумарна потужність сонячних електростанцій склала 6320 МВт (без урахування тих, що знаходяться на тимчасово окупованих територіях) [4]. В Україні розробляють нові сонячні електростанції малої потужності, щоб уникнути відключень електроенергії та допомогти бізнесу триматися на плаву в жахливих економічних умовах.

Вище викладене дає підставу вважати, що в Україні існують всі необхідні та достатні умови широкомасштабного впровадження геліосистем при виробництві теплової та електричної енергії для енергозабезпечення споживачів.

Мета та завдання. Аналіз зменшення споживання теплової та електричної енергії отриманих з традиційних видів палива та викидів CO₂ при використанні геліосистеми з використанням сонячних колекторів та фотоелектричних модулів на основі комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження обрано корпус №9 КПІ (рис. 1) [5], в якому навчається 918 студентів.

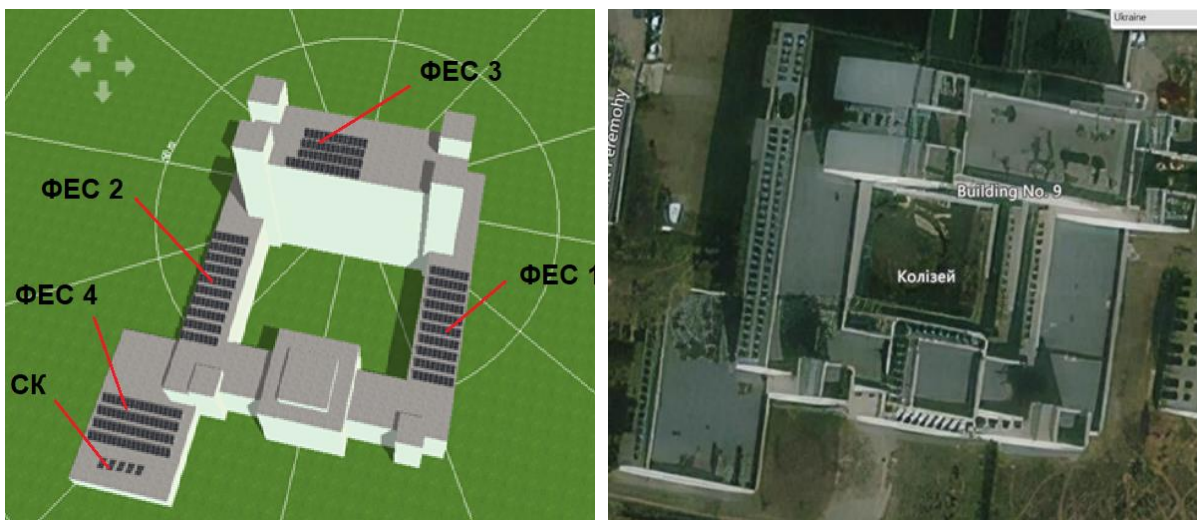


Рисунок 1 – Загальний вигляд корпусу № 9 та розміщення сонячних фотоелектричних модулів та колекторів: ФЕС 1-ФЕС 4 – фотоелектричні станції; СК – сонячні колектори

За рік корпусом споживається в середньому біля 200 МВт·год електричної енергії, яка витрачається на освітлення, електрообладнання та нагрівання води в електричних бойлерах. Графік споживання електроенергії протягом декількох років наведено на рисунку 2.

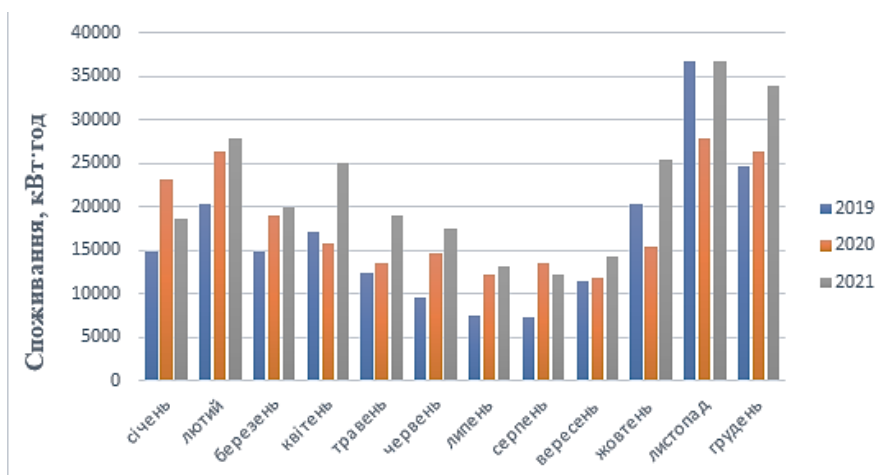


Рисунок 2 – Споживання електричної енергії корпусом №9 протягом 2019-2021 рр.

Для зменшення залежності від зовнішньої електромережі пропонується встановити на даху корпусу сонячні колектори (СК) для забезпечення потреб ідальні гарячою водою з середньоденним споживанням 1,2 м³, а для покриття електричного навантаження – чотири фотоелектричні станції (ФЕС), які розташовані на різних рівнях поверхні даху.

Для вирішення поставленої задачі було проведено комп'ютерне моделювання роботи геліосистеми в програмних середовищах RETScreen [6], T*SOL [7] та PV*SOL [8], які дозволили розрахувати отриману сонячну енергію, кількість виробленої електричної енергії та теплоти, коефіцієнт заміщення традиційного палива, строк окупності та зменшення викидів шкідливих речовин (CO₂).

Наведені програми використовують усереднені кліматичні дані для м. Київ, які були отримані з метеостанції «Жуляни» за останні 20 років (рис. 3).

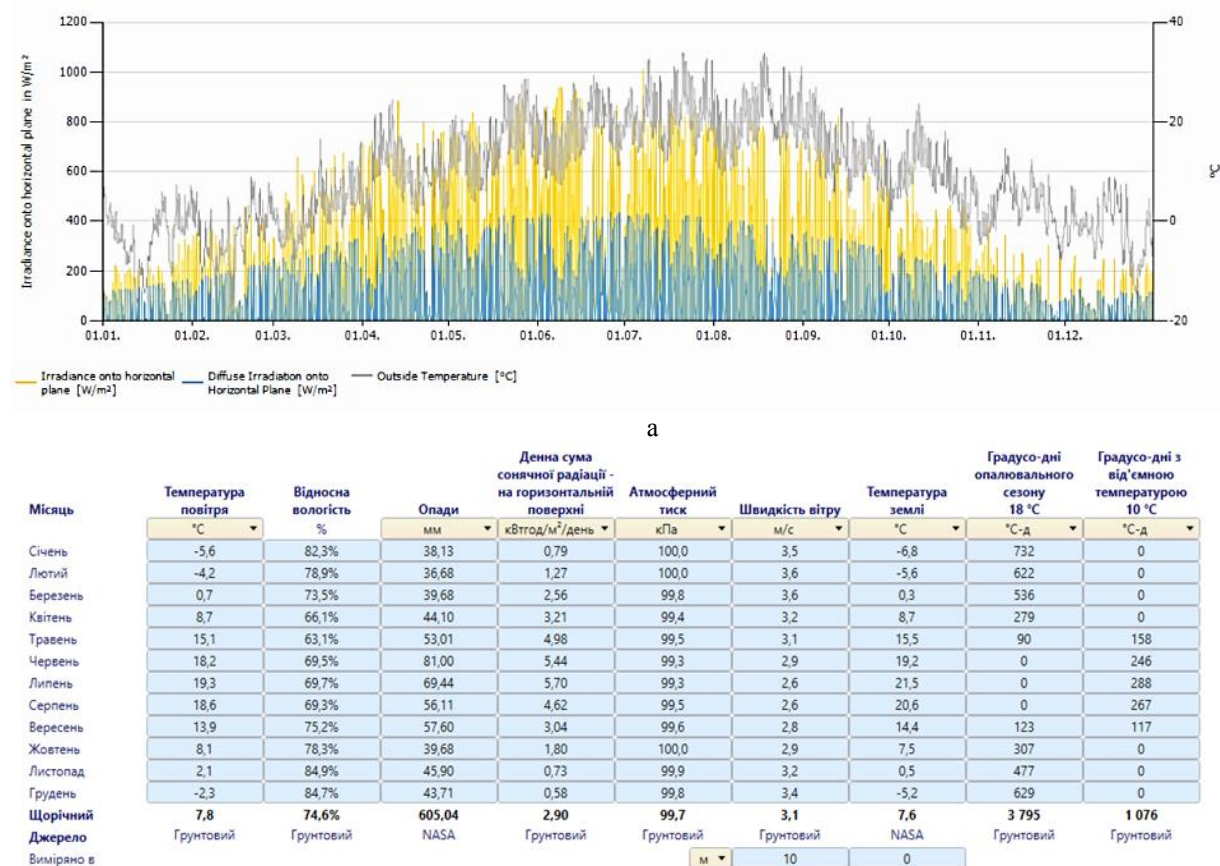


Рисунок 3 – Кліматичні данні з програми PV*SOL (а) та RETScreen (б)

Моделювання ФЕС проведено в програмах PV*SOL та RETScreen. Розміщення СБ виконано за допомогою 3D моделювання в програмі PV*SOL паралельними рядами з урахуванням їх розмірів, особливостей конструкції даху будівлі, розміщення вентиляційних систем та затінення поверхонь даху іншими елементами будівлі (рис. 1). При моделюванні використовувалась система Grid-connected PV System with Electrical Appliances - система, що приєднана до мережі з власним споживанням. Пропонується встановити однакові сонячні батареї (СБ) з монооксиду кремнію типу Trina Solar TSM-DE08M (II) [9] потужністю 370 Вт у чотирьох місцях під оптимальним кутом.

У програмі RETScreen, яка дозволяє моделювати та аналізувати будь-який проект із використанням ВДЕ, за максимальною кількістю надходження річної сонячної радіації на похилу поверхню, яка складає 4,6 МВт·год, було визначено оптимальний кут нахилу встановлення сонячного модуля у 30° при цілорічній роботі системи.

Характеристики ФЕС наведено в таблиці 1.

Для переведення електричної енергії постійного струму, яку виробляють фотоелектричні модулі, в змінний, було використано чотири трифазні інвертори різної потужності: 50 кВт для ФЕС 1 і ФЕС 3; 20 кВт – ФЕС 2; 17 кВт та 8 кВт – ФЕС 4. Вихідна напруга – 380 В. Кількість виробленої електричної енергії окремими ФЕС наведена на рисунку 4.

Таблиця 1 – Характеристики ФЕС

Система	Кількість, шт.	Площа, м ³	Встановлена пікова потужність, kWp	Річна кількість виробленої електричної енергії, кВт·год/рік	Ефективність роботи, %
ФЕС 1	80	146,68	29,60	31051	80,02
ФЕС 2	54	99,01	19,98	20507	78,29
ФЕС 3	80	146,68	29,60	30804	79,64
ФЕС 4	68	124,68	25,16	26798	80,72
Всього	282	517,05	104,34	109160	

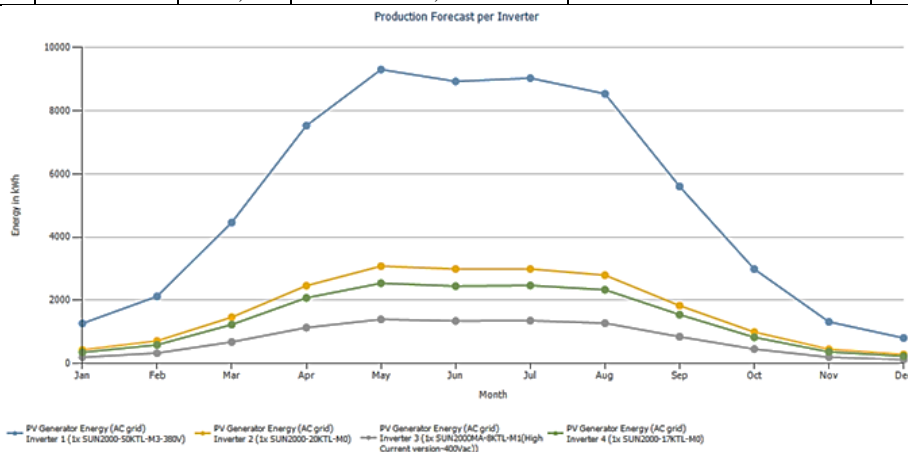


Рисунок 4 – Кількість виробленої електричної енергії ФЕС 1 – ФЕС 4

З рисунку 5 видно, що максимальну ефективність (найбільше виробляється електричної енергії) ФЕС мають з травня по серпень. Однак, не вся електроенергія, яка отримана в денний період, безпосередньо використовується в корпусі, частина її направляється в мережу (рис. 5). Забезпечення електрикою, при відсутності сонячного випромінювання або недостатньої її кількості від ФЕС, відбувається з мережі (рис. 6).

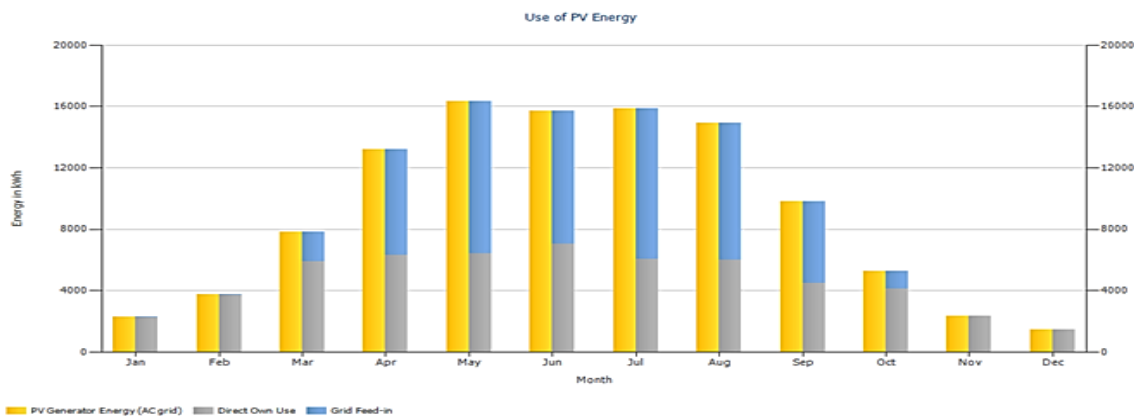


Рисунок 5 – Кількість виробленої електричної енергії ФЕС, спожитої та відданої в мережу

Баланс між виробництвом і споживанням електричної енергії та її перерозподіл з мережею наведено на рисунку 7.

В загальному балансі між споживачем та постачальником (рис. 7) в період з листопаду по лютий корпус потребує додаткової електрики з мережі, а з квітня по вересень навпаки передає її в мережу або іншим споживачам університету, які розташовані поруч. В березні та жовтні виробництво електричної енергії та її споживання майже однакові.

В результаті встановлення ФЕС може бути отримано 109,16 МВт·год електричної енергії, що складає близько 50 % від загальної річної потреби.

Програма PV*SOL визначає вартість обладнання системи та розраховує строк окупності. Фінансові витрати з програми PV*SOL дозволили визначити строк окупності в програмі RETScreen для тих самих систем. При вартості системи у 77,3 тис. \$ USA і сумарних щорічних витратах у 4 тис. \$ USA строк окупності з урахуванням вартості електричної енергії у 3,83 грн/кВт·год (з ПДВ та витратами на послуги з розподілу електричної енергії) склав 4,3 року в обох програмах.

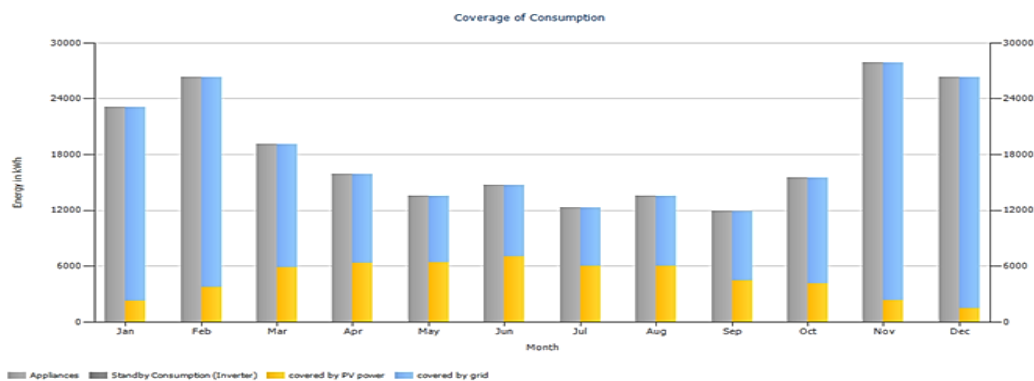


Рисунок 6 – Споживання електричної енергії від ФЕС та мережі

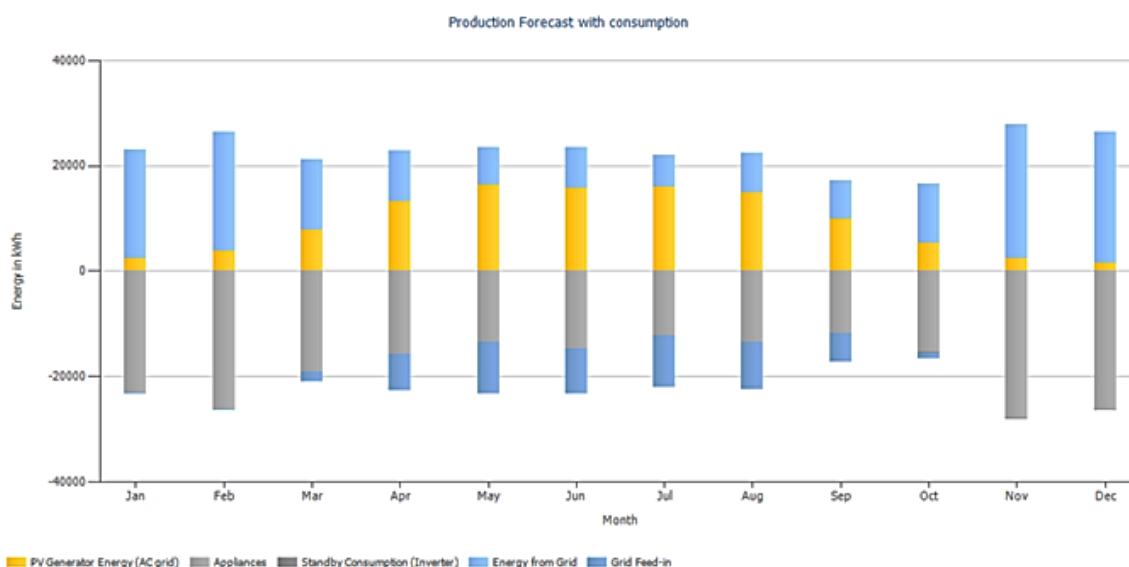


Рисунок 7 – Баланс виробництва і споживання електричної енергії та її перерозподіл з мережею

Програми RETScreen і T*SOL дозволяють проектувати та розраховувати сонячні системи для гарячого водопостачання та опалення з плоскими та вакуумними колекторами. В програмі T*SOL проводять динамічне річне моделювання системи ГВП з сонячними колекторами, розраховують температури теплоносіїв та теплоспоживання, з кроком від однієї до шести хвилин. Для порівняння результатів розрахунків в цих програмах було обрано сонячну систему ГВП з вакуумним трубчастим колектором і баком акумулятором, в якому розміщено додаткове електричне джерело теплоти. Характеристики колектору фірми Veissmann Vitosol 300-T SP3 [10] наведено в таблиці 2, а принципова схема установки – на рисунку 8. Вакуумні трубчасті колектори працюють за принципом "теплової труби" та мають тривалий термін експлуатації і функцію захисту від перегріву ThermProtect для підвищення експлуатаційної надійності. Вакуумні трубки з антивідбивного скла, високоефективна теплоізоляція з меламінової смоли в корпусі колектору та матеріали найвищої якості забезпечують високі показники потужності системи.

Таблиця 2 – Характеристики сонячного колектору

Кількість колекторів, шт.	5
Загальна площа, м ²	14,4
Площа абсорберів, м ²	10,77
Встановлена потужність, кВт	6,5
Об'єм баку акумулятора, м ³	1

Отримані результати моделювання в двох програмах мають незначну відмінність.

З розрахунків в програмі RETScreen встановлено, що розміщення сонячного колектору під оптимальним кутом нахилу в 35° при цілорічній роботі системи збільшує отриману середньорічну денну сонячну радіацію, яка надходить на поверхню СК, на 11 %, тобто з 2,9 кВт·год/(м²·день) для горизонтальної до 3,26 кВт·год/(м²·день) для похилої.

Коефіцієнт заміщення палива склав 75 %, тобто з необхідної для ГВП енергії у 8,9 МВт·год сонячною енергією заміщається 6,823 МВт·год, а електричною за рахунок вбудованого ТЕНу – 2,077 МВт·год (рис. 9).

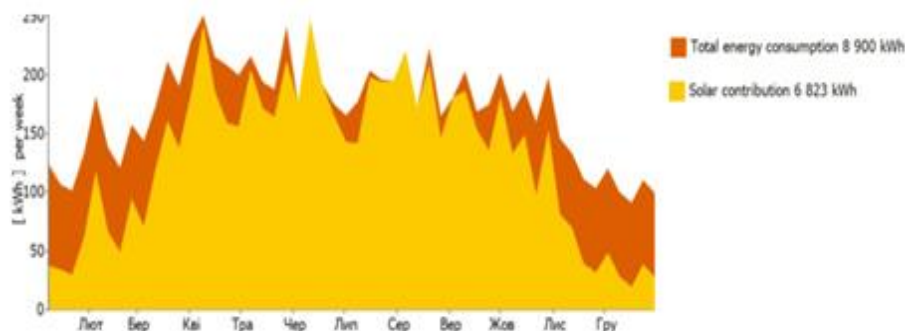


Рисунок 9 – Графік заміщення електричної енергії сонячною

При заміні електричного нагрівача на геліосистему з колектором простий строк окупності складатиме 13 років з урахуванням вартості електричної енергії 3,83 грн / кВт·год. При заміні гарячої води з системи централізованого теплопостачання (середня ціна 1 Гкал складає 2850 грн) – 16 років.

З залежності максимальної температури поверхні колекторів протягом року (рис. 10) видно, що її температура перевищує 100-150 °С, що може призвести до стагнації СК – перегріву проміжного теплоносія та зміни його фізичних властивостей. Таке підвищення температур пояснюється відсутністю споживання гарячої води в суботу та неділю, коли їдальня (основний споживач гарячої води) не працює.

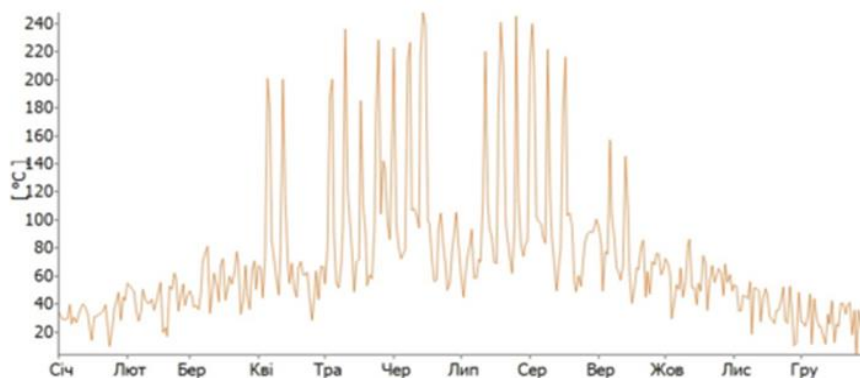


Рисунок 10 – Температури поверхні колекторів протягом року

Розрахунки показали, що встановлення геліосистем дозволяє зменшити річні викиди CO₂ на 45 т, що еквівалентно збереженню: 104,3 барелей сирої нафти або 19279 літрів високооктанового бензину, 15,5 т перероблених відходів чи 8 автомобілів, що не використовуються (табл. 3).

Забезпечення електрикою циркуляційних насосів та автоматики сонячної системи відбувається з фотоелектричної системи.

Таблиця 3 – Зменшення впливу на навколишнє середовище від встановлення сонячних систем

Назва	Одиниці виміру	СК	ФЕС
Річні викиди CO ₂ до встановлення сонячних систем	т	9,2	43,6
Річні викиди CO ₂ після встановлення сонячних систем	т	4,8	3
Сира нафта	барель	10,1	94,2
Високооктановий бензин	л	1875	17404
Перероблені відходи	т	1,5	14
Автомобілі, що не використовуються	шт.	0,8	7,4

Висновки. Встановлення активних сонячних систем гарячого водоприготування на базі високоефективних вакуумних трубчастих колекторів дозволить зменшити споживання теплової енергії на 6,823 МВт·год, а використання ФЕС – 109,16 МВт·год електричної енергії. Їх застосування зменшить шкідливі викиди CO₂ на 45 т в рік. Строк служби установок складає 25 років, а строки окупності для ФЕС становить 4,3 року, для системи ГВП 13 років при заміні електричних бойлерів або 16 років при отриманні гарячої води з теплової мережі. Отримані результати моделювання свідчать про доцільність використання геліосистем в бюджетних закладах вищої освіти.

Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Режим доступу: www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc.
2. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Національний технічний університет України «КПІ». Київ, – 2012. – 495 с.
3. Німеччина: Не встановив сонячну батарею на даху? Плати штраф! Режим доступу: <http://www.golos.com.ua/article/347740>.
4. Галузь сонячної енергетики в Україні. Режим доступу: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini/>.
5. Карти Google. Режим доступу: <http://www.google.com.ua/maps/>.
6. Clean energy project analysis. RETScreen engineering & cases Textbook. 3rd edition Режим доступу: <http://www.retscreen.net/>.
7. Програмне середовище T* SOL. Режим доступу: <https://valentin-software.com/>.
8. Програмне середовище PV*SOL. Режим доступу: <https://valentin-software.com/>.
9. Сонячна панель Trina Solar TSM-DE08M (II). Режим доступу: <https://ecoforce.com.ua/ru/photoelectrics/tsm-de08m-375w/>.
10. Сонячний колектор Vitosol 300-T SP3. Режим доступу: <https://viessmann-atlant.com.ua/geliosistemy-viessmann/viessmann-vitosol-300-t-sp3b>.

V. Dubrovska¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4765-0484

V. Shklyar¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-6879-7501

Y. Havrylenko¹, master, ORCID 0009-0006-2962-6076

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF USING SOLAR SYSTEMS BASED ON PHOTOVOLTAIC MODULES AND SOLAR COLLECTORS FOR ENERGY SUPPLY OF BUDGET FACILITIES

*This article analyzes the operation of a solar energy system installed in a higher education institution, consisting of four photovoltaic stations connected to the electrical grid for self-consumption, and a solar hot water system with collectors and a storage tank. The operation of the system was modeled using the RETScreen, T*SOL, and PV*SOL software programs, based on averaged climate data obtained from the "Zhuliany" weather station. The solar system is installed on the south-facing roof of the building and consists of 262 monocrystalline silicon photovoltaic modules of Trina Solar TSM-DE08M (II) type with a power of 370 W, installed at an angle of 30° to the horizon, and 8 Veissmann Vitosol 300-T SP3 vacuum tube collectors with a power of 1.3 kW installed at an angle of 35°. The placement of the solar elements was determined through modeling, considering their dimensions, the features of the roof structure, the placement of ventilation systems, and the shading of the roof surfaces by other elements of the building in Kyiv. As a result of energy modeling, it was determined that the amount of thermal energy obtained is 6.823 MWh/year, and the amount of electrical energy is -109.16 MWh/year, with a total inverter capacity of 95 kW, a traditional fuel replacement coefficient of 50% for the photovoltaic system and 75% for the solar system with collectors, payback periods of 4.3 years for the photovoltaic system, and 13 years for the hot water system when replacing electric boilers and 16 years when obtaining hot water from a district heating network. The reduction in harmful emissions is 45 tons/year of CO₂, which is equivalent to 104.3 barrels of crude oil or 19,279 liters of high-octane gasoline or 15.5 tons of recycled waste. Based on the analysis of the data, it is recommended to install such systems in higher education budget institutions to reduce electricity or natural gas consumption and reduce harmful emissions into the environment.*

Keywords: photovoltaic modules, solar collector, software, energy modeling, fuel substitution rate, CO₂ emissions.

References

1. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». URL: www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc.
2. Kudria S. O. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii. Pidruchnyk. Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «KPI». Kyiv, – 2012. – 495 s.
3. Nimechchyna: Ne vstanovyv soniachnu batareiu na dakhu? Platy shtraf! URL: <http://www.golos.com.ua/article/347740>
4. Haluz soniachnoi enerhetyky v Ukraini. URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini/>
5. Karty Google. URL: <http://www.google.com.ua/maps/>.
6. Clean energy project analysis. RETScreen engineering & cases Textbook. 3rd edition URL: <http://www.retscreen.net/>.
7. Prohramne seredovyshche T* SOL. URL: <https://valentin-software.com/>.
8. Prohramne seredovyshche PV*SOL. URL: <https://valentin-software.com/>
9. Soniachna panel Trina Solar TSM-DE08M (II) URL: <https://ecoforce.com.ua/ru/photoelectrics/tsm-de08m-375w/>
10. Soniachnyi kolektor Vitosol 300-T SP3 URL: <https://viessmann-atlant.com.ua/geliosistemy-viessmann-vitosol-300-t-sp3b>

Надійшла: 13.03.2023

Received: 13.03.2023