

Національний університет «Львівська політехніка»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Венгрин Ірина Іванівна**

УДК 620.97: 697.329

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**Енергоефективні геліосистеми**  
**інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ І.І. Венгрин

Науковий керівник Шаповал Степан Петрович,  
доктор технічних наук, професор

Львів – 2022

## АНОТАЦІЯ

**Венгрин І.І. Енергоефективні геліосистеми інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2022.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню систем сонячного енергопостачання для підвищення ефективності паливно-енергетичного комплексу в Україні. У вступі до дисертаційної роботи обґрунтовано та зазначено: актуальність і вибір теми; зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами; мету й завдання; предмет та об'єкт; методи та наукову новизну дослідження; практичне значення; особистий внесок автора роботи; апробацію дисертаційних матеріалів; відомості про публікації, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі, «Аналіз установок для перетворення сонячної енергії в теплову й електричну та методик розрахунку їхніх енергетичних характеристик», обґрунтовано та зазначено перспективність застосування теплових та фотоелектричних сонячних колекторів, які поєднують переваги пасивних і активних систем. Показано перспективність інтегрування елементів системи сонячного енергопостачання в конструкції світлопрозорих фасадів будівель. Проведено огляд існуючих методик розрахунку ефективності роботи конструкцій сонячних колекторів в системах електро- та теплопостачання.

В даній праці проаналізовано основні принципи роботи фотоелементів, як складових фотоелектричних сонячних колекторів з метою визначення специфіки їх функціонування для використання їх в гібридних системах енергопостачання. Охарактеризовано принцип роботи фотоелементів на базі одно-, дво- та багаторівневого *p-n* переходу. Здійснено класифікацію фотоелементів, які застосовуються в фотоелектричних сонячних колекторах. Серед них виокремлено гетероструктурні фотоелементи або в основі хімічного складу яких є кремній. Також, наведено сучасні конструкції теплових та фотоелектричних сонячних

колекторів. Окрім цього, було проаналізовано комплексні енергоефективні геліосистеми для електро- та теплопостачання з метою інтегрування елементів цих систем в конструкцію світлопрозорого фасаду будівлі. Відмічено, що найперспективнішими напрямками удосконалення систем сонячного енергопостачання (ССЕП) із гібридними сонячними колекторами є пошук інноваційних, ефективних та економічних рішень щодо інтегрування елементів ССЕП в архітектурні конструкції світлопрозорих захищень будівель.

У другому розділі, «Аналітичні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора», розроблено конструкцію теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора (ТФГСК), виконано теоретичні дослідження теплових та електричних процесів на основі комп'ютерної та математичної моделі запропонованої конструкції.

В результаті аналізу статистичних даних, отримано графічні та аналітичні залежності для розрахунку сумарної річної сонячної радіації, що надходить на вертикальні фасади будівель та споруд залежно від географічної широти та орієнтації фасаду відносно сторін світу. З метою визначення енергопродуктивності ТФГСК, аналітично отримано рівняння залежності коефіцієнта перерахунку  $i$ -ої години доби, що входить в основу теоретичного розрахунку температури довкілля для  $i$ -тої години  $j$ -місяця. В даному розділі створено та описано комп'ютерну модель ТФГСК, яка дала змогу встановити коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання для системи прозорих покриттів конструкції ТФГСК в залежності від кута надходження випромінювання. Крім цього, отримано дані усередненої поглинальної здатності ТФГСК. Побудовано спрощену математичну модель теплових процесів ТФГСК, що дали змогу отримати наукові дані, що необхідні для розрахунку енергетичних параметрів ТФГСК.

На основі здійснених теоретичних розрахунків оптичних характеристик та побудованих теплових і електричних математичних моделей процесів в ССЕП із ТФГСК відзначено необхідність проведення експериментальних досліджень з метою визначення: коефіцієнта відведення теплової енергії та теплопередачі теплових втрат, теплової та електричної ефективності ТФГСК.

У третьому розділі, «Результати експериментальних досліджень», описано відомості про експериментальну базу досліджень енергетичної ефективності конструкції ТФГСК та отримані результати експериментальних досліджень, підтверджено їхню достовірність.

З метою ефективного та раціонального проведення експериментальних досліджень, розроблено та складено таблицю, що містить найменовані матриці планування експериментальних досліджень теплової, електричної та оптичної ефективності ТФГСК від впливу різних факторів. Відповідно досліджено вплив вітрового потоку на зміну енергетичних параметрів ТФГСК. Визначено, що швидкість вітру від 2 м/с до 4,5 м/с включно, зменшує ефективність генерування теплової енергії ТФГСК без селективного покриття в середньому на 7 %, швидкість вітру більше 4,5 м/с – на 6 %. Конструкція ТФГСК з селективним покриттям за дії швидкості вітру від 2 м/с до 4,5 м/с включно, зменшує ефективність в середньому на 3,5 %, швидкість вітру більше 4,5 м/с – на 6 %. Отримані результати дають підставу стверджувати про кращу стійкість конструкції ТФГСК з селективним покриттям за малих швидкостей вітру.

В результаті експериментальних досліджень підтверджено, що усереднений тепловий коефіцієнт корисної дії запропонованої конструкції із звичайним склом досягає 16 %, а із селективним покриттям – 20 %. Показано, що тепла ефективність ТФГСК за надходження сонячного випромінювання під прямим кутом на сонцепоглинаючу поверхню має змінний характер за умов різної витрати теплоносія, наприклад, спостерігається збільшення теплової ефективності на 21 % за одночасного зменшення витрати теплоносія на 33 %.

На основі отриманих графічних та аналітичних залежностей теплової ефективності запропонованої конструкції ТФГСК від обраних факторів впливу, визначено, що наявність фотоелементів підвищує теплову ефективність конструкції без та з селективним покриттям в середньому на 4 % та 6 % відповідно.

Експериментально визначено, що генерування електричної енергії в ТФГСК є ефективнішим за розташування фотоелементів на відстані 0,2 м від тильної поверхні теплового сонячного колектора, із незначною втратою теплової енергії

порівняно, ніж на відстані 0 м та 0,4 м. Електрична ефективність конструкції на відстані 0,2 м є в 1,5 раза більшою, ніж за відстані 0 м та 0,4 м. Також, електрична ефективність на відстані 0 м більша в 1,3 раза, ніж на відстані 0,4 м.

В результаті виконаних експериментальних досліджень енергетичної ефективності ТФГСК побудовано номограму для визначення теплової ефективності в конструкції ТФГСК з селективним покриттям, що враховує: інтенсивність імітованого потоку теплової енергії, що випромінює джерело; кут між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині конструкції; витрату теплоносія в системі сонячного енергопостачання; відстань, на якій розташовується фотоелектричний сонячний колектор від площини тильної сторони теплопоглинача теплового сонячного колектора. Також, побудовано номограму для визначення електричної ефективності в конструкції ТФГСК з селективним покриттям за цих же факторів впливу.

З метою побудови методики розрахунку ССЕР із ТФГСК та на основі проведених експериментальних досліджень, визначено повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат ТФГСК, усереднене значення якого за відсутності селективного покриття становить  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , а за його наявності –  $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Проаналізовано рівень освітленості в приміщенні під час застосування ТФГСК інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі залежно від частки затінення сонцепоглинаючої поверхні ТФГСК, площею та кутом повороту фотоелектричного сонячного колектора. Кут повороту визначався між сприймаючою поверхнею фотоелектричного колектора та тильною поверхнею теплового колектора в конструкції ТФГСК. Отримані значення коефіцієнта природнього освітлення відповідають нормованим показникам для цивільних будівель.

На основі натурних досліджень енергетичної ефективності конструкції ТФГСК отримано рівняння регресії для визначення обсягу теплової енергії, що зможе отримати споживач під час використання ССЕР в основі якої є конструкція ТФГСК з селективним покриттям.

Отримані графічні та аналітичні залежності у результаті здійснених теоретичних та експериментальних досліджень теплової та електричної

ефективності ТФГСК дозволили розробити методику та алгоритм розрахунку ССЕП на основі запропонованої конструкції ТФГСК.

У четвертому розділі, «Методика розрахунку та економічна доцільність застосування конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, елементи якого інтегровані в світлопрозорий фасад будівлі», описано методику та алгоритм інженерного розрахунку геліосистем в основі яких є конструкція ТФГСК, а також проведено їхній техніко-економічний аналіз.

В результаті отриманих даних встановлених в ході теоретичних та експериментальних досліджень даної дисертаційної роботи запропоновано методику інженерного розрахунку на основі ітераційного методу, що дала можливість розрахувати погодинну температуру в баку для акумулювання теплової енергії в різний період року, теплопродуктивність конструкції ТФГСК в режимі вимушеної та природної циркуляції теплоносія та сонцесприймаючої площі ТФГСК, теплову та електричну ефективність. Зокрема, температура теплоносія в баку для акумулювання теплової енергії в ССЕП, що містить конструкцію ТФГСК із селективним покриттям в середньому на 6 % більша, ніж із звичайним склом.

Описана в даній роботі методика інженерного розрахунку для визначення параметрів системи сонячного енергопостачання комплексно враховує умови її експлуатації. Запропонований алгоритм був покладений в основу комп'ютерної програми, яка дає змогу простим способом визначити: температуру в баку для акумулювання теплової енергії, теплопродуктивність, теплову та електричну ефективність, сонцесприймаючу площу теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, техніко-економічне обґрунтування та отримати конструктивні рекомендації. Також, отримано графічну залежність вартості конструкції ТФГСК із селективним покриттям та встановленим обладнанням залежно від площі світлопрозорого фасаду будівлі.

Конструкцію ТФГСК оцінено за допомогою параметра чистих грошових надходжень, що дозволяє розрахувати абсолютну величину ефекту від реалізації світлопрозорого фасаду із ТФГСК. В цілому отримана динаміка інтегрального ефекту була позитивна, що дало можливість встановити термін окупності

запропонованої конструкції. Запропоновані геліосистеми для однородинного сімейного будинку мають термін окупності не більше 10 років, що є рекомендованим на ринку серед виробників різних марок сонячних колекторів.

У п'ятому розділі, «Практичні рекомендації та екологічне обґрунтування застосування теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання», розроблено практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження та обґрунтовано екологічну доцільність встановлення ТФГСК.

На основі проведених досліджень запропоновано конструкцію ТФГСК, що містить ролетний фотоелектричний сонячний колектор, розташований перед зовнішнім склопакетом звичайного типу та внутрішнім склопакетом енергозберігаючого типу з селективним покриттям. Також, розроблено конструкцію ТФГСК із вбудованими фотоелектричними модулями, що розташовані на ламелях, які мають можливість повороту навколо своєї осі.

Завдяки аналізу моделі однородинного сімейного будинку, в світлопрозорий фасад якого інтегровано конструкцію ТФГСК здійснено комплексне варіювання розташування фотоелементів в конструкції ТФГСК, та встановлено, що максимальна ефективність роботи ССЕР для запропонованого типу будівлі становить 30 %. Також, для цієї будівлі враховано розташування фотоелементів на вертикальних та горизонтальних ролетах в якості сонцезахисного пристрою із можливістю повороту навколо своєї осі, проценту затінення приміщення.

В результаті виконаних досліджень в дисертаційній роботі науково обґрунтовано та вдосконалено енергоефективні геліосистеми на основі ТФГСК, які інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель.

*Ключові слова: тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор, система сонячного енергопостачання, геліосистема, температура теплоносія, теплопродуктивність, поглинальна здатність, коефіцієнт відведення теплової енергії, повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат, електрична ефективність, тепла ефективність.*

## ABSTRACT

***Venhryn Iryna. Energy efficient solar systems integrated into translucent building facades. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.***

The dissertation for a Degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) for a specialty 192 – Construction and Civil Engineering (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2022.

The dissertation is devoted to the improvement of solar energy supply systems to increase the efficiency of the fuel and energy complex in Ukraine. In the introduction to the dissertation the following are substantiated and noted: relevance and choice of the topic; connection of work with scientific programs, plans and topics; purpose and objectives; subject and object; methods and scientific novelty of research; practical meaning; personal contribution of the author of the work; approbation of dissertation materials; information on publications, structure and scope of the dissertation.

The Part 1, «Analysis of installations for the conversion of solar energy into heat and electricity and methods for calculating their energy characteristics», substantiates and notes the prospects for the use of thermal and photovoltaic solar collectors that combine the advantages of passive and active systems. The prospects of integrating the elements of the solar energy supply system (SESS) in the construction of translucent facades of buildings are shown. A review of existing methods for calculating the efficiency of solar collectors (SC) in electric and heat supply systems.

This paper analyzes the basic principles of operation of photovoltaic cells as elements of photovoltaic solar collectors (PSC) in order to determine the specifics of their operation for use in hybrid energy supply systems. The paper describes the principle of photocells operation based on one-, two- and multilevel  $p-n$  junction. The classification of photocells used in PSC is carried out. Among them are heterostructural photovoltaic cells or based on the chemical composition of silicon. Also, modern designs of thermal and photovoltaic solar collectors were presented. In addition, complex energy-efficient solar systems for electricity and heat supply were analyzed in order to integrate the elements of these systems into the structure of the translucent facade of the building. It is noted that the most promising areas of improvement of SESS with hybrid SC are the



search for innovative, efficient and cost-effective solutions for integrating SESS elements into architectural structures of translucent building protections.

In the Part 2, «Analytical studies of thermal and photovoltaic hybrid solar collector», developed the design of thermal and photovoltaic hybrid solar collector (TPHSC), performed theoretical studies of thermal and electrical processes based on computer and mathematical model of the proposed design.

As a result of the analysis of statistical data, graphical and analytical dependences for the calculation of the total annual solar radiation received on the vertical facades of buildings and structures depending on the latitude and orientation of the facade relative to the world. In order to determine the energy productivity of TPHSC, the equation of dependence of the conversion factor of the  $i$ -th hour of the day, which is the basis of the theoretical calculation of ambient temperature for the  $i$ -th hour of the  $j$ -month. This part creates and describes a computer model of TPHSC, which allowed to determine the transmittance of unpolarized radiation for the system of transparent coatings of TPHSC design depending on the angle of radiation. In addition, there were obtained data on the average absorption property of TPHSC. A simplified mathematical model of thermal processes of TPHSC is constructed, which allowed to obtain scientific data necessary for calculation of energy parameters of TPHSC.

Based on the theoretical calculations of optical characteristics and described thermal and electrical mathematical models of processes in SESS with the TPHSC noted the need for experimental research to determine: the heat dissipation coefficient and heat loss, thermal and electrical efficiency of the TPHSC.

The Part 3, «Results of experimental research», describes the information on the experimental base of research on energy efficiency of the TPHSC and obtained the results of experimental research, confirmed their reliability.

The table containing the named matrices of planning of experimental researches of thermal, electric and optical efficiency of the TPHSC from influence of various factors for the purpose of effective and rational carrying out of experimental researches was developed and made. Accordingly, the influence of wind flow on the change of energy parameters of the TPHSC is investigated. It is determined that the wind speed from 2 m/s to 4.5 m/s inclusive, reduces the efficiency of heat generation of the TPHSC without

selective coating by an average of 7%, wind speed more than 4.5 m/s – by 6%. The design TPHSC with selective coating under the action of wind speed from 2 m/s to 4.5 m/s inclusive, reduces the efficiency by an average of 3.5 %, wind speed more than 4.5 m/s – by 6 %. The obtained results give grounds to claim the best stability of the TPHSC structure with selective coating at low wind speeds.

As a result of experimental researches, it is confirmed that the average thermal efficiency of the offered design with usual glass reaches 16 %, and with a selective covering – 20 %. It is shown that the thermal efficiency of TPHSC at the receipt of solar radiation at right angles to the sun-absorbing surface is variable under conditions of different heat consumption of the carrier, for example, there is an increase in thermal efficiency by 21 % while reducing the heat consumption of the carrier by 33 %.

Based on the obtained graphic and analytical dependences of the thermal efficiency of the proposed TPHSC design on the selected factors, it was determined that the presence of photocells increases the thermal efficiency of the structure without and with selective coating by an average of 4 % and 6 % respectively.

Moreover, it is experimentally determined that the generation of electricity of the TPHSC is more efficient than the location of photovoltaic cells at a distance of 0,2 m from the rear surface of the thermal solar collector (TSC), with little heat loss compared to 0 m and 0,4 m. The electrical efficiency of the TPHSC at a distance of 0,2 m is 1,5 times greater than at a distance of 0 m and 0,4 m. Also, the electrical efficiency at a distance of 0 m is 1,3 times greater than at a distance of 0,4 m.

As a result of the performed experimental studies of the energy efficiency of TPHSC, a nomogram was constructed to determine the thermal efficiency in the design of TPHSC with a selective coating, which takes into account: the intensity of the simulated flow of thermal energy; the angle between the receiving surface and the projection of the direction of heat flow in the vertical plane of the structure; the heat consumption of the carrier in the solar energy supply system; the distance at which the PSC is located from the plane of the rear side of the TSC absorber. Also, a nomogram was constructed to determine the electrical efficiency of the TPHSC with selective coating under the same factors.

In order to improve the method for calculating SESS with the TPHSC and on the basis of experimental studies, determined the total heat transfer coefficient of heat loss of

the TPHSC, the average value of which in the absence of selective coating is  $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , and in its presence  $-7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

The level of illumination in the room during the application of the TPHSC integrated into the translucent facade of the building depending on the share of shading of the absorbing surface of the TPHSC, the area and angle of rotation of the PSC. The angle of rotation was determined between the receiving surface of the PSC and the rear surface of the TSC in the design of the TPHSC. The obtained values of the coefficient of natural light correspond to the standardized indicators for civil buildings.

Based on field studies of the energy efficiency of the TPHSC, a regression equation is obtained to determine the amount of thermal energy that the consumer will be able to obtain when using SESS that contains the TPHSC with selective coating.

The obtained graphical and analytical dependences as a result of theoretical and experimental studies of thermal and electrical efficiency allowed to develop a method and algorithm for calculating SESS based on the proposed design of the TPHSC.

The Part 4, «Methodology of calculation and economic feasibility of using the design of thermal and photovoltaic hybrid solar collector, the elements of which are integrated into the translucent facade of the building», describes the methodology and algorithm of engineering calculation of solar systems.

As a result of the data obtained during the theoretical and experimental studies of this dissertation, the method of engineering calculation based on the iterative method is proposed, which allowed to calculate the hourly temperature in the tank for heat storage carrier and sun-receiving area of the TPHSC, thermal and electrical efficiency. In particular, the temperature of the heat carrier in the tank for the accumulation of thermal energy in the SESS, which contains the design of the TPHSC with selective coating on average 6 % higher than with ordinary glass.

The method of engineering calculation described in this paper to determine the parameters of the SESS comprehensively takes into account the conditions of its operation. The proposed algorithm was the basis of a computer program that allows a simple way to determine: the temperature in the tank for thermal energy storage, heat productivity, thermal and electrical efficiency, solar-sensitive area of TPHSC, feasibility study and design. Also, a graphical dependence of the cost of construction of TPHSC

with selective coating and installed equipment depending on the area of the translucent facade of the building was obtained.

The design of TPHSC is estimated by means of a parameter of net cash receipts that allows to calculate absolute size of effect from realization of a translucent facade that contains TPHSC. In general, the dynamics of the integrated effect was positive, which made it possible to establish the payback period. The proposed solar systems for a single-family house have a payback period of no more than 10 years, which is recommended on the market among manufacturers of various brands of solar collectors.

The Part 5, «Practical recommendations and environmental justification for the use of thermal and photovoltaic hybrid solar collectors in the solar energy system", developed practical recommendations for the use of research results and justified the environmental feasibility of establishing the TPHSC.

Furthermore, on the basis of the conducted researches the design of TPHSC containing roletny PSC located in front of an external double-glazed window of usual type and an internal double-glazed window of energy saving type with a selective covering is offered. Also, the design of TPHSC with the built-in photovoltaic modules located on lamellas which have a possibility of rotation around the axis is developed.

Due to the analysis of the model of a single-family family house, a complex variation of the location of photocells in the construction of TPHSC was performed in the translucent integrated structure of TPHSC, and it was found that the maximum efficiency of SESS for integrated building type is 30 %. Also, for this building is taken into account the location of photovoltaic cells on vertical and horizontal blinds as a sun protection device with the ability to rotate around its axis, the percentage of shading of the room.

As a result of the performed researches in the dissertation work the energy-efficient solar systems based on the TPHSC, which are integrated in the translucent construction of buildings, are scientifically substantiated and improved.

*Key words: thermal and photoelectric hybrid solar collector, solar energy supply system, solar system, carrier heat temperature, heat productivity, absorption property, heat dissipation coefficient, total heat transfer coefficient of heat losses, electrical efficiency, thermal efficiency.*

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

#### I. Список публікацій в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Sharoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, Kh., Krygul, R. (2019). Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy efficient house. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/8(98), 38-45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160882>  
(НМБД Scopus, фахове видання України в галузі технічні науки)
2. Sharoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K. (2020). Simulation of thermal processes in the solar collector which is combined with external fence of an energy efficient house. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, 510-517. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_65)  
(НМБД Scopus, ISSN: 2366-2557 (Швейцарія))
3. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Sharoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84-87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>  
(НМБД Scopus, ISSN: 2353-5156 (Польща))
4. Sharoval, S., Venhryn, I., Kozak, K., Klymenko, H. (2021). Clarification of thermal characteristics of the solar collector integrated into transparent facade. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 100, 402-408. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_49)  
(НМБД Scopus, ISSN: 2366-2557 (Швейцарія))
5. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Перспективи використання сонячної енергії на території України. *Молодий вчений*, 7(10), 21-24.  
(НМБД Index Copernicus)
6. Sharoval, S., Zhelykh, V., Gulai, B., Venhryn, I., Shepitchak, V. (2018). Energy efficiency of heating systems using solar windows. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 7, 65-70. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2018.2.08>  
(ISSN: 2299-8535 (Польща))

7. Zhelykh, V., Kapalo, P., Shapoval, S., Vengryn, I., Kozak, K. (2019). Experimental determination of the efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Journal of Civil Engineering*, 14(2), 31-38. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0015>  
(ISSN: 1336-9024 (Словаччина))
8. Возняк, О. Т., Шаповал, С. П., Пона, О. М., Венгрин, И. И. (2014). Влияние направления и скорости воздушного потока на работу солнечного коллектора без прозрачного покрытия. *Строительство и техногенная безопасность*, 50, 49-52.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
9. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Аспекти використання традиційних та нетрадиційних джерел енергії на території України. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 2, 155-160.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
10. Voznyak, O., Shapoval, S., Pona, O., Vengryn, I. Combined solar collector (2014). *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 781, 212-215.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
11. Желих, В. М., Омельчук, О. В., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 823, 117-121.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
12. Ulewicz, M., Zhelyh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 844, 352-355.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)

13. Желих, В. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Касинець, М. Є., Козак, Х. Р., Пашкевич, В. З. (2018). Системи сонячного теплопостачання інтегровані в світлопрозорі фасади будівель. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 26, 62-68.  
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26.62-68>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
14. Венгрин, І., Шаповал, С. (2019). Інтенсивність сонячної радіації у місті Львові. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, 12, 77-84.  
<https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.12.77-84>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
15. Венгрин, І. (2019). Дослідження сонячних колекторів, інтегрованих в конструкцію скляного фасаду будівлі/споруди: необхідність та особливості. *Theory and Building Practice*, 1(1), 38-46.  
<https://doi.org/10.23939/jtbp2019.01.038>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
16. Venhryn, I., Shapoval, S., Furdas, Y., Kasynets, M., Piznak, B. (2020). Thermal efficiency analysis of solar heat supply unit combined with glass facade of building. *Energy engineering and control systems*, 6(1), 1-6.  
<https://doi.org/10.23939/jeecs2020.01.001>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
17. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Myroniuk, K., Gensetskyi, M. (2020). Examination of the thermal efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Theory and Building Practice*, 2(1), 30-37.  
<https://doi.org/10.23939/jtbp2020.01.030>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
18. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Патент України 98778. Київ: Державне патентне відомство України.
19. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Возняк, О. Т., Касинець, М. Є., Фурдас, Ю. В. (2020). Патент України 143415. Київ: Державне патентне відомство України.

20. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Юркевич, Ю. С., Венгрин, І. І., Козак, Х. Р. (2020). Патент України 143997. Київ: Державне патентне відомство України.

II. Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

21. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал променевої енергії в Україні та її використання для низькотемпературних сонячних колекторів*, 3-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». Львів.
22. Венгрин, І. І. (2014). *Перспективи використання систем сонячного теплопостачання на території України*, 72-а студентська науково-технічна конференція. Львів.
23. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Сонячний потенціал в Україні*, Міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів «Інновації в будівництві». Луцьк.
24. Пона, О. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Підвищення енергоефективності покриття будівель*, Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва». Полтава.
25. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал вітрової енергії на території України*, Матеріали XI міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасність. Наука. Час. Взаємодія та взаємовплив». Київ.
26. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). *Вплив термічного опору зовнішнього захищення на кількість тепла від сонячної радіації, що надходить в приміщення*, Збірник наукових праць 8-ої МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.
27. Венгрин, І. І. (2015). *Ефективність використання комбінованих систем сонячного теплопостачання для будівель на території України*, 73-тя студентська науково-технічна конференція: збірник тез доповідей. Львів.



28. Ulewicz, M., Zhelykh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). *Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation*, Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «ЕкоКомфорт». Львів: НУ «Львівська політехніка».
29. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Венгрин, І. І. (2017). *Застосування геліовікна для сонячного теплопостачання*, 9-та МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.
30. Venhryn, I., Zhelykh, V., Shapoval, S. (2020). *Thermal efficiency of the solar collector integrated into translucent facade*, VI Międzynarodowa Konferencja «Innowacyjne pomysły młodych naukowców. Przemysł: Nauka-Startup».
31. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Желих, В. М., Шепітчак, В. Б. (2020). *Дослідження енергетичних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектору*, Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія». Київ.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ Й ЕЛЕКТРИЧНУ ТА МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ЇХНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	35
1.1 Системи сонячного електро- та теплопостачання.....	35
1.2 Аналіз конструкцій фотоелектричних та теплових сонячних колекторів.....	41
1.3 Гібридні сонячні колектори.....	47
1.4 Інтегрування елементів системи сонячного теплопостачання в конструкцію світлопрозорого фасаду будівлі.....	50
1.4.1 Аналіз основних світлопрозорих матеріалів, що використовують для конструкції фасаду будівлі.....	50
1.4.2 Типи світлопрозорих фасадів будівлі та вимоги до їх схемних рішень.....	54
1.5 Світлопрозорі фасади будівлі, що використовують для системи сонячного енергопостачання.....	55
1.6 Основні методики розрахунку енергетичних характеристик сонячних колекторів в системі сонячного енергопостачання.....	57
1.6.1 Методики для розрахунку параметрів теплових сонячних колекторів в системі сонячного енергопостачання.....	57
1.6.2 Методики для розрахунку параметрів фотоелектричного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання.....	60
Висновки до Розділу 1.....	64

РОЗДІЛ 2.	АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА.....	66
2.1	Розроблення конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора (ТФГСК).....	66
2.2	Визначення оптичних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора...	68
2.3.	Створення спрощеної математичної моделі процесів теплообміну в тепловому та фотоелектричному гібридному сонячному колекторі.....	82
2.4	Визначення коефіцієнта відведення теплової енергії для теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	85
2.5	Визначення електричних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	88
Висновки до Розділу 2.....		92
РОЗДІЛ 3.	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	94
3.1	Експериментальні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора суміщеного із світлопрозорим фасадом будівлі.....	94
3.1.1	Опис експериментального стенда для досліджень теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	94
3.1.2	Опис факторів, що впливають на конструкцію теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	96

3.2.	Лабораторні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора без селективного покриття (I етап досліджень).....	100
3.2.1	Визначення теплової ефективності ТФГСК без селективного покриття, без ФСК в його конструкції залежно від впливу інтенсивності випромінювання та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напряму випромінювання у вертикальній площині ТФГСК.....	100
3.2.2	Визначення теплової ефективності конструкції ТФГСК без селективного покриття залежно від швидкості вітру та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напряму вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК.....	105
3.2.3	Визначення енергетичної ефективності ТФГСК без селективного покриття залежно від впливу інтенсивності випромінювання та відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК.....	108
3.3	Лабораторні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі із селективним покриттям (II етап досліджень) .....	115
3.3.1	Визначення теплової ефективності ТФГСК із селективним покриттям, без наявності ФСК в його конструкції залежно від впливу інтенсивності випромінювання та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напряму теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК.....	115

3.3.2	Визначення теплової ефективності ТФГСК з селективним покриттям залежно від впливу швидкості вітру та кута між сприймаючою поверхнею і проекцією напряму вітрового потоку у його вертикальній площині.....	121
3.3.3	Визначення енергетичної ефективності ТФГСК з селективним покриттям і наявністю ФСК в його конструкції залежно від обраних факторів.....	124
3.4	Визначення впливу освітленості в приміщенні під час застосування конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	133
3.5	Натурні дослідження конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора....	137
	Висновки до Розділу 3.....	145
<b>РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА, ЕЛЕМЕНТИ ЯКОГО ІНТЕГРОВАНІ В СВІТЛОПРОЗОРИЙ ФАСАД БУДІВЛІ.....</b>		
4.1	Методика розрахунку системи сонячного енергопостачання, суміщеної із світлопрозорою конструкцією будівлі.....	147
4.2	Обґрунтування концепції застосування геліосистеми, в основі якої є конструкція ТФГСК в енергетичному менеджменті для споживача.....	159
4.3	Економічна ефективність конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання.....	167
	Висновки до Розділу 4.....	171

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛООВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА В СИСТЕМІ СОНЯЧНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ.....	173
5.1 Практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора....	173
5.2 Принцип роботи комбінованої енергоефективної системи енергопостачання в основі якої є конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.....	183
5.3 Визначення величини викидів в атмосферу за використання органічного палива на противагу генерованої енергії від конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора....	188
Висновки до Розділу 5.....	191
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	196
ДОДАТКИ.....	217

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АБ –	акумуляторна батарея
БА –	бак для акумулювання теплової енергії
ВАХ –	вольт-амперна характеристика
ВЦТ –	вимушена циркуляція теплоносія
ЕЕ –	електрична ефективність
ЗКБ –	зовнішня конструкція будівлі
ІТП –	індивідуальний тепловий пункт
КЗ –	коротке замикання
ККД –	коефіцієнт корисної дії
КПО –	коефіцієнт природної освітленості
ПЦТ –	природня циркуляція теплоносія
СВ –	сонячне випромінювання
СГВП –	система гарячого водопостачання
СЕ –	сонячна енергія
СЗП –	сонцезахисний пристрій
СК –	сонячний колектор
СО –	система опалення
СП –	склопакет
СПП	сонцепоглинаюча поверхня (абсорбер)
ССЕ –	система сонячного електропостачання
ССЕП –	система сонячного енергопостачання (геліосистема)
ССП –	сонцесприймаюча поверхня (загальна поверхня)
ССТ –	система сонячного теплопостачання
СФБ –	світлопрозорий фасад будівлі
СХП –	система холодопостачання
ТД –	температура довкілля
ТЕ –	теплова ефективність
ТЕО –	техніко-економічне обґрунтування

ТО –	теплообмінник
ТСК –	тепловий сонячний колектор
ТТ –	температура теплоносія
ТФГСК –	тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор
ФЕ –	фотоелемент (сонячний елемент)
ФСК –	фотоелектричний сонячний колектор
ХХ –	холостий хід
NPV –	чиста теперішня вартість

### Перелік основних величин та їх одиниць вимірювання

Назва величини та її позначення		Одиниця вимірювання
$F$	– сонцесприймаюча поверхня	м <sup>2</sup>
$F_R$	– коефіцієнт відведення теплової енергії	-
$F_R^{cp}$	– коефіцієнт відведення теплової енергії (за Європейською практикою)	-
$\overline{\tau \cdot \alpha}$	– усереднена приведена поглинальна здатність	-
$\tau$	– коефіцієнт пропускання СВ	-
	– час	с; хв
$\alpha$	– коефіцієнт поглинання СВ	-
$\dot{j}$	– інтегральний потік (густина потоку) теплової енергії	кДж/м <sup>2</sup>
$J$	– потік теплової енергії	кДж
$t$	– температура	°С
$\Delta t$	– кількість секунд в місяць	с
$\eta_o$	– ефективність (ККД)	-
$U$	– коефіцієнт теплопередачі теплових втрат	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
$U$	– напруга	В
$I$	– інтенсивність випромінювання	Вт/м <sup>2</sup>



$I$	– фотострум	А
$m$	– приведена масова витрата	кг/(м <sup>2</sup> ·с)
$c_p$	– питома теплоємність теплоносія за сталого тиску	Дж/(кг·°С)
$E_g$	– енергія поглинутих фотонів	Дж
$f$	– коефіцієнт заміщення	-
$V$	– обсяг (об'єм)	л, м <sup>3</sup>
$\nu$	– приведений об'єм	л/м <sup>2</sup> ; м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>
$\nu$	– швидкість руху теплоносія	м/с
$\varphi$	– географічна широта	град
$\varepsilon$	– ступінь селективності поверхні в діапазоні робочих температур теплоносія	-
$a$	– альbedo поверхні	-
$\kappa$	– константа пропорційності (коефіцієнт екстинкції або коефіцієнт поглинання енергії)	м <sup>-1</sup>
$\delta$	– товщина	мм
$\theta_1$	– кут надходження променя	°
$\theta_2$	– кут переломлення променя	°
$A$	– середньодобова амплітуда коливань температури	°С
$D$	– коефіцієнт природної освітленості	%
$G$	– витрата теплоносія	кг/с
$G$	– критерій Кохрена	-
$g$	– приведена продуктивність теплоносія	кг/м <sup>2</sup>
$q$	– приведена кількість теплоти (теплопродуктивність)	Вт/м <sup>2</sup>
$k$	– показник емісії забруднюючих речовин	г/ГДж
$Q$	– теплова потужність	Вт
$r$	– відбивна здатність покриття	-
$S$	– середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого СВ з горизонтальної поверхні на похилу	-

$W$	– енергія годинного надходження СВ на одиницю площі ФСК	(Вт·год)/м <sup>2</sup>
$x$	– відстань	м
$x; y$	– безрозмірні комплекси	-
$\beta$	– кут нахилу (світлопрозорі конструкції) скляного фасаду	°
$\nu_0$	– мінімальна частота	Гц
$\rho$	– коефіцієнт відбивання	-
$B$	– витрата палива	кг/год
$C$	– вартість	\$
$E$	– погодинна кількість генерованої електричної енергії	Вт·год
$E$	– освітленість	лк
$K$	– відношення усередненої температури на вході та виході теплоносія і ТТ до величини інтенсивності СВ	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт
$P$	– електрична потужність	Вт
$P$	– тиск	Па
$\Phi$	– світловий потік	лм
$X$	– відношення перепаду температур між сонцепоглинаючою поверхнею СК і ТД до величини інтенсивності СВ	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт

## Індекси

|| – паралельний,  $\perp$  – перпендикулярний, n – нормаль, аз – азимут, ак – акумуляційний, баз – базова, в – випромінювання, верт – вертикальний, вих – вихідний, втр – втрати, вх – вхідний, г – гарячий, гор – горизонтальний, д – довкілля, дн – денний, Зх – захід, звор – зворотній, зг – згоряння, зовн – зовнішній, конв – конвективний, л – лінійний, м – місцевий, макс – максимальний, мін – мінімальний, міс – місячний, нав – навантаження, н – нижчий, о – оптичний, обл – обладнання, П – прямий, пад – падаючий, Пд – південь, пл – плоский, Пн – північ, под – подаючий, пов – повний, погл – поглинутий, похил – похилий, пт – повітряний теплообмін, р – рівноважний/розрахунковий, Р – розсіяний, табл – табличний, спожив – споживання, Сх – схід, х – холодний.

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Відповідно до Паризької угоди 2015 року, держави-учасниці всесвітнього саміту з питань клімату зобов'язані зменшити викиди CO<sub>2</sub>. Виконання умов цієї угоди стосується і України, що сприяє інтенсивному розвитку заходів енергозбереження. Рішенням Європейського Союзу прийнято посилення розвитку відновлюваних джерел енергії. Зважаючи на актуальність питання, зменшення витрат коштів на енергоресурси і ліквідацію негативних екологічних наслідків за використання традиційних джерел енергії, Європейський Союз ініціював збільшення частки розвитку відновлюваних джерел енергії, прийнявши низку рішень, що є обов'язковими до виконання. Такий напрямок розвитку забезпечить зменшення енергетичної залежності економіки України від постачання викопних паливних ресурсів з-за кордону. Для вирішення проблематики енергозбереження в Україні, згідно із нормативно-правовими актами, раціональним рішенням є впровадження удосконалених альтернативних установок, що використовують та перетворюють енергію відновлюваних джерел, зокрема енергії Сонця, яка володіє значним потенціалом на території України.

Сучасні тенденції в галузі енергетики та зміни нормативно-правової бази в галузі архітектури та будівництва зумовлюють появу нових завдань щодо підвищення ефективності використання сонячної енергії для потреб енергопостачання будівель, до прикладу, розміщення сонцесприймальних пристроїв на/в світлопрозорих фасадах будівель тощо. У зв'язку з високою щільністю забудови, складною геологічною структурою поверхні землі та сучасними тенденціями в галузі архітектури, які враховують потреби в природному освітленні, будівлі споруджують з перевищеним коефіцієнтом скління. Таке рішення вимагає практичного підходу в розробленні сонцезахисних пристроїв для комфортного перебування людини в приміщенні та інтегрування цих елементів в геліосистеми.

Актуальним напрямком вдосконалення систем сонячного енергопостачання з активним (наявність сонячних колекторів) чи пасивним (конструктивними елементами будинку) перетворенням сонячної енергії в теплову чи електричну є

суміщення сонцепоглиналих поверхонь теплових та фотоелектричних сонячних колекторів із зовнішньою конструкцією будівлі.

Зважаючи на вище написане, ефективним способом додаткового сонцезахисту може бути використання інтегрованих у фасади будівель систем енергопостачання для перетворення надмірних потоків сонячної радіації у теплову та електричну енергію. Як наслідок, вдосконалення геліосистем інтегрованих в світлопрозорі конструкції будівель та споруд є актуальним об'єктом для дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Дисертаційне дослідження виконано на кафедрі «Теплогазопостачання і вентиляція» Національного університету «Львівська політехніка» відповідно до плану госпдогвірної та грантової науково-дослідної роботи за темами: «Розроблення енергоощадних заходів АЗС с. Солонка» (№ держреєстрації 0115U000448, 11.2014-07.2015 рр.); «Комбіновані системи сонячного теплопостачання для енергоефективних будинків» (№ держреєстрації 0116U008628, 09.2016-12.2016 р.); «Розрахунок ефективності та окупності системи сонячного теплопостачання, елементи якої інтегровані в архітектурні конструкції будівлі» (№ 345, 04.2020).

**Мета дисертаційного дослідження.** Наукове обґрунтування та вдосконалення енергоефективних геліосистем в основі яких є теплові та фотоелектричні гібридні сонячні колектори, які інтегровані в світлопрозорі конструкції будівлі.

### **Завдання дисертаційного дослідження:**

– здійснити критичний аналіз теоретичних положень щодо існуючих систем сонячного енергопостачання (геліосистем), які інтегровані в світлопрозорі конструкції (світлопрозорі фасади) будівель та споруд;

– розробити конструкцію теплового та фотоелектричного сонячного колектора, інтегрованого в світлопрозоре зовнішнє захищення будівлі та дослідити її тепло- та електротехнічні процеси із застосуванням методів наукового моделювання;

– виконати експериментальні дослідження для визначення теплотехнічних та електричних параметрів теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання (геліосистемі);

– розробити методику та алгоритм розрахунку системи сонячного енергопостачання із тепловим та фотоелектричним гібридним сонячним колектором в основі яких є теоретичні та експериментальні дослідження;

– обґрунтувати результативність роботи конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання за її техніко-економічними показниками та надати практичні рекомендації щодо її застосування.

**Об’єкт дослідження.** Тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор, що інтегрований в частину світлопрозорого фасаду будівлі в системі сонячного енергопостачання.

**Предмет дослідження.** Теплотехнічні характеристики теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі в системі сонячного енергопостачання.

**Методи дослідження.** В дисертаційному дослідженні було використано сучасні розрахункові методи визначення тепло- та електротехнічних параметрів теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, наукове моделювання роботи системи сонячного енергопостачання із конструкцією теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, економічні та статистичні методи оцінки доцільності розробленої конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.

**Наукова новизна результатів дослідження:**

– вперше отримано оптичні характеристики розробленої конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора на основі комп’ютерної моделі, що дало змогу науково обґрунтувати тепло- та електротехнічні процеси, що проходять в системі сонячного енергопостачання в основі яких є запропонована конструкція;

– встановлено функціональні та графічні залежності для визначення теплотехнічних та електричних параметрів конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що є в основі розробленої методики розрахунку запропонованої конструкції в системі сонячного енергопостачання;

– визначено залежності впливу вітрового потоку на енергетичні параметри конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що дало змогу уточнити розроблену методику розрахунку запропонованої конструкції в системі сонячного енергопостачання;

– встановлено взаємозв'язок між повним коефіцієнтом теплопередачі теплових втрат конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі та температурою нагрівання теплоносія в баку для акумулювання теплової енергії;

– науково обґрунтовано можливість інтегрування енергоефективної геліосистеми в основі якої є конструкція теплового та фотоелектричного сонячного колектора в світлопрозорий фасад будівлі.

**Практичне значення дисертаційного дослідження.** Проведені в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження доповнюють сучасні інженерні рішення щодо вдосконалення енергоефективних геліосистем в основі яких є застосування конструкцій теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів, інтегрованих в світлопрозорий фасад будівлі.

Встановлено, що розроблена конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора може бути використана для енергопостачання будівель та споруд, а загальна максимальна енергетична ефективність системи сонячного енергопостачання в основі якої є запропонована конструкція досягає 30 %. Окрім цього, такі теплові та фотоелектричні гібридні сонячні колектори можуть бути використані для сонцезахисту споруд із збільшеним коефіцієнтом скління. Схемні рішення варіантів інтегрування теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора дозволяють економити корисну площу будівлі чи поверхні землі, необхідну для встановлення звичайних

конструкції сонячних колекторів. Використання в конструкції колектора скла із селективним напиленням дозволило генерувати електричну енергію без перегрівання фотоелементів.

Розроблено методику інженерного розрахунку теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що інтегрований в частину світлопрозорого фасаду для якісного енергопостачання енергоефективних будівель.

Матеріали дисертаційної роботи можуть бути використані для викладання спецкурсів «Нетрадиційні джерела енергії», «Теплопостачання», «Наукові дослідження в будівництві», «Економія паливно-енергетичних ресурсів в системах теплогазопостачання та вентиляції» кафедри «Теплогазопостачання і вентиляція» Національного університету «Львівська політехніка», а також можуть бути використані для лабораторних занять, які проводяться на кафедрах теплогазопостачання та вентиляції, освітлення, промислового та цивільного будівництва з метою впровадження тенденції економії паливно-енергетичних ресурсів в Україні. Матеріали завершених наукових досліджень впроваджено компаніями ТОВ «Техноклас» та ТОВ «Оазис Комфорт».

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційного дослідження отримано здобувачем особисто або за безпосередньої участі, що було відмічено у спільних наукових публікаціях. Дисертаційна робота в сфері енергоефективних геліосистем, інтегрованих в світлопрозорі конструкції будівель є завершеною науковою працею виконаною автором відповідно до програми спланованих, проведених і узагальнених досліджень. Дисертантом проведено пошук та аналіз вітчизняної та закордонної літератури, розроблено та розраховано наукову модель теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі, виконано експериментальні дослідження, обґрунтовано концепцію застосування геліосистеми та запропоновано практичні схемні рішення в основі яких є теплові та фотоелектричні гібридні сонячні колектори.



**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Основні положення дисертації були представлені на міжнародних та вітчизняних конференціях, зокрема на: міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення» (Рівне, 2015); міжнародній науково-технічній конференції «ЕкоКомфорт» (Львів, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві «Енергоінтеграція 2017» (Київ, 2017); XVI міжнародній науковій конференції «Current Issues of Civil and Environmental Engineering in Rzeszów-Lviv-Košice Faculties» (Кошице, 2017); науково-практичній конференції «Будівельна та муніципальна теплотехніка» (Київ, 2018); XVII міжнародній науковій конференції «Current Issues of Civil and Environmental Engineering in Lviv-Košice-Rzeszów» (Львів, 2019); міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві «Енергоінтеграція-2019» (Київ, 2019); II міжнародній науковій конференції «Ecosomfort and current issues of civil engineering» (Львів, 2020); VI міжнародній конференції «Innowacyjne pomysły młodych naukowców: Nauka–Startup–Przemysł» (Перемишль, 2020); міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» (багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях)» (Київ, 2020); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» (Київ, 2020); XVI міжнародній науковій та технічній конференції «Computer science and information technologies» (Львів, 2021); XVIII міжнародній науково-технічній конференції «Materials and energy saving technologies. Constructions of optimized energy potential» (Ченстохова, 2021), а також на наукових семінарах кафедри «Теплогазопостачання та вентиляція» Національного університету «Львівська політехніка» та звітних наукових конференціях Інституту будівництва та інженерних систем Національного університету «Львівська політехніка» (2018-2022 рр.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 31 наукова праця (Додаток В), зокрема: 4 статті, що включені до наукометричної бази даних Scopus; 1 стаття, що включена до наукометричної бази даних Index Copernicus; 5 статей опублікованих в науковому періодичному виданні іншої держави; 11 статей опублікованих у науковому фаховому виданні України; 11 тез доповідей на вітчизняних та міжнародних наукових з'їздах, конференціях та конгресах; отримано 3 патенти на корисну модель України.

**Обсяг та структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 227 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 159 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 14 таблицями та 110 рисунками. Список використаних джерел містить 190 найменувань, з них 122 кирилицею та 68 латиницею.

## **РОЗДІЛ 1**

### **АНАЛІЗ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ Й ЕЛЕКТРИЧНУ ТА МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ЇХНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

У розділі 1 проаналізовано перспективність застосування гібридних сонячних колекторів на основі перетворення сонячної енергії в теплову та електричну. Показана можливість інтегрування елементів системи сонячного теплопостачання в конструкції світлопрозорих фасадів будівель на основі аналізу основних світлопрозорих матеріалів, що використовують для конструкції фасаду будівлі та типів світлопрозорих фасадів будівель. Проведено огляд існуючих методик розрахунку параметрів теплових та фотоелектричних сонячних колекторів в системі сонячного енергопостачання.

#### **1.1 Системи сонячного електро- та теплопостачання**

Грунтовний аналіз установок перетворення сонячної енергії (сонячних колекторів (СК) ) в теплову й електричну вимагає комплексного розуміння роботи системи енергопостачання. Вчені наводять оптимальні рішення, які дозволяють максимально використати енергетичний ресурс в системі сонячного електропостачання (ССЕ). З точки зору ефективного використання сонячної енергії (СЕ) як додаткового джерела енергії, таким рішенням може бути конструювання фотоелектричного сонячного колектора (ФСК), що містить додаткові дзеркала для збільшення оптичного потоку на сонцесприймальну поверхню (ССП) [29, 30, 62].

Як правило, ССЕ складається з ФСК, контролера заряду акумуляторної батареї (АБ) та інвентора, який містить необхідні види електричного захисту (від короткого замикання (КЗ), перевантаження тощо) [77].

За умови підключення необхідної кількості ФСК в ССЕ споживач може використовувати електроенергію безпосередньо, тобто одразу від ФСК без АБ. Найпоширенішими є модулі змінного струму, в яких інвентор вбудований на тильній частині ФСК (рис. 1.1). За надлишкової генерації електричної енергії, її

можна перенаправити до загальної електричної мережі [77]. Також, існує варіант ССЕ з безпосередньою передачею електроенергії до теплового насоса, який виконує роль споживача [126].

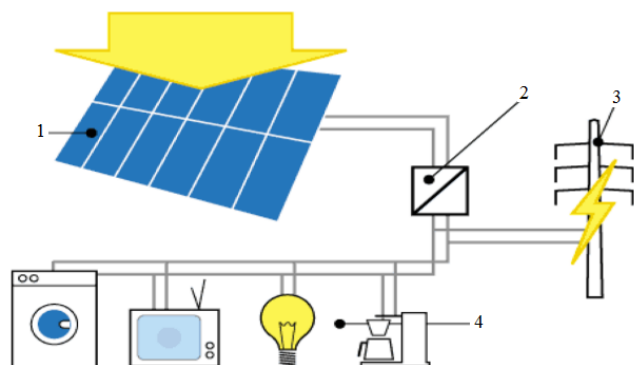


Рисунок 1.1 – Схемне рішення ССЕ, з'єднаного з мережею:

1 – ФСК; 2 – інвертор; 3 – мережа;  
4 – споживач [77]

За умов недостатнього сонячного випромінювання (СВ) в денний чи його відсутності в нічний період доби, живлення електричних приладів можна забезпечити від АБ, що є раціональним конструктивним рішенням в ССЕ. Потужність ССЕ з АБ залежить від категорії електропостачання споживача та тривалості відключення від основної мережі [77]. Отже, вибір необхідного рішення ССЕ залежить, по-перше, від місця розташування ФСК, а по-друге, від техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) для споживача [54].

У конструкціях СК на противагу традиційним рішенням рекомендують застосовувати дельта-системи з проміжним екраном, які подовжують використання систем сонячного теплопостачання (ССТ) в середньому на 1.5 год за добу [81, 82]. Доцільним є використання потрійно-орієнтованих сонячних колекторів, які теж подовжують використання ССТ та є економічно вигідним рішенням для широкомасштабного впровадження на практиці [115]. На основі аналізу відомостей поданих у літературних джерелах [80, 98, 151, 160], в даній роботі узагальнено класифікацію ССТ за типом подачі теплоносія (рис. 1.2).

Найпростішою ССТ вважається термосифонна система. Термосифонні системи загалом можуть працювати за різних режимів руху теплоносія, а саме: з природною (ПЦТ) чи вимушеною циркуляцією (ВЦТ) [15]. Окрім цього, ССТ, залежно від потреб споживача, комбінують з дублюючим джерелом енергії, наприклад, газовими чи електричними котлами тощо [6, 148].

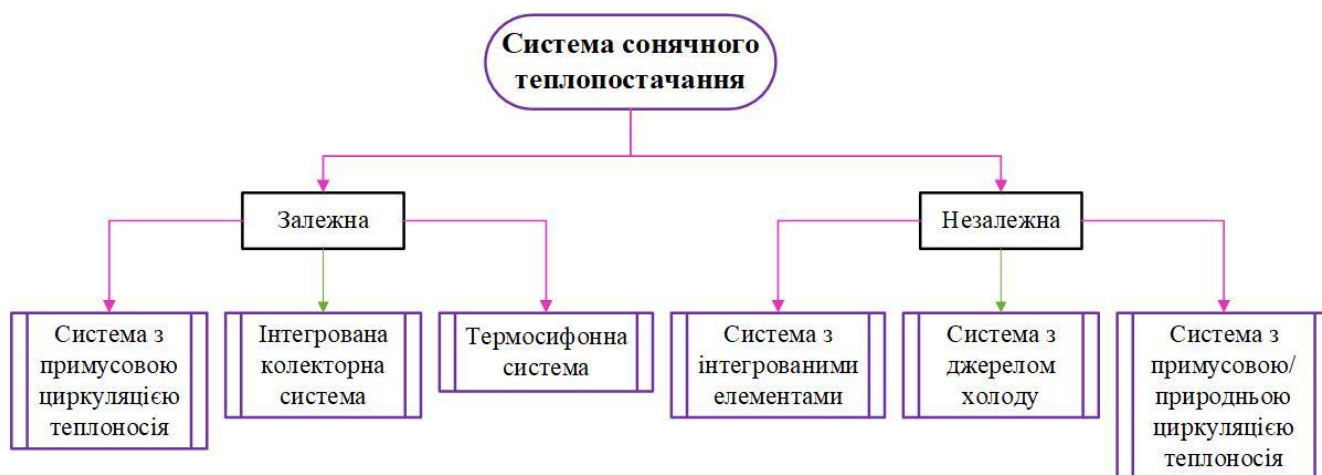


Рисунок 1.2 – Класифікація ССТ за типом подачі теплоносія

Як правило, комбінування ССТ з дублюючим джерелом пояснюється необхідністю забезпечення максимальних (пікових) навантажень для споживача. Крім цього, виділяють, термосифонні системи, що належать до залежних ССТ, тоді як незалежні ССТ містять додатково теплообмінник (ТО) для розділення потоків теплоносія (рис.1.3) [90, 177].

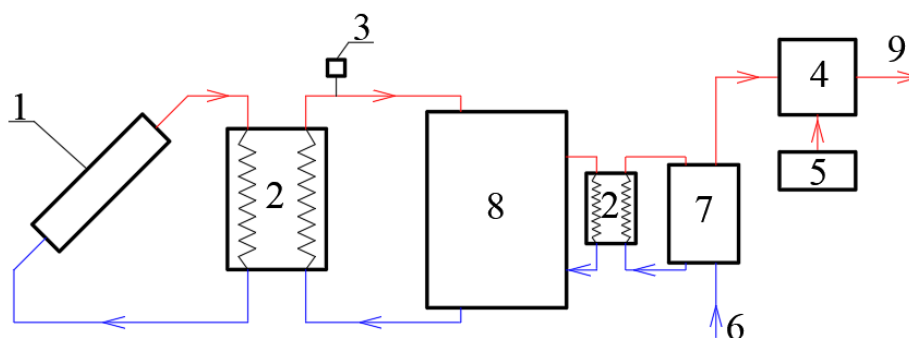


Рисунок 1.3 – ССТ з непрямою подачею рідинного теплоносія:

1 – сонячний колектор; 2 – ТО; 3 – запобіжний клапан; 4 – бак з нагрітим теплоносієм; 5 – дублююче джерело; 6 – подача холодного рідинного теплоносія; 7 – бак для попереднього нагріву рідинного теплоносія; 8 – бак для акумулювання теплової енергії (БА); 9 – споживач

На практиці, ССТ з рідинним теплоносієм застосовують частіше, ніж з повітряним, оскільки рідинний може використовуватись для утилізації залишкової енергії, яка отримана від повітряного теплоносія [6, 16, 27]. Наприклад, ССТ для

нагрівання низькотемпературного теплоносія може набувати різноманітних інженерних рішень [151]. Однак, інколи такі системи можуть бути економічно не вигідними згідно з розрахунками ТЕО.

ССТ може або використовувати СК як окремий елемент для генерування теплової енергії, або роль СК виконує зовнішня конструкція будівлі (ЗКБ). Відмінність між ними полягає в прямій подачі теплоносія від теплового сонячного колектора (ТСК), або при інтегруванні елементів ТСК в конструкцію ЗКБ [151].

Також, часто використовуються пасивні ССТ з повітряним теплоносієм, однак останніми роками все більшої популярності набувають ССТ з рідинним теплоносієм [83, 92]. ССТ, яка використовує повітряний теплоносій є складною в конструктивному виконанні, однак на доволі тривалий термін не потребує технічного обслуговування. Тому, така система використовується для організації комфортних мікрокліматичних умов в приміщенні завдяки пасивному нагріванню або охолодженню, тобто рух теплоносія відбувається завдяки різниці його густин (рис. 1.4) [158, 159].

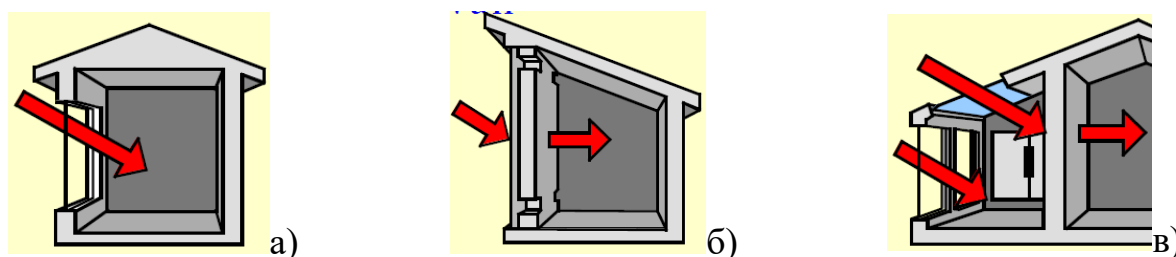


Рисунок 1.4 – ССТ з пасивним рухом теплоносія:

а – пряме нагрівання теплоносія; б – нагрівання теплоносія через стіну;

в – для теплоносія виділено «сонячний простір»

Використання стіни в якості теплового акумулятора (рис. 1.4, б) дозволяє збирати і накопичувати СЕ за весь день, а згодом цю теплоту віддати в приміщення через визначений час (рис. 1.5). Ця стіна може бути покрита селективним покриттям або пофарбована в чорний колір. Окрім цього, таку конструкцію стіни рекомендовано встановлювати на південній стороні будівлі за фасадним скляним огороженням [158, 159].

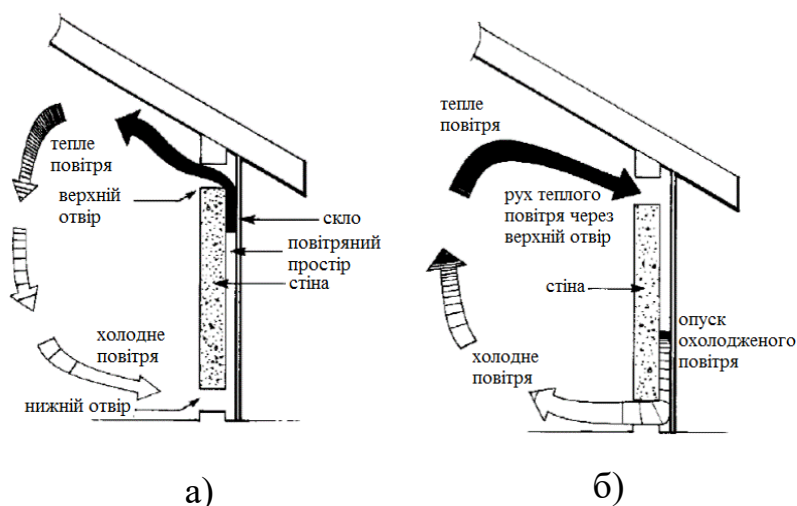


Рисунок 1.5 – Принцип роботи стіни Тромба:  
а – вдень; б – вночі [158, 159]

Окремим видом СК як елемента ССТ, є «венеціанські жалюзі». Їх можна використовувати як джерело теплоти, або як відбивачі СВ (для охолодження). Така технологія виконує функцію сонцезахисного пристрою (штор) (СЗП). Однак, наразі «венеціанські жалюзі» не можуть повністю забезпечити споживача тепловою енергією, а тому потребують дублюючого джерела енергії. Недоліком «сонячного простору» для організації ССТ (рис. 1.6) є виділення площі, яка могла б використовуватись для інших потреб споживача. Такі установки використовуються у тепличному господарстві [158, 159].

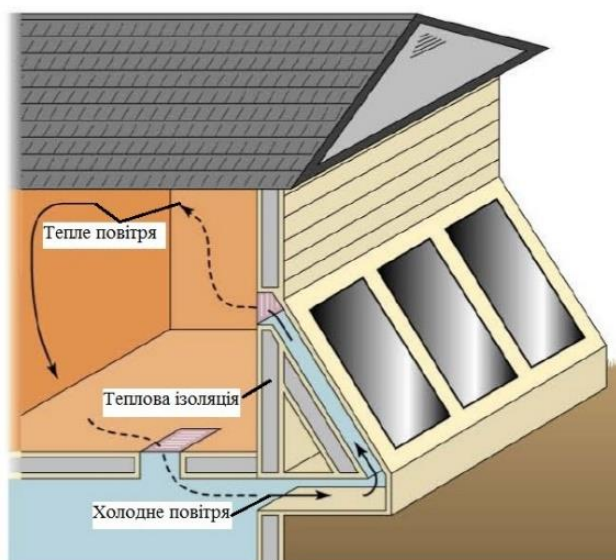


Рисунок 1.6 – ССТ з «сонячним простором» для повітряного теплоносія [186]

Ще одним видом ССТ є моделі з одночасним нагрівом рідинного та повітряного теплоносія в ТСК [5]. Такі моделі володіють підвищеною тепловою

ефективністю (ТЕ) та можуть використовуватись у схемних рішеннях, для яких необхідна подача двох типів теплоносія.

Енергозберігаюча ССЕРП фірми «Reedy Creek» використовує ФСК та ТСК в своїх конструкціях. Запропонована ССЕРП може водночас генерувати теплову та електричну енергію, і додатково бути призначеною для системи холодопостачання (СХП) (рис. 1.7) [98]. СХП має покращену теплопровідність, а в конструкції можуть використовуватись оптичні фільтри для СК [162, 171].

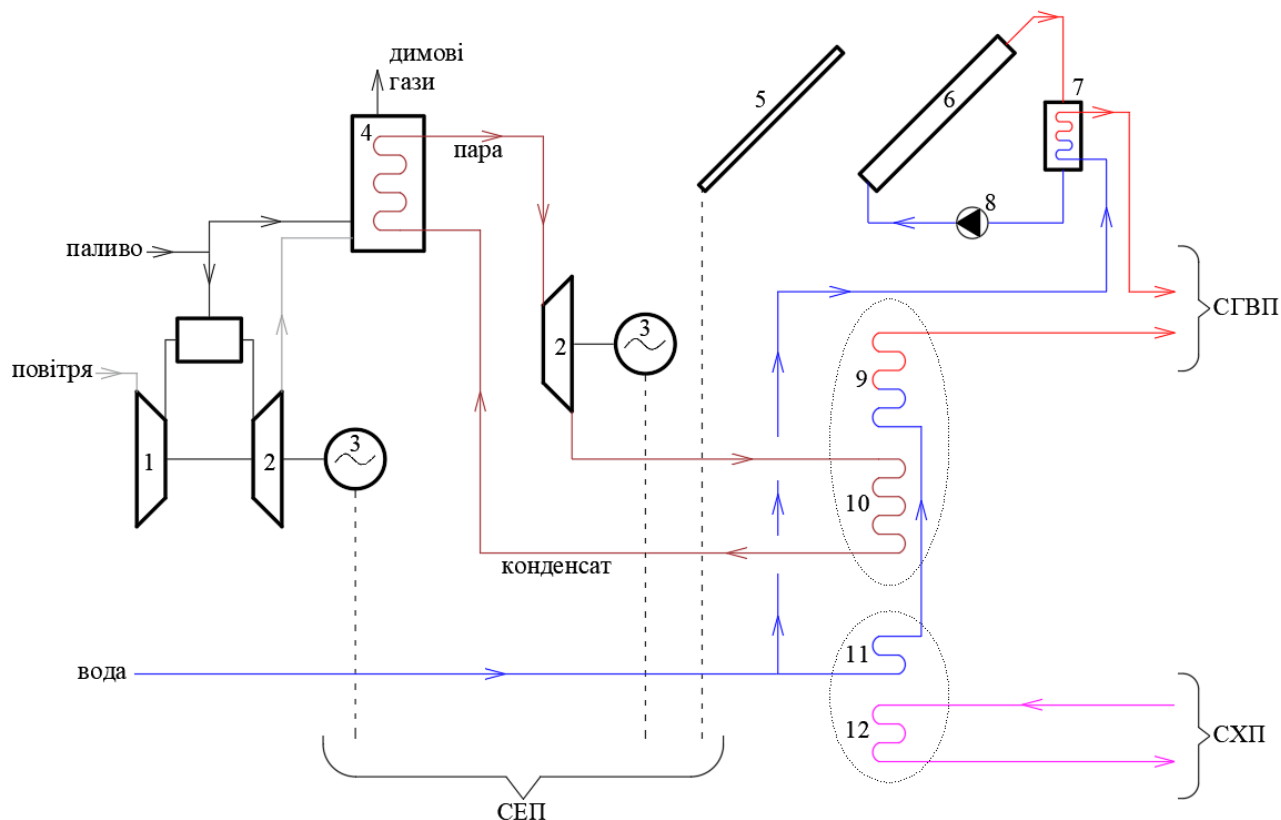


Рисунок 1.7 – Енергозберігаюча схема фірми «Reedy Creek» [98]:

- 1 – компресор; 2 – турбіна; 3 – генератор; 4 – котел-утилізатор; 5 – ФСК; 6 – ТСК;  
 7 – БА з ТО; 8 – насос; 9 – конденсатор абсорбційної холодильної машини;  
 10 – генератор абсорбційної холодильної машини; 11 – поглинач абсорбційної  
 холодильної машини; 12 – випарник абсорбційної холодильної машини

ССЕРП, що містить СК, може використовувати електрику для перекачування рідини або генерувати електроенергію для загальних потреб споживача. За оптимальних кліматичних умов ССЕРП може забезпечити ~80% енергії, яка затрачається на нагрів води при теплозабезпеченні житлових та промислових



підприємств. Більшість ССЕП потребують дублюючого джерела енергії, особливо за умов хмарних днів або в період підвищеного (пікового) навантаження на систему тепло- та електропостачання [93, 137]. Конфігурація ССЕП із тепловим насосом є достатньо ефективною, оскільки вона може використовувати теплоту від ТСК, а електроенергію – від ФСК [8, 126]. Існують також ССЕП у яких застосовується повітряний теплоносіє для теплопостачання [65, 124].

Виділяють дві схеми роботи ССЕП, за якими здійснюється функціонування установок на їхній основі: з природною або вимушеною циркуляцією теплоносія в тепловому сонячному колекторі. У випадку ФСК, який працює разом з ТСК за схемою з природною циркуляцією, недоліком є ускладнення контролю і підтримання сталої температури фотоелемента (ФЕ) на його поверхні. Тоді як за схемою з примусовою циркуляцією, частина електроенергії може бути витрачена на роботу одного з електричних складових елементів системи.

Отже, щоб зберегти основні переваги двох схем і при цьому підвищити ефективність СК, необхідно врахувати специфіку їхнього функціонування [39, 94]. Крім цього, детальнішого аналізу потребують конструкції перетворювачів сонячної енергії, таких як ФСК та ТСК.

## **1.2 Аналіз конструкцій фотоелектричних та теплових сонячних колекторів**

*Фотоелектричні сонячні колектори (ФСК)* класифікують за технічними характеристиками: коефіцієнтом перетворення СЕ, кристалічною структурою та хімічним складом ФСК, кількістю об'єднаних на одному шарі ФЕ, тощо [13]. Основним критерієм при виборі конструкцій ФСК є елементарна принципова робота напівпровідникового ФЕ. Єдиним джерелом енергії для ФЕ є СВ, що виникає в результаті термоядерних реакцій [107]. Людство опанувало два напрямки енергопостачання, узалежнених від СВ, а саме: перетворення СВ в електричний струм та/або в теплову енергію [22, 66].

ФЕ є напівпровідниковими приладами, у яких генераційна потужність залежить від температури поверхні на структурі переходу [137]. Дослідження температурного коефіцієнта на поверхні ФСК є окремим напрямом досліджень, оскільки його встановлення дозволяє підвищити показники електричної ефективності (ЕЕ) ФСК ще на етапі його розроблення. Крім цього, покращення електричних параметрів ФСК залежить від структури *p-n* переходу. Тобто, у ФЕ вільні носії заряду створюються тільки тими фотонами, енергія яких більша або дорівнює ширині забороненої зони [107].

Постійний струм створюється внаслідок послідовного з'єднання елементів [77]. Генерація струму ФЕ відбувається постійно за умови надходження СВ, в іншому ж випадку процес може бути зворотній [60, 107].

Варто зазначити, що застосування ФСК набуває популярності через зниження вартості їхнього виробництва внаслідок конкуренції між виробниками [63, 123]. Сама технологія виготовлення ФЕ сьогодні перебуває на високому технологічному рівні. Тому, це звужує площину пошуку засобів удосконалення існуючих видів фотоелементів.

Сучасні ФЕ сконструйовані на основі однорівневого *p-n* переходу. Однак, ефективнішими є багатошарові структурні переходи, які мають різну ширину забороненої зони. Такі елементи, що працюють із більшою частиною сонячного спектру називають багатоперехідними, каскадними або тандемними [60, 107]. Тому, для забезпечення дво- і тривірневого переходу застосовують додаткові аморфні речовини: аморфний кремній та його сплави ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ ), аморфний кремній легований воднем ( $a\text{-Si:H}$ ), або речовини з домішками германію ( $a\text{-SiGe:H}$ ), міді ( $\text{CuInSe}_2$ ) [107].

Напівпровідникові елементи поділяють за хімічною структурою: на основі кремнію; на основі гетероструктур типу АЗВ5, АЗВ6, (наприклад,  $\text{AlGaAs-GaAs}$ ); з домішками хімічного елементу – індію (In), арсеніду (As) або галію (Ga) [62]. Сучасні ФСК містять монокристалічний (C-Si) або полікристалічний (MC-Si) кремній. Згідно літературних даних [66], розрізняють декілька типів ФЕ залежно від впорядкування структури кристалів кремнію (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Розроблена класифікація ФЕ за типом впорядкування структури кристалів кремнію

Основу світового ринку становлять моно- та полікристалічні ФЕ ( $\approx 80\%$ ) [66]. Основним недоліком монокремнієвих фотоелементів є значна вартість очищеного кремнію, що використовується в ФЕ.

Гетероструктурні ФЕ поєднують в собі елементи кремнієвих та тонкоплівкових технологій. Перевагами таких структур є знижена чутливість до температури. Окрім цього, деякі ФЕ володіють високою радіаційною стійкістю, що забезпечується наявністю арсеніду галію. Гетероструктурні ФЕ володіють високим рівнем поглинання СВ, однак їм притаманний знижений термін експлуатаційної витривалості неосновних носіїв заряду [31].

Оскільки ФЕ є на стадії вдосконалення, то надати основну перевагу одній напівпровідниковій структурі є доволі важко. Подальше удосконалення таких структур потребує часу, який підкаже варіант із найраціональнішим підходом у перетворенні СВ [31].

До переваг ФСК належать: екологічна безпека для довкілля, мінімальний рівень технічного обслуговування та надійність. Питання акумуляції енергії, залежність від метеорологічних умов та нестабільність самого джерела енергії ФСК залишаються відкритими [62].

Теплові сонячні колектори (ТСК) на противагу ФСК можуть нагрівати рідинний теплоносій чи повітряний безпосередньо, проте в роботі їхніх конструкцій присутні спільні недоліки. ТСК класифікують за їхніми конструктивними особливостями або за фізичними характеристиками поглинання енергії. Найбільш експлуатованими конструкціями ТСК є: вакуумні, концентруючі та плоскі [112, 140]. Плоскі СК є більш технологічно спрощеними порівняно з іншими видами [116].

Існують різноманітні види конструкцій ТСК [88]. Подібно до ФСК, визначальним фактором для споживача є площа робочої поверхні та ТЕО для його встановлення. Виокремити лише один раціональний тип ТСК є недоречним, як і за хімічною структурою ФСК. Певний тип ТСК застосовують згідно вимог споживача. Отже, за таких умов доцільно детально проаналізувати ТСК за типом використовуваного теплоносія, а також систематизувати відомості їхньої класифікації.

В ТСК теплоносієм може бути вода, повітря чи водні розчини деяких речовин. Відповідно до використовуваного теплоносія і характеристик, ТСК поділяють на низько- та високотемпературні.

Плоскі СК в конструктивному плані змінюються лише за видом використовуваного матеріалу в ньому та розташуванням циркуляційних пристосувань для теплоносія відповідно до розміщення сонцепоглинаючої поверхні (СПП) (абсорбера) (рис. 1.9) [122].

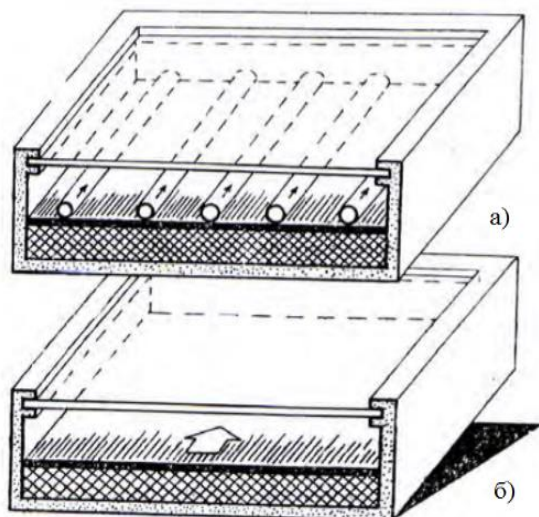


Рисунок 1.9 – Конструкція плоского ТСК:

а – з рідинним теплоносієм;  
б – з повітряним теплоносієм

В повітряних ТСК розташування СПП має важливе значення, оскільки повітря як теплоносії потребує або миттєвого акумулювання енергії, або передачі згенерованої енергії на малу відстань. Також, СПП може не тільки сприймати СЕ, але й інтенсифікувати рух теплоносія [111].

Для рідинних плоских ТСК важливе значення має розташування циркуляційних трубопроводів [186]. Переважна більшість плоских ТСК містить світлопрозоре покриття (скло) над циркуляційними трубопроводами. Крім цього, плоскі ТСК з рідинним теплоносієм є установками з відносно простим конструктивним рішенням і тривалим терміном експлуатації, проте з порівняно низьким ККД. Тому, більшість досліджень орієнтовані на пошук засобів підвищення їхньої теплової ефективності [184].

Поширеним видом ТСК є вакуумний СК, що містить 10-30 паралельно розташованих вакуумних трубок. Продуктивність такого ТСК лінійно узалежена від його кута нахилу, за умов відомої різниці температури теплоносія (ТТ) та температури довкілля (ТД). Під час зростання різниці температур між СК та довкіллям, тепла ефективність ТСК знижується [151]. Встановлено, що витрата теплоносія має значний вплив на ТЕ та залежить від коефіцієнта заповнення СК (кількості заповнення рідинним теплоносієм СК) описаним в праці [157] (рис. 1.10).

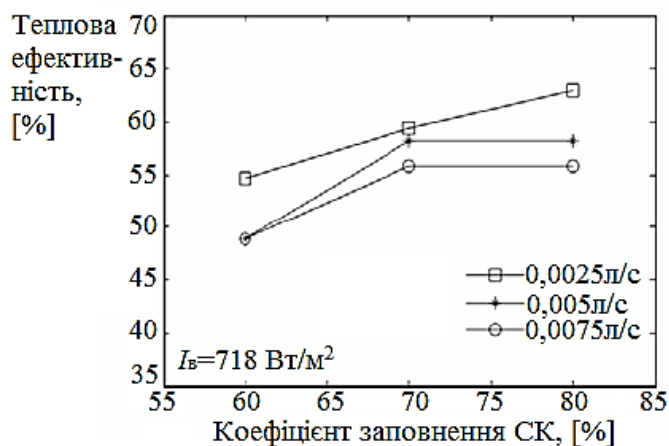


Рисунок 1.10 – Зміна витрати теплоносія в ТСК залежно від теплової ефективності та відносно коефіцієнта заповнення СК [157]

Отже, перспективним напрямом удосконалення ССТ, що використовуються для теплопостачання будівель та споруд, є пошук інноваційних, ефективних

та економічних рішень щодо інтегрування ТСК в архітектурні конструкції захищень будівель.

В конструкціях ТСК розрізняють інтегровані або комбіновані із ЗКБ СК. Оскільки, інтегровані СК не можуть бути окремими функціональними одиницями, а комбіновані СК – об'єднані з ЗКБ, то вибір конструкції СК залежить від ТЕО. Такі конструктивні рішення ЗСК із СК виконують подвійну функцію: теплопостачання та захищення від зовнішнього середовища. Варто звернути увагу, що СК в ССТ є, де-факто, комбінованими, оскільки елементи ССТ можуть бути окремими незалежними одиницями [151].

У системах енергозабезпечення пропонують використовувати новий тип енергоактивного огороження для перетворення відновлюваних джерел енергії. В енергоактивному огороженні є несуча стіна як основний конструктивний елемент, та шар теплоізоляції, повітряний прошарок (де розташовано ламелі-абсорбери), а також зовнішнє захисне прозоре нашарування теплоізоляції (рис. 1.11) [79].

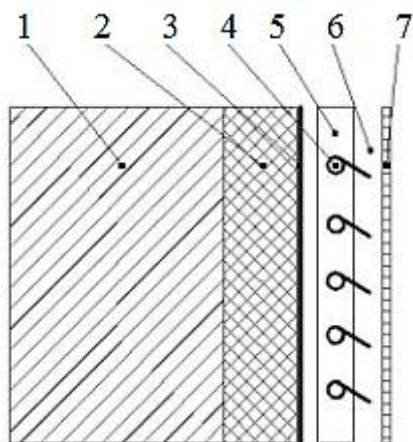


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення енергоактивного огороження:

- 1 – несуча стіна; 2 – теплоізоляційний шар;
- 3 – шар екранно-відбивної ізоляції;
- 4 – ламелі-абсорбери; 5 – колектор;
- 6 – повітряний шар;
- 7 – шар прозорого захисного покриття

Конструкція повітряного СК, інтегрованого в фасадне огороження будівлі, є економічно-вигідною для теплопостачання та демонструє естетичність архітектурно-інженерного рішення у вигляді гофрованого металевих сайдингу [151]. Конструкція повітряного ТСК, який інтегрований в конструкцію даху, містить безпосередньо під дахом канал для повітряного теплоносія [122]. У ході роботи, ТСК має температуру близьку до ТД, що зменшує коефіцієнт теплопередачі повних тепловтрат ТСК в цілому.

У якості СПП можна застосувати металевий гофрований матеріал, що використовується для покриття даху будівлі. Така конструкція дозволяє збільшити активну поверхню ТСК приблизно на 25% [88, 89].

Окремої уваги заслуговують гібридні сонячні колектори (ГСК), що поєднують в собі конструкцію ТСК та ФСК, адже це дозволяє отримувати одночасно теплову та електричну енергію із збільшеним коефіцієнтом енергетичної ефективності.

### 1.3 Гібридні сонячні колектори

За останні декілька десятиліть, широкомасштабного дослідження набули гібридні сонячні колектори (ГСК), які порівняно з ФСК та ТСК, мають покращену загальну продуктивність. На основі аналізу ряду праць [13, 123, 138, 162] було розроблено класифікацію ГСК (рис. 1.12).

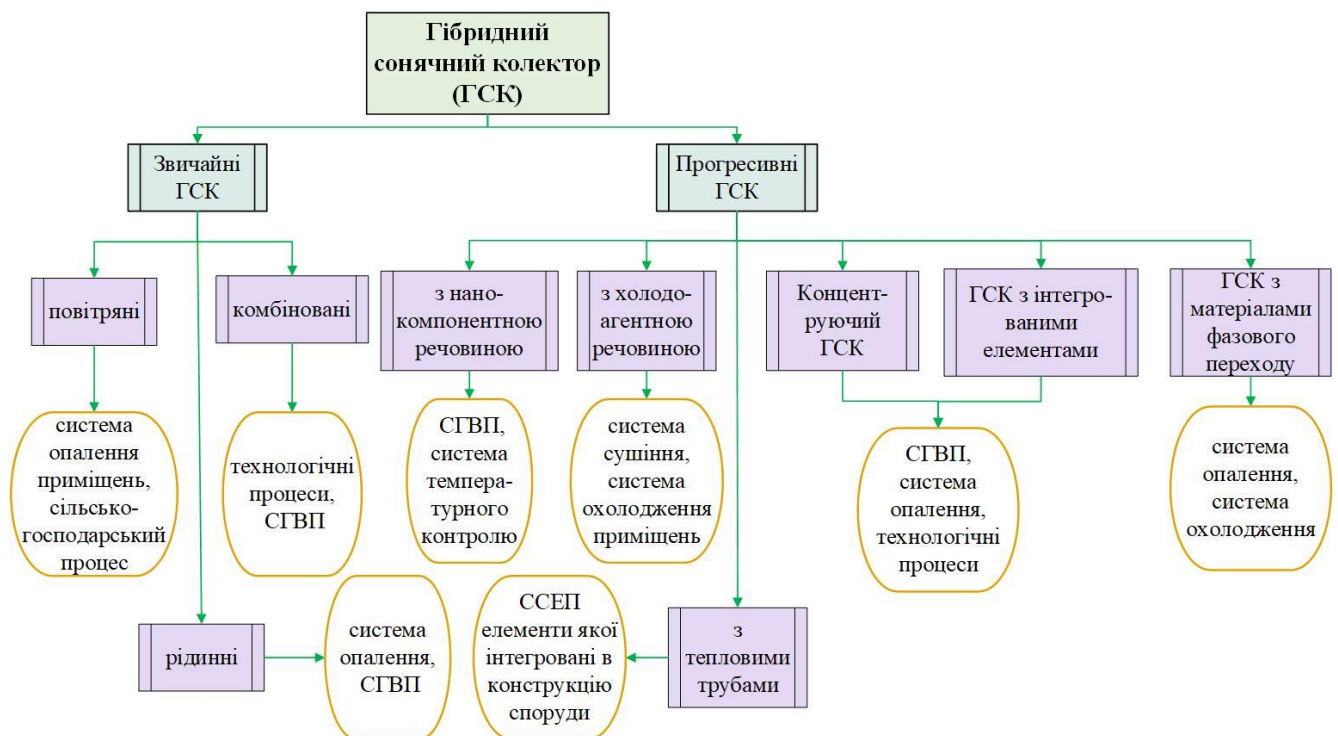


Рисунок 1.12 – Узагальнена класифікація гібридних сонячних колекторів

Переважає більшість ГСК мають ще назви «комбі-панелі», «фотоелектричні теплові модулі» та, загалом, поєднують в собі елементи СПП плоского

ГСК із ФСК [13, 102, 179]. Як правило, конструкція ГСК у верхній частині містить ФСК, а в нижній алюмінієвій частині – ряд циркуляційних трубопроводів [110, 127]. Тому, можна стверджувати, що ГСК посідають особливе місце серед установок, що перетворюють СЕ в теплову та електричну енергію завдяки поєднанню конструктивних елементів, що входять до складу теплових чи фотоелектричних сонячних колекторів [154]. Зважаючи на класифікацію, що наведена на рисунку 1.12 можна детальніше проаналізувати ГСК за способом використання повітряного теплоносія.

Існують різні типи повітряних ГСК, які відрізняються один від одного механізмами циркуляції повітряного потоку (рис. 1.13) [125]. Дослідниками розроблено конструкцію повітропроводу з ФСК, підтипу ГСК [123, 138]. Це типова конструкція ГСК із скляним покриттям та СПП, який розміщений над повітряним потоком.

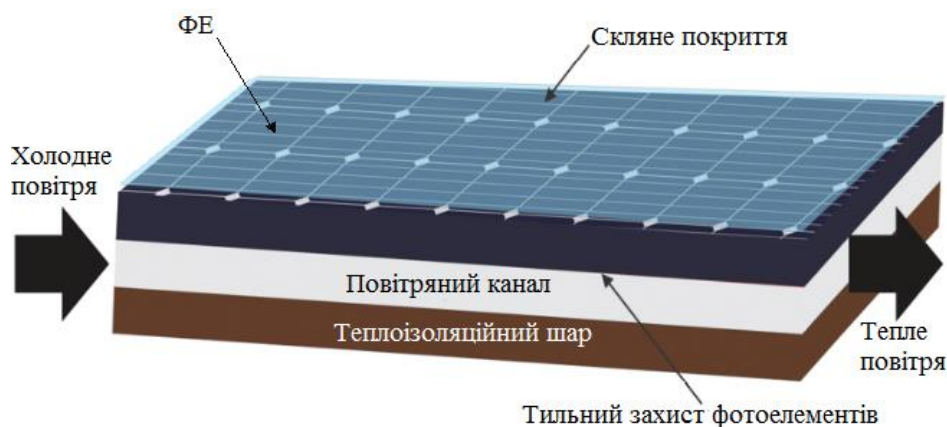


Рисунок 1.13 –  
Типова конструкція  
ГСК з СПП  
над повітряним  
каналом [123, 138]

Моделювання в програмному забезпеченні від фірми «ANSYS» дозволяє виконати розподілення температури і напрям повітряного потоку в ГСК. З літературних джерел відомо, що зі зниженням температури докільця покращуються електричні характеристики системи [147]. Також, сучасним інженерним рішенням на світовому ринку є ГСК, що використовує рідинний теплоносій для перетворення в теплову енергію.

Приблизно 90 % СВ поглинається поверхнею конструкції ФСК, однак в корисну електричну енергію перетворюється лише 15 %, а в теплову енергію –  $\approx 10$  % (рис. 1.14) [100, 160, 161].



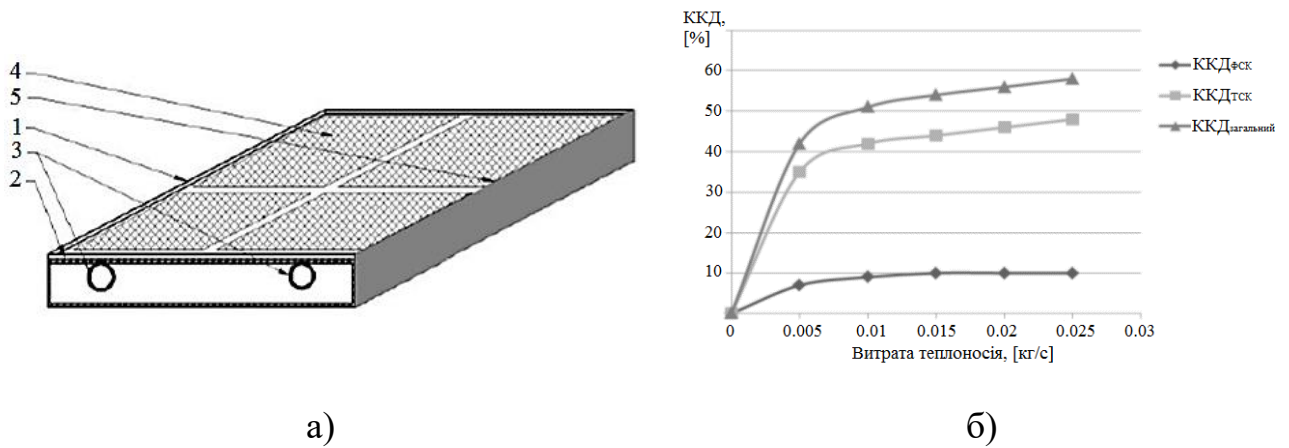


Рисунок 1.14 – Конструкція ГСК та її енергетична ефективність:

а – типова конструкція рідинного ГСК;

б – ефективність типового рідинного ГСК;

1 – захисне скло; 2 – алюмінієва пластина; 3 – трубопроводи для циркуляції теплоносія; 4 – ФСК; 5 – корпус [100]

На основі отриманих даних енергетичних параметрів отриманих в «AV Project Ltd», дослідниками запропонована модель конструкції ГСК, для якої характерною є лінійна та низхідна характеристика теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) [134].

З літературних джерел відомо, що коефіцієнт теплопередачі між ФСК і водою є високим показником. Отримані дані стосовно коефіцієнта свідчать про узгодженість між результатами математичної моделі з експериментально отриманим ККД електричної та теплової енергії відповідно. У більшості досліджень використовується система TRNSYS (інструмент моделювання перехідної енергетичної системи) або MATLAB/SIMULINK. TRNSYS спочатку був розроблений тільки для теплових систем, але також може застосовуватися до гібридних сонячних колекторів [160, 161].

Конструкція ГСК може містити поглинальний профіль, який виконує роль своєрідних циркулярних трубопроводів для повітряного та рідинного теплоносія [70]. Таке схемне рішення конструкції дозволяє визначити приналежність розробленого ГСК до системи сонячного енергопостачання (ССЕП), елементи якої можуть бути інтегровані в зовнішнє огороження будівлі та

споруди. Незважаючи на велику кількість запропонованих конструкцій ГСК, рішень стосовно їхньої інтеграції в ЗКБ є недостатньо. Тому, доцільно продовжити аналіз літературних даних щодо можливості інтегрування елементів системи сонячного теплопостачання в конструкцію світлопрозорого фасаду будівлі (СФБ).

#### **1.4 Інтегрування елементів системи сонячного теплопостачання в конструкцію світлопрозорого фасаду будівлі**

##### **1.4.1 Аналіз основних світлопрозорих матеріалів, що використовують для конструкції фасаду будівлі**

Відповідно до визначення [36], світлопрозорий фасад будівлі – це зовнішня стіна, що містить фасадну теплоізоляцію з прозорим опорядженням. Також, це конструктивне рішення зовнішніх стін, яке передбачає суцільний СФБ або комбінований фасад.

Суцільний СФБ – це збірна система, що складається тільки зі світлопрозорих елементів та конструкцій їхнього кріплення. Комбінований СФБ – це збірна система зі світлопрозорим опоряджувальним захисним шаром.

Для підсилення ефекту нових соціальних, економічних і технологічних розробок у цій царині, доцільно підвищити якість енергоефективних будівель і затвердити нові концептуальні принципи проектування оболонки світлопрозорих будівель [99, 139]. Отже, концепція і реалізація світлопрозорого фасаду будівлі є першочерговим завданням [164], а інтегрування елементів ССЕР у конструкцію СФБ є необхідністю для забезпечення геометричного зменшення використання органічних ресурсів. Крім вищенаведених проблематик, ґрунтовнішого обговорення потребує експлуатація основних світлопрозорих матеріалів, що використовують для фасадів будівель.

Основним матеріалом СФБ є скло [95]. Технологічно новим матеріалом є «сонячне скло», яке має світлопропускання  $\approx 96 - 98 \%$ . Однак, такий матеріал має високу вартість, що відповідно збільшує вартість СК та доступність для споживача.

Сонячне селективне покриття вперше було досліджено вченим Табором [175, 176]. Однак, узагальненої класифікації селективного покриття не наведено в літературних джерелах. На рисунку 1.15 подано узагальнену класифікацію селективного покриття. Розрізняють прозорі і непрозорі селективні покриття. Крім цього, селективні покриття класифікують: за видом, способом нанесення, типом покриття, типом нанесення та температурними властивостями.

Непрозорі селективні покриття використовуються для сонячних колекторів, що інтегровані в конструктивні частини будівлі або ж суміщені з нею. На практиці, для економії коштів, селективні покриття заміняють на профіль з оцинкованої сталі. Завдяки вальцюванню профіль не провисає, є стійким до вібрацій у потоці повітря і одночасно володіє кращою тепловіддачею порівняно з гладкою поверхнею. Для підвищення коефіцієнта поглинання, абсорбовану поверхню профілю покривають чорною фарбою, що володіє селективними властивостями. Однак, фарба, після нанесення, збільшує товщину в порівнянні із селективним покриттям, що є причиною втрати передачі теплової енергії. Тому, ефективність колектора з фарбованим абсорбуючим покриттям менша, ніж з селективним [68, 69, 165].



Рисунок 1.15 – Узагальнена класифікація видів селективного покриття

Виділяють основні показники ефективності селективного покриття [178]:

- коефіцієнт поглинання (0.8 - 0.98);
- коефіцієнт випромінювання (0.95 - 0.02);
- коефіцієнт селективності, який встановлюється для зручності порівняння покриття (відношення коефіцієнтів поглинання до випромінювання).

У якості селективного покриття використовують різноманітні матеріали, зокрема темні фарби, нанесення яких на поверхню може відбуватись хімічним шляхом, напиленням, осадженням електрохімічним способом чи плазмовим напиленням [7]. Різні типи селективного покриття можуть відігравати роль СПП [163], однак покриття може піддаватись процесу деградації за умов тривалої експлуатації, що стає причиною зміни оптичних значень СПП [133]. Селективне покриття з п'ятишаровим напиленням має більший термін експлуатації порівняно з основою, на яку воно було нанесено, наприклад, на скло звичайне. Крім цього, його застосовують в склопакетах (СП), як частини СФБ або ЗКБ (рис. 1.16) (де А – відстань між склом; В – товщина склопакету; С – глибина герметизуючого шару) [105, 129].

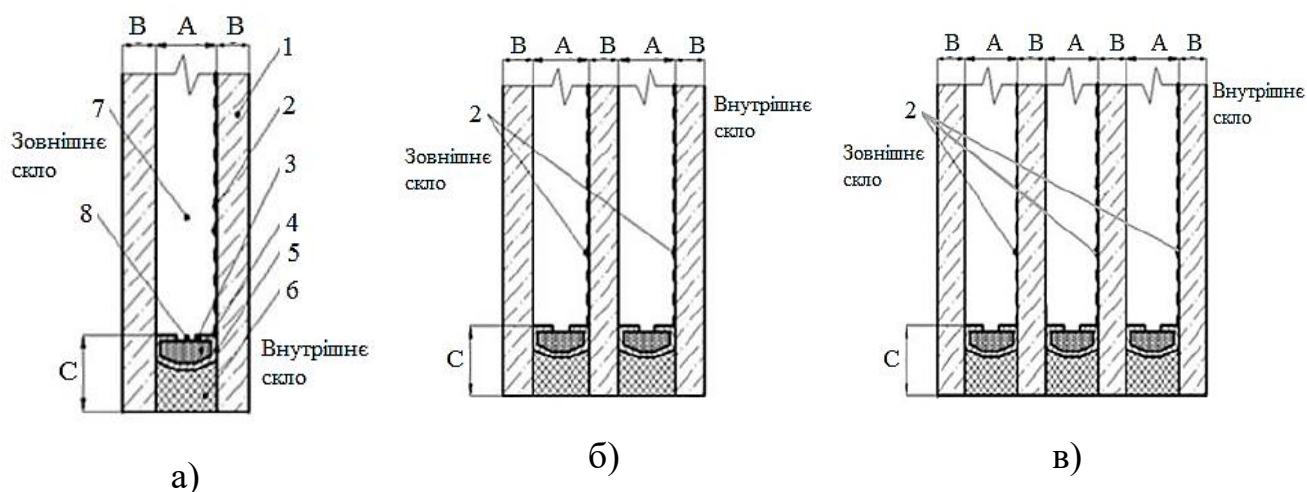


Рисунок 1.16 – Типи СП із селективним покриттям [105, 129]:

а – однокамерний СП; б – двокамерний СП; в – трикамерний СП;

1 – скляне покриття; 2 – селективне покриття; 3 – дистанційна рамка;

4 – вологопоглинач; 5 – нетверднучий герметик; 6 – тверднучий герметик;

7 – повітряний прошарок (між скляна відстань);

8 – дегідративні отвори [105, 129]

На основі літературних даних [25, 42, 43, 44, 74, 86], було розроблено узагальнену класифікацію скла (рис. 1.17). В класифікації скло розрізняють: за типом, за призначенням, за типом виробу, за складом модифікаторів, що входять до складу скла, за хімічним складом, за способом виробництва, за типом листового скла.

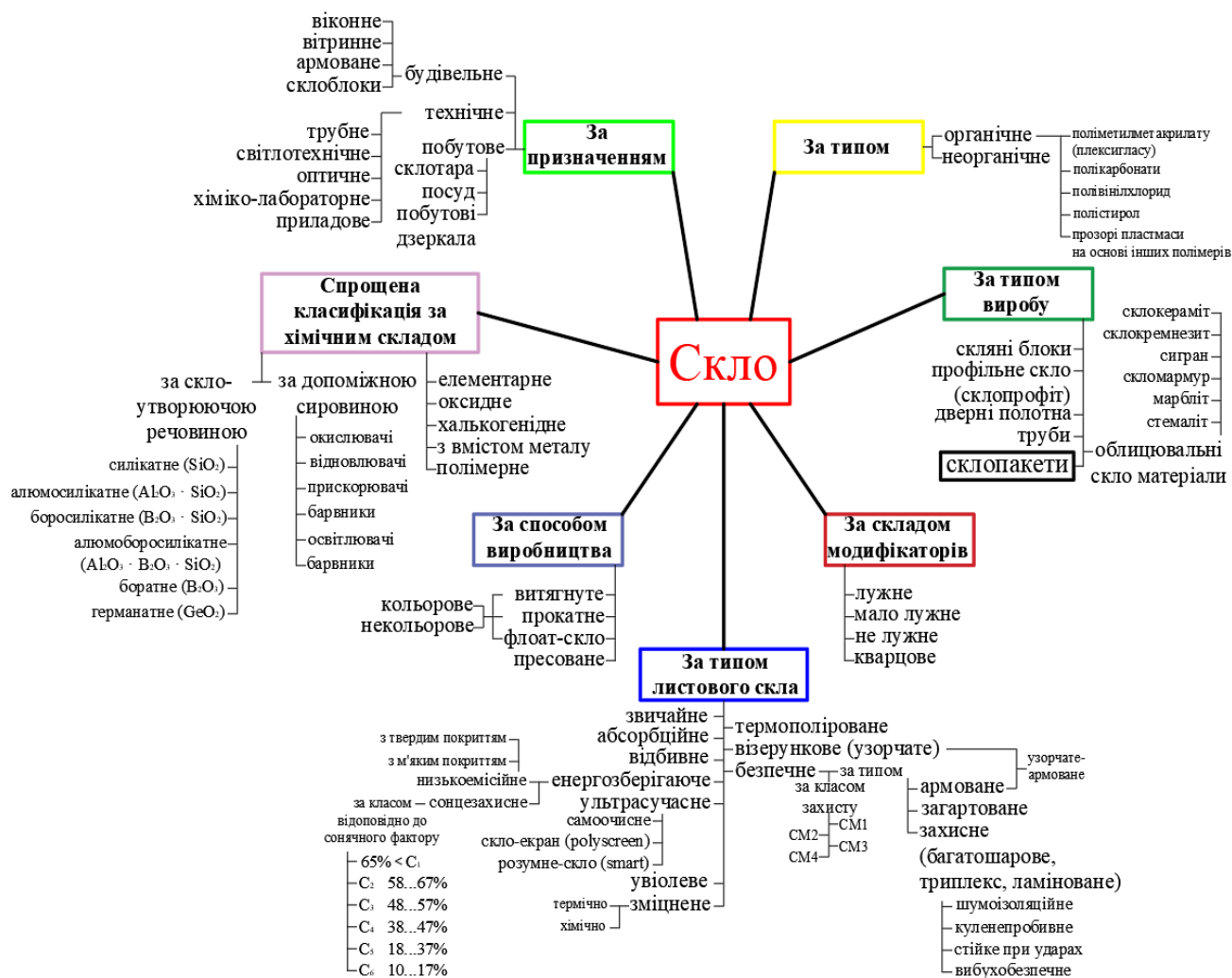


Рисунок 1.17 – Розроблена узагальнена класифікація скла

Рациональний вибір селективного покриття та матеріалу скла може посприяти вдосконаленню гібридних сонячних колекторів, тому виникає необхідність в детальнішому огляді типів світлопрозорих фасадів будівель на основі скла та селективного покриття [163].

### **1.4.2 Типи світлопрозорих фасадів будівлі та вимоги до їх схемних рішень**

Відомо, що сучасні технології дозволяють втілювати в реальність архітектурні ідеї зі світлопрозорими конструкціями, які можуть встановлюватись під різними кутами відносно вертикальної площини фасаду [58]. Варіативна форма світлопрозорого фасаду, в будь-якому випадку, вимагає застосування сонцезахисних пристроїв, що можуть забезпечити не тільки функціональний захист, але й підкреслити цілісність архітектурного ансамблю окремих частин будівлі [109].

За технологією зведення, СФБ поділяють: із структурним, напівструктурним та спайдерним заскленням, подвійними фасадними системами. За видом заповнення прошарку в СФБ між шарами скла, системи класифікують за наповненням: повітрям, аргоном, криптоном, сумішшю газів [67].

Згідно класифікації, СФБ розрізняють: за розміщенням поверхонь подвійного фасаду (встановлені на одному рівні із непрозорою ЗКБ); наявністю вентиляційних отворів; сегментованістю поверхні [10]. Під час експлуатації СФБ враховують: тепло- та звукоізоляцію, енергоефективність, пожежну безпеку, захист для людини від погодних та природних явищ, економічну доцільність [80, 132]. В будівлях і спорудах, що містять значну кількість СФБ, враховують наступні параметри: орієнтування будівлі, вигідне розташування вікон та дверей відносно сторін горизонту для ефективного та доцільного використання СЕ [151, 158, 159].

Фасад крім сприймання СЕ піддається впливу опадів та вітрового навантаження, що спричиняє підвищений рівень шуму в приміщенні, а тому у просвіті між поверхнями скляних подвійних фасадів рекомендують встановлювати не тільки звукопоглинальні, але й світлоелементи у формі відбивачів або голографічних модулів [57, 58]. Для ЗКБ, зокрема для СФБ, розроблено геометричне моделювання процесу тепловолого-перенесення в огорожувальних конструкціях. Вибір конструкції за геометричного моделювання, ґрунтується на основі методу перетворень [99].

За перпендикулярного надходження,  $\approx 90\%$  видимої частини спектру світла, що потрапляє на поверхню звичайного прозорого скла пропускається, тоді як  $\approx 7-8\%$  енергії відбивається, а решта  $2-3\%$  поглинається у вигляді теплоти віконними шибамі. Із збільшенням кількості віконних шиб зменшується коефіцієнт пропускання, внаслідок збільшення рівня поглинутої енергії шибамі та кількості відбитої енергії [132, 155]. Для характеристики СВ використовують показники безпосередньо переданої енергії (первинної) та вторинної частини, що складається з часток поглинутої енергії в шибамі. Отже, загальна пропускна здатність скла – це сума первинної та вторинної енергій, що отримані від СВ.

Орієнтація СФБ впливає на тепловий баланс в приміщенні, тому також застосовують графічний спосіб оптимального розташування світлопрозорих конструкцій на фасадах будівель. Визначення раціональної орієнтації вікон та їхнього розташування в огорожувальних конструкціях доцільно за умови, що тепловтрати через світлопрозорі конструкції не перевищують тепловтрати через стіни [76, 153]. Актуальним питанням залишається вибір типу світлопрозорих фасадів будівель з існуючих, для застосування у системах енергопостачання.

### **1.5 Світлопрозорі фасади будівлі, що використовують для системи сонячного енергопостачання**

Залежно від типу і розмірів система може бути інтегрована таким чином, щоб вона була невидимою, естетично привабливою або виглядала як архітектурна концепція.

З точки зору теплообміну, простір між зовнішнім та внутрішнім середовищем СФБ є найуразливішим місцем у ЗКБ [41, 99]. Крім цього, варто звернути увагу, що в сучасному світі зростає попит на світлопрозорі фасади будівель. Цікавим напрямком дослідження у теплопостачанні є корисне використання збільшеної площі СФБ [149].

Збільшити теплову ефективність вікон можна змінивши їхню конструкцію або врахувавши структуру плоского ТСК інтегрованого в СФБ, що наведено в

праці [185]. Іншим прикладом системи сонячного енергопостачання є поєднання системи із конструкцією фасаду будівлі, яка розташована в місті Фраштанц, Австрія (Frastanz, Austria). Проте, вартість такої будівлі в цілому станом на 1995 рік була завищеною [187].

Для споживача рекомендують використовувати світлопрозорі фасади будівель, що можуть вентилювати приміщення (рис. 1.18). Такі фасади, за значного зовнішнього звукового та вітрового навантаження дозволяють протягом року виконувати природню вентиляцію офісного приміщення [10, 119].

СФБ повинні забезпечувати приміщення нормованою тривалістю прямого сонячного світла обмежуючи його яскравість. Цей процес узалежнений від раціонального проектування СЗП [99]. Таким СЗП для СФБ може бути термохромне скло, яке якісніше регулює внутрішню температуру порівняно з фотохромним склом, однак має високу вартість на ринку.

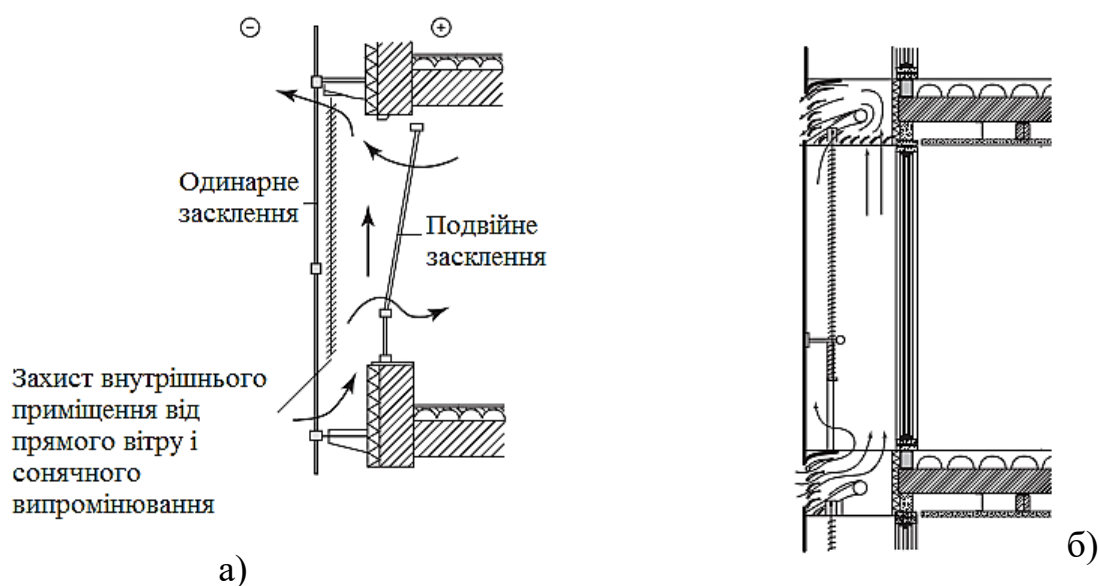


Рисунок 1.18 – Схематичне зображення конструкції подвійного фасаду:

а – подвійний фасад з організованою вентиляцією;

б – подвійний вентиляований фасад [10]

ФЕ можуть отримувати енергію від сонячного випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі під час їхнього використання у конструкціях СФБ як СЗП [149]. Склопакет із срібним напиленням як основа



конструкції СФБ, сприяє зменшенню тепловтрат будівлі, оскільки є ефективним в спектрі від ближнього до інфрачервоного випромінювання [105, 129].

Актуальним і повністю недослідженим напрямком використання сонячної енергії для суспільства є використання світлопрозорих фасадів будівель із СЗП, що є частиною ССЕР [131]. У зв'язку із цим необхідно використовувати методики розрахунку енергетичних характеристик сонячних колекторів, які можна сумістити із конструкцією світлопрозорого фасаду будівлі.

## **1.6 Основні методики розрахунку енергетичних характеристик сонячних колекторів в системі сонячного енергопостачання**

### **1.6.1 Методики для розрахунку параметрів теплових сонячних колекторів в системі сонячного енергопостачання**

При виборі СК потрібно керуватися, по-перше, відповідністю показників якості: безпеки, продуктивності та ефективності. По-друге, варто враховувати показник загальної площі СК, його ефективність та температурні характеристики [101]. Такі показники можна отримати використовуючи методики розрахунку теплових та електричних сонячних колекторів.

Методики розрахунку та досліджень СК базуються на різноманітних математичних моделях, які повинні враховувати стандарти досліджень СК та надходження СЕ [70, 108]. Під час вибору методів випробувань СК дотримуються стандартів ISO [141, 142, 143, 144]. В Україні випробування СК виконують згідно норм ДСТУ [40, 49, 50, 51]. Для досліджень конструкцій СК застосовують натурні та лабораторні методи досліджень, які поділяють на стаціонарні та нестаціонарні [108].

Дослідження в лабораторних умовах проводяться за участі імітаторів СВ або без них. У випадку досліджень без імітатора СВ, СК розглядають як звичайний ТО [13]. Під час лабораторних досліджень дослідником не враховується зміна метеорологічних умов. На противагу цьому, натурні дослідження супроводжуються неврахованими факторами, які пов'язані із змінними умовами

довкілля. У зв'язку із цим, переважно лабораторні дослідження використовуються для визначення загального коефіцієнта втрат в СК, відносно теплової енергії, а натурні дослідження – для визначення його оптичних властивостей.

Для порівняння різних типів, видів і конструкцій СК використовують  $f$ -метод розрахунку системи сонячного теплопостачання [64].  $f$ -метод враховує дані довгострокових спостережень згідно характеристик математичної моделі для написання рівнянь регресії, що описують його залежність від величини двох безрозмірних комплексів. Першим комплексом є  $y$ -комплекс, що показує відношення сонячної радіації, яка була поглинута, до теплового навантаження за визначений же період (1.1) [32]:

$$y = \frac{F \cdot F_R \cdot (\overline{\tau \cdot \alpha}) \cdot j_{\text{пад}}^{\text{дн}} \cdot n}{J_{\text{нав}}^{\text{міс}}}, \quad (1.1)$$

де  $F$  – ССП,  $\text{м}^2$ ;  $F_R$  – коефіцієнт відведення теплової енергії;  $\overline{\tau \cdot \alpha}$  – усереднена приведена поглинальна здатність (де  $\tau$  – пропускна здатність системи покриття для розрахункового кута надходження СВ;  $\alpha$  – направлена поглинаюча здатність поглинаючого покриття [32]);  $j_{\text{пад}}^{\text{дн}}$  – денний інтегральний потік падаючої теплової енергії,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ ;  $n$  – кількість днів в місяці;  $J_{\text{нав}}^{\text{міс}}$  – місячне навантаження потоку теплової енергії,  $\text{кДж}$ .

Другим комплексом є  $x$ -комплекс, що показує відношення теплових втрат сонячного колектора за місяць дотримуючись певної базової температури до місячного теплового навантаження (1.2) [32]:

$$x = \frac{F \cdot F_R \cdot K_{\text{СПП-д}} \cdot (t_{\text{баз}} - t_{\text{д}}^{\text{міс}}) \cdot \Delta\tau}{J_{\text{нав}}^{\text{міс}}}, \quad (1.2)$$

де  $K_{\text{СПП-д}}$  – коефіцієнт теплопередачі між СПП та довкіллям,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{баз}}$  – базова температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{д}}^{\text{міс}}$  – температура довкілля за місяць,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\tau$  – кількість секунд за місяць,  $\text{с}$ .

$f$ -метод вважається найуніверсальнішим, проте не є зручним через складність при виконанні оптимізаційних розрахунків [32].

Характеристика ступеня теплової ефективності (теплового коефіцієнта корисної дії) сонячного колектора визначається за формулою (1.3):

$$\eta_{\text{ТСК}} = \eta_0 - U_{\text{конв}} \cdot X - U_{\text{випром}} \cdot I_{\text{в}} \cdot X^2, \quad (1.3)$$

де  $\eta_0$  – ступінь ефективності колектора за відсутності теплових втрат;  $U_{\text{конв}}$  і  $U_{\text{випром}}$  – коефіцієнти теплових втрат, які враховують конвекцію та випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $I_{\text{в}}$  – інтенсивність СВ, Вт/м<sup>2</sup>;  $X$  – відношення перепаду температур між СПП СК  $t_{\text{СПП}}$ , °C і температурою довкілля  $t_{\text{Д}}$ , °C, до величини  $I_{\text{в}}$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Формула (1.3) є доцільною для теплових сонячних колекторів із повітряним теплоносієм.

ККД поглинальної здатності СК визначають за формулою (1.4):

$$\eta = F_R^{\text{сп}} \left[ (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_{\text{пов}} \cdot (\bar{t} - t_{\text{Д}})}{I_{\text{в}}} \right], \quad (1.4)$$

де  $F_R^{\text{сп}}$  – коефіцієнт відведення теплової енергії (згідно Європейською практикою);  $U_{\text{пов}}$  – повний коефіцієнт теплопередачі тепловтрат СК, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $\bar{t}$  – усереднена температура сонячного колектора, °C;  $t_{\text{Д}}$  – температура довкілля, °C.

Рівняння (1.4) встановлює лінійний зв'язок між ККД СК і приведеною температурою за умови, що повний коефіцієнт теплопередачі тепловтрат СК є сталою величиною.

За натурних досліджень, згідно рекомендацій американської професійної асоціації ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ККД СК можна визначити за допомогою рівняння (1.5):

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_{\text{пов}} \cdot \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{Д}}}{I_{\text{в}}}, \quad (1.5)$$

де  $F_R$  – коефіцієнт відведення теплової енергії за американською практикою.

ККД ТСК визначають за невідомого значення коефіцієнта відведення теплоти від ТСК як відношення повної теплопродуктивності ТСК до обсягу інтенсивності сонячного випромінювання, яке надходить на СК в цілому (1.6):

$$\eta_{\text{ТСК}} = \frac{q_{\text{пов}}}{I_{\text{в}}}, \quad (1.6)$$

де  $q_{\text{пов}}$  – приведена повна теплопродуктивність ТСК, Вт/м<sup>2</sup>, яку отримуємо з рівняння (1.7):

$$q_{\text{пов}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{ТСК}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.7)$$

де  $\dot{m}$  – приведена масова витрата через сонячний колектор, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Отже, основними критеріями, що впливатимуть на ККД СК є [55, 56]:

1. Інтенсивність надходження СЕ на СПП та ТД;
2. Конструктивні характеристики СК, його світлопропускні та теплосприймаючі властивості;
3. Початково встановлені робочі характеристики СК: витрата теплоносія, ТТ на вході, кут встановлення СК.

На ефективність СК, в цілому, впливає одночасна зміна азимута чи кута нахилу ССП СК по відношенню до падаючого теплового потоку [114]. Окрім цього, можуть впливати метеорологічні чинники: напрямок, швидкість та повторюваність вітру, забруднення пилом та затінення. Таким чином, за кута нахилу СК 0-50° відносно горизонту вплив забруднення може досягнути  $\approx 5\%$  [6]. Для сонячного колектора з фотоелементами існують інші методики розрахунку його параметрів.

### **1.6.2 Методики для розрахунку параметрів фотоелектричного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання**

Основними характеристиками ФЕ є: інтегральна чутливість, спектральна характеристика, вольт-амперна характеристика (ВАХ), ККД ФЕ (у значенні коефіцієнта перетворення сонячного випромінювання) [12, 103].

Окремо необхідно зазначати зовнішні параметри від яких залежить функціонування ФЕ: падаючий світловий потік на ФЕ ( $\Phi$ ), температура ФЕ ( $t_{\text{ФЕ}}$ ).

До внутрішніх параметрів належать: напруга холостого ходу (XX)  $U_{XX}$  і фотострум КЗ  $I_{КЗ}$ . Отже, вихідними параметрами є вихідна напруга, фотострум навантаження і вихідна потужність [66].

Світловий потік складається з хвиль різної довжини та відповідає спектральному складу випромінювання вольфрамової лампи, нитка якої розжарена до температури  $2840^{\circ}\text{K}$  [9]. Інтегральна чутливість визначається відношенням величини фотоструму КЗ  $I_{КЗ}$  до одиниці світлового потоку (1.8):

$$i = \frac{I_{КЗ}}{\Phi}, \text{ А/лм.} \quad (1.8)$$

Спектральна характеристика визначається величиною фотоструму КЗ  $I_{КЗ}$ , який виникає під час надходження на ФЕ одиниці потоку променевої енергії, що складається з хвиль однієї довжин (монохроматичне випромінювання) [12].

Ефективність перетворення СЕ в ФСК зменшується через відносно велике значення відбивання від поверхні ФСК [96]. Кількість поглиненого СВ визначається за різницею між кількістю падаючого, пропущеного і відбитого СВ. Згідно з теорією взаємодії оптичного випромінювання з речовиною відомо, що коефіцієнти поглинання, пропускання і відбивання в сумарному значенні становлять 1. Найбільше значення коефіцієнта поглинання для ФСК визначає його максимальну ефективність, що відповідає «найчорнішому» матеріалу серед темних кольорів активної поверхні ФСК (монокристали Si).

Залежно від особливостей будови фотоелектричних перетворювачів, сучасні методики визначення робочих параметрів ФСК враховують температурний коефіцієнт, що змінюється залежно від пори року (взимку ближче до 0.7, влітку – до 0.5) [62].

Відомо, що кінетична енергія електронів, що рухаються під дією світла залежить тільки від частоти падаючого світла і не залежить від величини світлового потоку. Якщо частота світла менша від мінімальної частоти для даної речовини, то явища фотоефекту не відбувається і називається червоною межею фотоефекту.

Погодинну кількість електричної енергії (продуктивність), що згенерована ФСК, розраховують за формулою (1.9) або (1.10) [61]:

$$E_{\text{ФСК}} = \int_0^{3600} P_{\text{ФСК}} dt, \text{ Вт}\cdot\text{год}, \quad (1.9)$$

$$E_{\text{ФСК}} = \eta_{\text{ФСК}} \cdot F_{\text{ФСК}} \cdot W, \text{ Вт}\cdot\text{год}, \quad (1.10)$$

де  $\tau$  – час, с;  $\eta_{\text{ФСК}}$  – електрична ефективність ФСК;  $F_{\text{ФСК}}$  – СПП ФСК,  $\text{м}^2$ ;  $W$  – енергія погодинного надходження СВ на одиницю площі ФСК,  $(\text{Вт}\cdot\text{год})/\text{м}^2$ ,  $P_{\text{ФСК}}$  – потужність ФСК, Вт.

Принцип оцінки ефективності ФЕ полягає в обчисленні відношення добутку вихідних електричних характеристик, які генерує ФЕ в точці максимальної потужності (МП), до потужності падаючого світлового потоку [123, 130].

Залежність зміни інтенсивності освітлення від струму короткого замикання  $I_{\text{кз}}$  можна зобразити графічно. Зокрема, з літературних даних [136] відомо, що найменші зміни інтенсивності викликають пропорційну зміну струму короткого замикання (рис. 1.19).

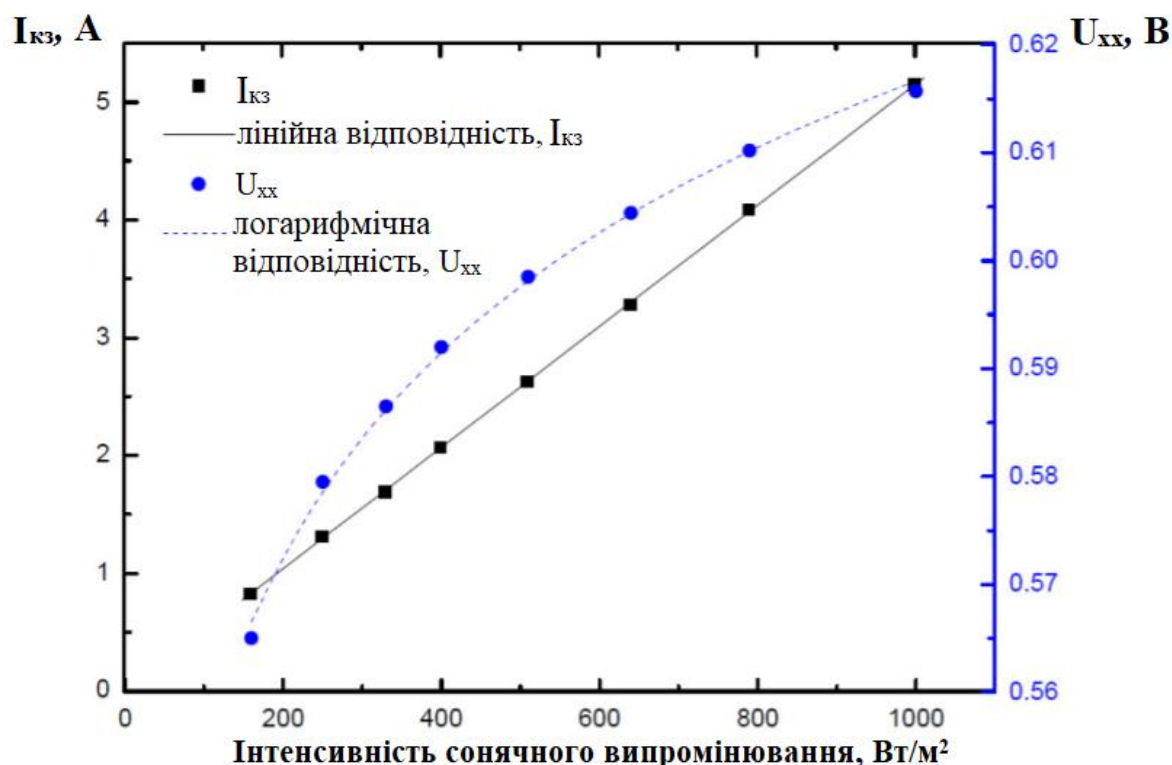


Рисунок 1.19 – Напруга розімкнутого ланцюга і струм короткого замикання в залежності від надходження інтенсивності СВ на сонячний колектор з полікристалічним кремнієм [136]

В результаті аналізу досліджень  $I_{\text{кз}}$  спостерігалось його лінійне збільшення за випромінювання в діапазоні 160-1000 Вт/м<sup>2</sup>. Ступінь зміни струму  $I_{\text{кз}}$  становить 0,8232 А при потужності випромінювання 160 Вт/м<sup>2</sup> і 5,1465 А – за 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Струм короткого замикання практично дорівнює фотоструму. Необхідно зазначити, що напруга розімкнутого ланцюга (холостого ходу) збільшується зі збільшенням випромінювання, але цей параметр є менш чутливим до інтенсивності, ніж струм короткого замикання.

Ефективність перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію розраховується за формулою (1.11):

$$\eta = \frac{P_{\text{макс}}}{F_{\text{ФСК}} \cdot I_{\text{в}}}, \quad (1.11)$$

де  $P_{\text{макс}}/F_{\text{ФСК}}$  – максимальна вихідна потужність ФСК, приведена до площі його поверхні, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{\text{в}}$  – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>.

Для розрахунку верхньої межі теоретичного ККД існує квантово-механічний та термодинамічний підходи. Перший підхід – високоточний, але потребує детального описання структури фотоперетворювача. Другий підхід – універсальний, оскільки верхня межа відбору максимальної потужності розраховується відповідно до законів термодинаміки [11].

Верхня межа, теоретично обрахованого ККД циклу Карно, розраховується за формулою (1.12) [11]:

$$\eta = \left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right) \cdot \left[1 - \frac{\ln\left[\frac{E_g}{k \cdot t_2} \cdot \left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right) + 1\right]}{\frac{E_g}{k \cdot t_2} \cdot \left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right)}\right], \quad (1.12)$$

де  $t_1$  – температура СВ, яку приймають ідентичною до температури абсолютно чорного тіла;  $t_2$  – температура ФЕ;  $E_g$  – енергія поглинутих фотонів.

ККД у циклі Карно залежить в основному, від значення ширини забороненої зони напівпровідника  $E_g$ , температури структури ФЕ та випромінювача ( $t_2$  і  $t_1$ ) [11].

Значення  $I_{\text{кз}}$  збільшується за умов використання напівпровідників із меншою

шириною забороненої зони. За цих умов підвищується частка фотонів в СВ, тоді як  $U_{xx}$  залежить від висоти потенціального бар'єру в  $p-n$  переході. Цей показник збільшується відповідно до розширення забороненої зони напівпровідника.

Для одержання теоретично розрахованих значень фотоструму та ВАХ ФЕ, необхідно вирішити систему рівнянь, які описують процес генерації нерівноважних носіїв в освітленій напівпровідниковій структурі з  $p-n$  переходом [11]. Згідно міжнародних періодичних видань, варто звернути увагу на те, що науковці використовують статичні (неперервні), динамічні або імпульсні методи вимірювання ВАХ [174]. Залежно від ФЕ розрізняють ізотермічні та ізодинамічні методи вимірювання. Ізотермічні вимірювання ВАХ використовуються у імпульсних методах, ізодинамічні – застосовують з метою підтримання незмінного заряду на енергетичних рівнях ФЕ. Виділяють статичні, динамічні та квазістатичні методи замірів ВАХ, які узалежнені від часу і можуть бути виконані вручну або автоматично [135, 150].

Ці методики скеровані на розрахунок технічних параметрів окремо для ТСК або для ФСК, однак на їхній основі можна розробити спільні методи розрахунку основних величин для гібридного сонячного колектора.

## **Висновки до Розділу 1**

1. Доведено, що з метою зменшення обсягу використання викопного палива на потреби енергопостачання будівель та споруд перспективним рішенням є використання енергії Сонця, у зв'язку з чим, проаналізовано ряд розроблених конструкцій теплових та фотоелектричних сонячних колекторів, що постійно вдосконалюються.

2. Визначено переваги, недоліки та способи використання сучасних установок для перетворення сонячної енергії в теплову та електричну під час їхнього проектування та експлуатації в системах енергопостачання будівель та споруд. Показано необхідність вдосконалення цих систем за енергетичними, техніко-економічними та архітектурно-конструктивними показниками.



3. Аналіз сучасних тенденцій в архітектурі та будівництві показав, що набувають поширення будівлі та споруди із скляними фасадами, які мають збільшений коефіцієнт скління, що призводить до зниження енергоефективності цих будівель і, як наслідок, необхідності здійснення додаткових заходів, зокрема, покращення теплотехнічних показників та підвищення рівня використання сонячної енергії, що на них надходить.

4. Проаналізовано методи підвищення енергоефективності будівель із скляними фасадами будівель та споруд. Здійснено верифікацію видів скла, селективних матеріалів та склопакетів, згідно їхньої класифікації. Обґрунтовано можливість використання склопакетів, які містять органічне скло із селективним покриттям в конструкції гібридного сонячного колектора, що суміщений із світлопрозорим фасадом будівлі.

5. Наведено переваги геліосистем та встановлено, що сонячні колектори екологічно-безпечні для довкілля, потребують мінімального рівня технічного обслуговування, надійні у експлуатації. Тому, економічно-вигідним, екологічним та енергоефективним рішенням таких систем є поєднання теплових та фотоелектричних сонячних колекторів в єдину конструкцію для енергозабезпечення будівлі.

6. На сьогодні інноваційне бачення розвитку систем сонячного енергопостачання полягає в їхньому поєднанні з світлопрозорими фасадами будівель та споруд для їх енергозабезпечення.

7. В результаті комплексного аналізу літературних даних щодо інтегрування геліосистем в світлопрозорі конструкції будівель доведено, що на сьогодні не існує енергоефективних конструктивних рішень та єдиної методики розрахунку таких систем, а тому виникає потреба в проведенні подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

## **РОЗДІЛ 2**

### **АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА**

В розділі наведена розроблена комп'ютерна модель теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора як ультрасучасного рішення енергопостачання будівель та споруд, що дала змогу визначити його оптичні характеристики. Встановлено аналітичні залежності для розрахунку сумарної сонячної інтенсивності залежно від географічної широти та орієнтацій відносно сторін горизонту для визначення енергопродуктивності геліосистеми. Запропоновано спрощену математичну модель процесів теплообміну в тепловому та фотоелектричному гібридному сонячному колекторі із визначенням його теплових та електричних характеристик.

#### **2.1 Розроблення конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора (ТФГСК)**

Узагальнюючи дані наведені в Розділі 1, можна стверджувати, що ССЕР дозволяють одночасно ефективно генерувати електричну і теплову енергію, та дають змогу використовувати їх за різним призначенням кінцевим споживачем. Отже, такі властивості можна застосувати у спільному схемному рішенні, а саме об'єднати конструкцію ФСК та ТСК для ССЕР. Крім цього, враховуючи зростаючу тенденцію спорудження ультрасучасних світлопрозорих фасадів будівель, виникла ідея суміщення гібридного сонячного колектора із світлопрозорим фасадом будівлі. Для вирішення поставленого завдання, в галузі будівництва та архітектури, оптимальним рішенням є розроблення конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора (ТФГСК).

З метою дослідження теплових та електричних характеристик запропонованої конструкції розроблено комп'ютерну модель ТФГСК. Розроблена модель конструкції на етапі теоретичних досліджень сприятиме ефективному вирішенню ряду задач, перед практичним застосуванням [14].

На рисунку 2.1 наведено комп'ютерну модель запропонованої конструкції ТФГСК, в моделі якого фотоелектричні елементи нанесені на горизонтальні ролети. Таке рішення конструкції є практичним для споруд, в яких функцію штор виконують ролети горизонтального типу. Фотоелементи, які нанесені на ролети та з'єднані в конструкцію ФСК, виконують функцію штор на світлопрозорих конструкціях. Звичайне засклення рекомендоване для житлових будівель менше, ніж 18 %, а для громадських будівель – 25 % залежно від архітектурно-будівельного кліматичного району [33]. Однак, під час проектування будівель цей коефіцієнт може бути завищений, що потребує обов'язкового сонцезахисту на конструкціях будівель.

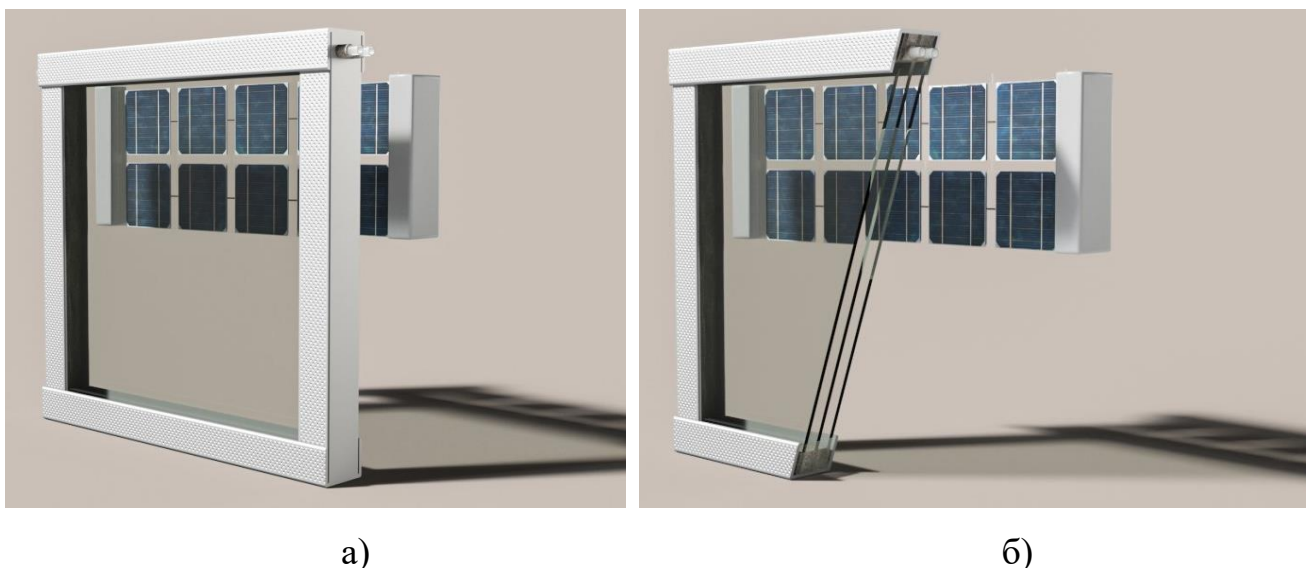
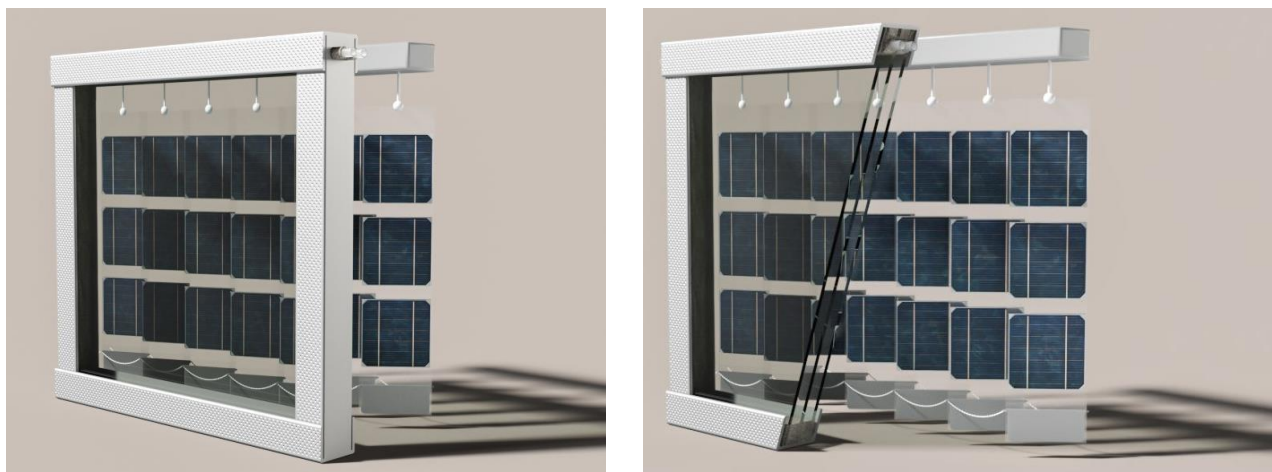


Рисунок 2.1 – Комп'ютерна модель теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що містить ролети горизонтального типу:

а – конструкція ТФГСК; б – розріз конструкції ТФГСК

Окрім цього, таке рішення буде додатковим захистом для будівель, що за технологічними нормами не потребують підвищеної інсоляції. Напрямок влаштування фотоелементів та їхній розмір для конструкції ТФГСК розраховується згідно геометричних параметрів, які встановлюються за комплексними сонячними картами [46].

На практиці також можуть бути використані ролети вертикального типу в конструкції запропонованого ТФГСК (рис. 2.2).



а)

б)

Рисунок 2.2 – Комп’ютерна модель теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що містить ролети вертикального типу:

а – конструкція ТФГСК; б – розріз конструкції ТФГСК

Отже, потрібні подальші дослідження запропонованої конструкції ТФГСК, фотоелемент якого виконує роль ролетів вертикального типу [19].

## 2.2 Визначення оптичних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора

Світлопрозорий фасад будівлі, що суміщений з ТФГСК, доцільно проектувати і розраховувати за умов достатнього надходження СВ. Однак, необхідно враховувати те, що зі збільшенням кількості світлопропускних шарів в колекторі, їхнє загальне пропускання світлового потоку до ФЕ буде зменшуватись.

Доцільність встановлення ТФГСК рекомендовано оцінювати за допомогою частки теплового навантаження (коефіцієнту заміщення  $f$ ) в загальній системі енергопостачання. Коефіцієнт заміщення  $f$  в кожному конкретному випадку має підтверджуватись ТЕО (див п. 4.2) [183].

Для ТФГСК, який генерує теплову і електричну енергію, необхідно прийняти, що тепла складова є пріоритетною в розрахунках. Визначення питомої теплопродуктивності як основної величини під час розрахунку коефіцієнту заміщення, потребує встановлення ряду теплотехнічних параметрів ТФГСК.

Водночас цей розрахунок може використовуватися як основа для визначення гідродинамічних і конструктивних параметрів ТФГСК.

Для подальшого математичного розрахунку, прийнято ряд спрощень та гіпотетичних умов, таких як:

- ефективність водяного теплообмінника  $\eta_{ТО}$  становить 0.6;
- обсяг БА, що приведений на площу поверхні ТФГСК, дорівнює  $70 \text{ л/м}^2$ ;
- коефіцієнт заломлення сонячного випромінювання в склі – 1.526, а в склі з селективним покриттям – 1.49;
- коефіцієнт екстинкції скла –  $18 \text{ м}^{-1}$ ;
- ефективність повітряного теплообміну  $\eta_{ПТ}$ , що задовільняє умову  $\eta_{ПТ} C_{\text{мін}} / \lambda_v \geq 2$ , де  $C_{\text{мін}}$  буде найменшим із водяних еквівалентів повітряного теплообміну [48, 75].

Кількість теплової енергії конструкції ТФГСК за секунду визначається за термодинамічною формулою (2.1) [59]:

$$Q_{\text{ТФГСК}} = q_{\text{ТФГСК}} \cdot F_{\text{ТФГСК}}, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

де  $Q_{\text{ТФГСК}}$  – кількість теплової потужності, що згенерує ТФГСК, Вт;  
 $F_{\text{ТФГСК}}$  – СПП ТФГСК,  $\text{м}^2$ .

Теплопродуктивність, в цілому, є функцією параметрів:

1. географічних і кліматичних даних ( $\varphi, j, t_{\text{Д}}$ );
2. технічних характеристик запропонованого ТФГСК ( $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}, (\tau \cdot \alpha), F_R, \varepsilon$ );
3. режимних характеристик ( $t_{\text{ВХ}}^{\text{ТФГСК}}, t_{\text{ВИХ}}^{\text{ТФГСК}}, G, \dot{m}$ );
4. параметрів ССТ ( $\eta_{ТО}, \nu_{\text{БА}}, f$ ).

де  $\varphi$  – географічна широта, град;  $j$  – інтегральний потік теплової енергії,  $\text{кДж/м}^2$ ;  
 $t_{\text{Д}}$  – ТД,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  – коефіцієнт теплопередачі тепловтрат ТФГСК,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;  
 $(\tau \cdot \alpha)$  – приведена поглинальна здатність ТФГСК (де  $\tau$  – пропускна здатність системи покриття за розрахункового кута надходження СВ;  
 $\alpha$  – направлена поглинаюча здатність покриття [32]);  $F_R$  – коефіцієнт відведення

теплової енергії від ТФГСК;  $\varepsilon$  – ступінь селективності поверхні ТФГСК в діапазоні робочих ТТ;  $t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}}$  – ТТ на вході в ТФГСК, °С;  $t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}$  – ТТ на виході з ТФГСК, °С;  $\eta_{\text{ТО}}$  – ефективність рідинного ТО;  $\nu_{\text{БА}}$  – обсяг БА, що приведений на площу поверхні ТФГСК, л/м<sup>2</sup>;  $f$  – частка енергії, що забезпечується СЕ за необхідного споживання енергії (коефіцієнт заміщення);  $G$  – витрата теплоносія, кг/с.

Для вертикального фасаду параметр  $I_{\text{верт}}$ , МДж/м<sup>2</sup>, можна встановити із графічного співвідношення сумарної сонячної інтенсивності та географічної широти (рис. 2.3) [20, 53], яке було побудовано за результатами вимірів мережі актинометричних станцій України [45].

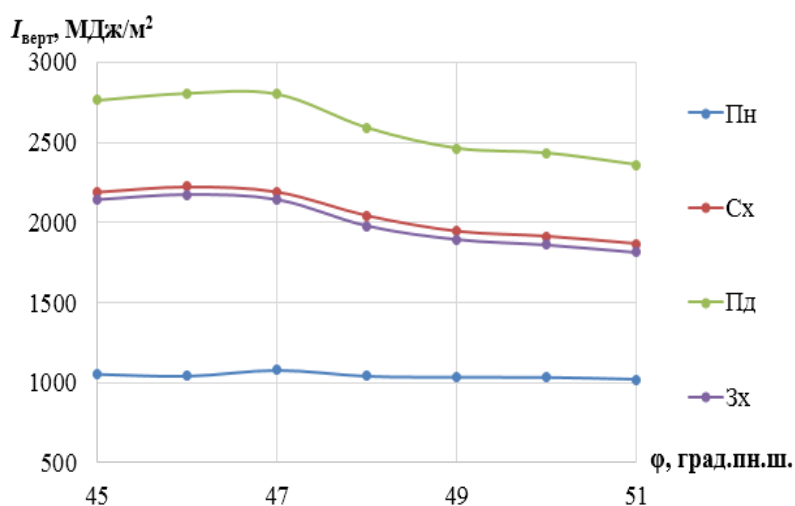


Рисунок 2.3 – Сумарна річна сонячна інтенсивність, що надходить на вертикальну поверхню  $I_{\text{верт}}$ , МДж/м<sup>2</sup> залежно від географічної широти  $\varphi$ , град пн. ш. та орієнтацій відносно сторін горизонту

На основі отриманих графічних залежностей, встановлено аналітичні залежності для розрахунку сумарної сонячної інтенсивності, залежно від географічної широти та орієнтацій відносно сторін горизонту (2.2 а-г):

$$I_{\text{верт}}^{\text{Пн}} = -1.6246 \cdot \varphi^2 + 149.98 \cdot \varphi - 2406.8, \text{ МДж/м}^2; \quad (2.2\text{а})$$

$$I_{\text{верт}}^{\text{Пд}} = -6.4532 \cdot \varphi^2 + 537.56 \cdot \varphi - 8308.1, \text{ МДж/м}^2; \quad (2.2\text{б})$$

$$I_{\text{верт}}^{\text{Зх}} = -2.8482 \cdot \varphi^2 + 207.57 \cdot \varphi - 1391.1, \text{ МДж/м}^2; \quad (2.2\text{в})$$

$$I_{\text{верт}}^{\text{Сх}} = -3.4843 \cdot \varphi^2 + 268.49 \cdot \varphi - 2794.1, \text{ МДж/м}^2. \quad (2.2\text{г})$$

Отримані значення дозволяють додати їх в методику розрахунку комбінованої ССЕР суміщеної із скляним фасадом [17].

ТТ для  $i$ -тої години  $j$ -місяця можна визначити із співвідношення (2.3):

$$t_{Д(ij)} = t_j + 0.5 \cdot k_i \cdot A_j, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.3)$$

де  $t_j$  – середньодобова температура  $j$ -ого місяця,  $^\circ\text{C}$ ;  $A_j$  – середньодобова амплітуда коливань температури у  $j$ -ому місяці,  $^\circ\text{C}$ ;  $k_i$  – коефіцієнт перерахунку для  $i$ -ої години [47]. Коефіцієнт перерахунку для  $i$ -ої години можна знайти також за рівнянням (2.4), що було отримане з табличних значень [47], де  $\tau$  –  $i$ -та година доби від 8 до 21 години:

$$k_i = -4.12 + 0.7067 \cdot \tau - 0.0244 \cdot \tau^2. \quad (2.4)$$

Для встановлення характеристик запропонованого ТФГСК необхідно спочатку визначити його оптичні параметри. Тому, доцільно звернути увагу на методику розрахунку надходження СВ на поверхню світлового прорізу, оскільки це має безпосередній вплив на оптичну складову досліджуваного колектора.

Зокрема, приведену інтенсивність поглинутого СВ  $I_{\text{погл } i}$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , визначають за формулою (2.5), яка містить оптичні характеристики ТФГСК:

$$I_{\text{погл } i} = P_{\text{аз}} \cdot P_{\text{похил}} \cdot (\tau \cdot \alpha)_{\text{П}} \cdot I_{\text{П}}^{\text{гор}} + (\tau \cdot \alpha)_{\text{Р}} \cdot [P_{\text{Р}} \cdot I_{\text{Р}}^{\text{гор}} + P_{\text{В}} \cdot (I_{\text{П}}^{\text{гор}} + I_{\text{Р}}^{\text{гор}}) \cdot a], \text{ } \text{Вт}/\text{м}^2, \quad (2.5)$$

де  $P_{\text{аз}}$  – коефіцієнт, що враховує азимут розташування ТФГСК (для випадку Пд орієнтації ТФГСК відносно сторін горизонту  $P_{\text{аз}}=1$ );  $P_{\text{похил}}$  – коефіцієнт положення ТФГСК для прямого СВ;  $(\tau \cdot \alpha)_{\text{П}}$ ,  $(\tau \cdot \alpha)_{\text{Р}}$  – приведені оптичні характеристики СК для прямого та розсіяного СВ; оскільки  $(\tau \cdot \alpha)_{\text{П}}$  переважно наводять у паспортних характеристиках колектора, то  $(\tau \cdot \alpha)_{\text{Р}}$  можна визначити із співвідношення  $(\tau \cdot \alpha)_{\text{Р}} = 0,867 \cdot (\tau \cdot \alpha)_{\text{П}}$ ;  $I_{\text{П}}^{\text{гор}}$  – інтенсивність прямого СВ, що надходить на горизонтальну поверхню,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $P_{\text{Р}}$  – коефіцієнт положення ТФГСК для розсіяного СВ;  $I_{\text{Р}}^{\text{гор}}$  – інтенсивність розсіяного СВ, що надходить на горизонтальну поверхню,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $P_{\text{В}}$  – коефіцієнт положення ТФГСК відбитого СВ;  $a$  – альbedo (коефіцієнт відбиття) поверхні, на якій розташований ТФГСК (якщо відсутні дані щодо величини альbedo для матеріалів поверхні, то за умов наявності снігового покриву приймають величину  $a = 0.6$ , а за його відсутності –  $0.2$ ) [47].

Процес надходження СВ на поверхню ТФГСК загалом можна описати в три етапи: частину потоку  $I_{\text{Р}}$  відбиває зовнішня поверхня скла, внаслідок чого він

розсіюється в навколишньому середовищі; другу частину –  $I_\alpha$  скло поглинає; третя – пропущена частина потоку  $I_\tau$ , нагріваючись, надходить в приміщення, внутрішні огорожувальні поверхні якого поглинають більшу його частину. Ці величини можна регулювати застосовуючи різні технологічні рішення, наприклад, збільшуючи або зменшуючи кількість енергії, що відбивається [118].

Отже, у холодний період року, з метою зменшення тепловтрат на систему опалення (СО), економічно вигідно, якщо енергії надходить в приміщення більше через світлопрозору конструкцію, тоді як в літній період – навпаки, доцільніше щоб енергії надходило менше, оскільки тоді збільшуються витрати на кондиціонування повітря або вентиляцію.

Коефіцієнти відбивання, пропускання і поглинання сонячної радіації можна порахувати, якщо заміряти загальну падаючу, відбиту і пропущену радіацію. Оцінити в натурних умовах відбиту радіацію доволі складно, тому отримані дані часто є приблизними. Однак, неточність можна зменшити, якщо скористатись законом Бугера-Ламберта у розрахунках. Згідно з яким, інтенсивність плоскої монохроматичної хвилі після проходження крізь шар матеріалу товщиною  $\delta$ , м, узалежнена від її інтенсивності на вході в матеріал  $I_{в(пл)}$ , Вт/м<sup>2</sup>, та показника поглинання  $\alpha$  (2.6):

$$I_\tau = I_{в(пл)} \cdot e^{-\alpha \cdot \delta}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.6)$$

У випадку, коли світлопрозорий фасад будівлі розташований під кутом до поверхні землі, то інтенсивність СВ слід перерахувати з вертикальної (дані якої є нормованими) або з горизонтальної поверхні – на похилу, за формулою, що рівна сумі трьох складових – прямого, розсіяного і відбитого СВ (2.7) [128]:

$$I_{\text{похил}} = \left(1 - \frac{I_P^{\text{гор}}}{I}\right) \cdot S + \frac{I_P^{\text{гор}}}{I} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + a \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.7)$$

де  $I_P^{\text{гор}}$  – інтенсивність розсіяного СВ, яка надходить на горизонтальну поверхню, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого СВ з горизонтальної на похилу поверхню;  $\beta$  – кут нахилу скляного фасаду, °;  $a$  – коефіцієнт відбиття (альbedo) поверхні Землі і навколишніх тіл.



Встановлення даних, щодо пропускання, відбивання та поглинання СВ конструкцією ТФГСК є важливими параметрами для визначення теплової та електричної продуктивності ССЕР в основі якої є запропонована конструкція. Коефіцієнти пропускання, відбивання та поглинання СВ є функціями величини падаючого випромінювання, товщини матеріалу, показника заломлення і коефіцієнта екстинкції матеріалу. Тому, доцільно провести теоретичний аналіз для встановлення цих показників розробленого ТФГСК.

Потік СВ, що падає на прозору пластинку скла проходить три етапи: відбивання  $\rho$ , поглинання  $\alpha$  і пропускання  $\tau$  [38]. Для встановлення  $(\tau \cdot \alpha)$  необхідно скористатися співвідношенням (2.8), згідно закону Бугера, що враховує поглинання СВ в частково прозорому середовищі. Закон Бугера ґрунтується на припущенні, що випромінювання поглинається пропорційно локальній інтенсивності в середовищі і відстані  $x$ , яку випромінювання пройшло в середовищі (рис. 2.4) [72]:

$$dI_x = -I_x \cdot \kappa \cdot dx, \quad (2.8)$$

де знак « $\rightarrow$ » вказує на втрату енергії,  $\kappa$  – константа пропорційності (коефіцієнт екстинкції або коефіцієнт поглинання енергії) приймається сталою в сонячному спектрі, в шарі одиничної товщини, на відстані  $x$ .

Якщо ж інтегрувати по всій фактичній довжині шляху в середовищі, то можна розрахувати коефіцієнт пропускання СВ, що враховує втрати на поглинання у склі. Для скла значення  $\kappa$  змінюється залежно від матеріалу: від приблизно  $4 \text{ м}^{-1}$  для водянисто-білого скла (яке здається білим при погляді на кромку) до  $32 \text{ м}^{-1}$  для скла з високим вмістом оксиду заліза (зеленуватий відтінок кромки).

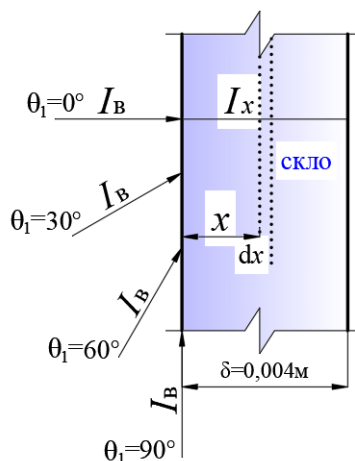


Рисунок 2.4 – Поглинання випромінювання у склі ТФГСК (згідно закону Бугера):

$I_B$  – інтенсивність СВ, Вт/м<sup>2</sup>;

$\theta_1$  – кут надходження сонячного

випромінювання, °;  $x$  – відстань, яку СВ

пройшло в середовищі, м;

$\delta$  – товщина матеріалу, м

Для конструкції ТФГСК, окремо необхідно розрахувати коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання, за допомогою методу трасування променів. Система рівнянь (2.9) є основною для встановлення загальних оптичних характеристик моделі ТФГСК. Вибраний об'єкт для моделювання його оптичних характеристик відрізняється рівнем деталізації. Вибір моделі залежить від поставлених задач. Тому, якщо колектор працює в обмеженому діапазоні умов, що вірно з практичної точки зору, то найпростіша модель є цілком придатною, відповідно до літературних даних [38, 128]. Коефіцієнт повного пропускання сонячного випромінювання для системи з прозорим покриттям у конструкції ТФГСК можна знайти за системою формул (2.9):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} = \frac{I}{I_B} = \exp\left(-\frac{\kappa_{\text{ТФГСК}} \cdot \delta_{\text{ТФГСК}} \cdot N}{\cos \theta_2}\right); \\ \tau_{rN}^{\text{ТФГСК}} = \left[ \begin{array}{l} 1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \\ 1 + (2N - 1) \cdot \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \\ 1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \\ + \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \end{array} \right] / 2, \text{ коли } \theta_2 > \theta_1, \end{array} \right. \quad (2.9)$$

де індекс  $\alpha$  інформує про те, що враховуються тільки втрати на поглинання; індекс  $r$  є нагадуванням про те, що враховуються втрати тільки на відбивання;  $\theta_1$  – кут надходження сонячного випромінювання, що надходить на покриття, згідно закону Снеліуса (Snellius), °;  $\theta_2$  – кут заломлення сонячного випромінювання, що надходить на покриття, згідно закону Снеліуса (Snellius), °;  $N$  – кількість шиб в конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.

Для падаючого неполяризованого випромінювання оптичні властивості визначають, в середньому, за двома компонентами: пропускання та поглинання.

Рівняння визначення пропускання СВ системою покриття спрощують. З цією метою зазначають, що останній член в рівнянні (2.9) і його еквівалент для паралельної компоненти поляризації становить приблизно 1. Оскільки, для використовуваних прозорих покриттів СК  $\tau_{\alpha N}$  менше 0.9, а відбивна здатність

покриття близька до 0.1, то рівняння (2.10) не можна застосувати для запропонованої конструкції ТФГСК:

$$\tau^{\text{ТФГСК}} \neq \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} \cdot \tau_{rN}^{\text{ТФГСК}} \rightarrow \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} \leq 0.9. \quad (2.10)$$

За умов урахування втрат при відбиванні і при поглинанні сонячного випромінювання коефіцієнти пропускання, відбивання і поглинання одного покриття, можуть бути визначені методом прямого випромінювання, як описано Зігелем (Siegel) і Хауеллом (Howell) (рис. 2.5) [172].

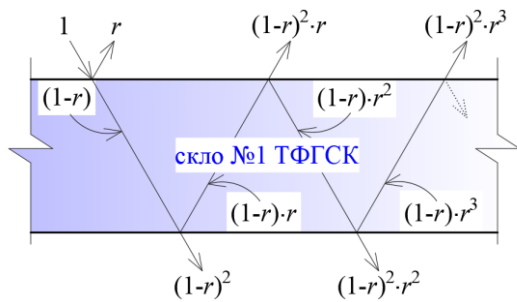


Рисунок 2.5 – Трасування променів в склі №1 конструкції ТФГСК за методом Зігеля і Хауелла

Для поляризованого сонячного випромінювання коефіцієнт перпендикулярного пропускання, поглинання та відбивання через скло можна описати системою рівнянь (2.11), що ґрунтується на методі прямого випромінювання [38]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} \frac{1 - r_{\perp}^{\text{ТФГСК}}}{1 + r_{\perp}^{\text{ТФГСК}}} \left[ \frac{1 - r_{\perp}^2{}^{\text{ТФГСК}}}{1 - (r_{\perp}^{\text{ТФГСК}} \cdot \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}})^2} \right], \\ \rho_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = r_{\perp}^{\text{ТФГСК}} \cdot \left( 1 + \tau_{\alpha N}^2{}^{\text{ТФГСК}} \cdot \frac{1 - r_{\perp}^{\text{ТФГСК}}}{1 + r_{\perp}^{\text{ТФГСК}}} \left[ \frac{1 - r_{\perp}^2{}^{\text{ТФГСК}}}{1 - (r_{\perp}^{\text{ТФГСК}} \cdot \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}})^2} \right] \right), \\ \alpha_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = (1 - \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}) \cdot \left( \frac{1 - r_{\perp}^{\text{ТФГСК}}}{1 - r_{\perp}^{\text{ТФГСК}} \cdot \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}} \right) \end{array} \right. \quad (2.11)$$

де  $r^{\text{ТФГСК}}$  – це показник відбивання сонячного випромінювання, що визначається як відношення падаючого сонячного випромінювання до відбитого.

Відбите випромінювання, за не перпендикулярного надходження, відрізняється для кожного компонента поляризації на межі двох середовищ (для конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора – це повітря/скло), тому передане і відбите випромінювання стає частково

поляризованим. Як наслідок, кожен компонент поляризації розглядається окремо, обов'язково з побудовою кутів заломлення в середовищі, що його пропускає.

Коефіцієнт пропускання  $\tau$  через скло без селективного покриття, що застосовується в конструкції ТФГСК для поляризованого сонячного випромінювання, можна описати формулою (2.12а):

$$\tau^{\text{ТФГСК}} = \frac{\tau_{\perp}^{\text{ТФГСК}} + \tau_{\parallel}^{\text{ТФГСК}}}{2}, \text{ коли } \theta_2 > \theta_1. \quad (2.12a)$$

Коефіцієнт пропускання визначається шляхом усереднення коефіцієнтів для паралельної і перпендикулярної складових поляризації, які можна розрахувати за системою (2.12б). Паралель і перпендикуляр належать площині, яка визначається падаючим променем і нормаллю поверхні.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} \cdot \frac{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}}{1 + \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}} \cdot \left[ \frac{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2}{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right) \times \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}} \right]^2; \\ \tau_{\parallel}^{\text{ТФГСК}} = \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} \cdot \frac{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}}{1 + \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}} \times \\ \times \left[ \frac{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2}{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right) \times \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}} \right]^2; \\ \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} = \frac{I}{I_B} = \exp \left( - \frac{\kappa_{\text{ТФГСК}} \cdot \delta_{\text{ТФГСК}}}{\cos \theta_2} \cdot N \right). \end{array} \right. \quad (2.12b)$$

Аналогічні розрахунки можна провести для визначення коефіцієнтів відбивання  $\rho^{\text{ТФГСК}}$  і поглинання  $\alpha^{\text{ТФГСК}}$ . Коефіцієнт відбивання  $\rho^{\text{ТФГСК}}$  визначається за рівнянням (2.13а) і дозволяє обрати селективний матеріал, який найбільш відповідний для конструкції ТФГСК, а також не буде зменшувати згенеровану теплову та електричну продуктивність запропонованої конструкції:

$$\rho^{\text{ТФГСК}} = \frac{\rho_{\perp}^{\text{ТФГСК}} + \rho_{\parallel}^{\text{ТФГСК}}}{2}, \text{ коли } \theta_2 \succ \theta_1. \quad (2.13a)$$

Коефіцієнт відбивання визначається шляхом усереднення коефіцієнтів відбивання для паралельної і перпендикулярної складових поляризації, які можна розрахувати за системою (2.13б):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \cdot \left[ 1 + \tau_{\alpha N}^2 \cdot \frac{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}}{1 + \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}} \times \right. \\ \left. \times \frac{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2}{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \times \tau_{\alpha N} \right)^2} \right]; \\ \rho_{\parallel}^{\text{ТФГСК}} = \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right) \times \\ \times \left[ 1 + \tau_{\alpha N}^2 \cdot \frac{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}}{1 + \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}} \times \right. \\ \left. \times \frac{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2}{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \times \tau_{\alpha N} \right)^2} \right]; \\ \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} = \frac{I}{I_B} = \exp\left(-\frac{\kappa_{\text{ТФГСК}} \cdot \delta_{\text{ТФГСК}} \cdot N}{\cos \theta_2}\right). \end{array} \right. \quad (2.13б)$$

Коефіцієнт поглинання  $\alpha^{\text{ТФГСК}}$  визначається рівнянням (2.14а):

$$\alpha^{\text{ТФГСК}} = \frac{\alpha_{\perp}^{\text{ТФГСК}} + \alpha_{\parallel}^{\text{ТФГСК}}}{2}, \text{ коли } \theta_2 \succ \theta_1. \quad (2.14a)$$

Для конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, цей показник є важливою характеристикою, оскільки його встановлення дозволяє обчислити втрачену кількість сонячного випромінювання при проходженні через середовище.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\perp}^{\text{ТФГСК}} = (1 - \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}) \cdot \left[ \frac{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right)}{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \times \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}} \right], \\ \alpha_{\parallel}^{\text{ТФГСК}} = (1 - \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}) \cdot \left[ \frac{1 - \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}}{1 - \left( \frac{1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)}{1 + \cos 2(\theta_2 - \theta_1)} \times \frac{1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)} \right) \cdot \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}}} \right], \\ \tau_{\alpha N}^{\text{ТФГСК}} = \frac{I}{I_B} = \exp\left(-\frac{\kappa_{\text{ТФГСК}} \cdot \delta_{\text{ТФГСК}} \cdot N}{\cos \theta_2}\right). \end{array} \right. \quad (2.146)$$

На основі вищенаведених формул було встановлено коефіцієнти пропускання  $\tau$  та поглинання  $\alpha$  для системи з трьох шиб прозорого скла без селективного покриття в конструкції ТФГСК (рис. 2.6).

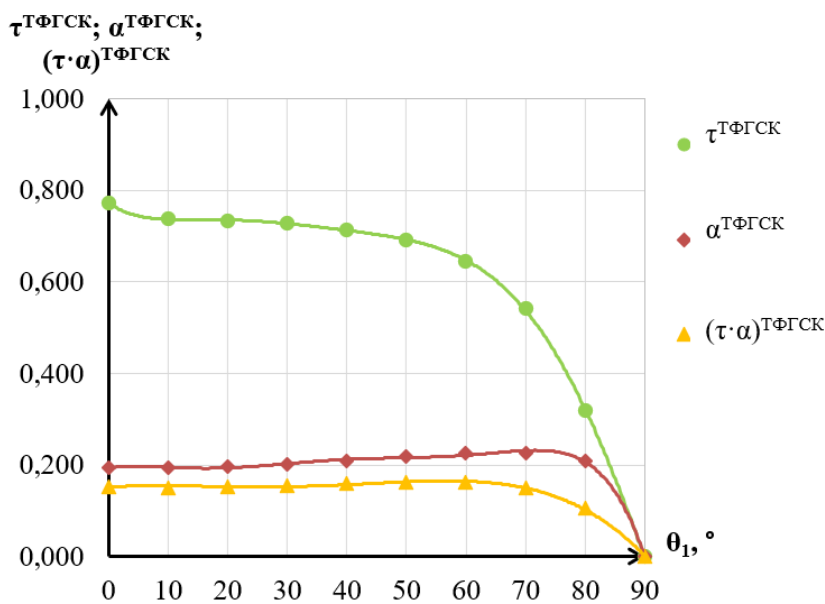


Рисунок 2.6 – Модель взаємодії оптичних коефіцієнтів в конструкції ТФГСК, що містить 3 шиб без селективного покриття

Аналогічно визначено поглинальну здатність ТФГСК. Застосовуємо спрощення коефіцієнту розсіяного відбивання  $\rho_p = 1 - \tau_r$ , тоді  $(\tau \cdot \alpha)$  розраховуємо за формулою (2.15):

$$(\tau \cdot \alpha) = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_p}. \quad (2.15)$$

Отриманий коефіцієнт у формулі (2.15) допомагає охарактеризувати оптичні характеристики конструкції ТФГСК за умов отримання сонячного випромінювання прозорим покриттям.

У випадку зміни кута надходження сонячного випромінювання на систему, яка складається з 3 шиб від  $0^\circ$  до  $80^\circ$ , коефіцієнт пропускання в середньому становить 0.654, що приблизно в 3 рази перевищує коефіцієнт відбивання. При цьому коефіцієнт поглинальної здатності сонячного випромінювання становить 0.150, ці дані дозволяють в подальшому встановити енергетичну продуктивність конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.

На рисунку 2.7 наведено дані оптичних характеристик коефіцієнта ТФГСК, що містить у своїй конструкції 4 шиб без селективного покриття.

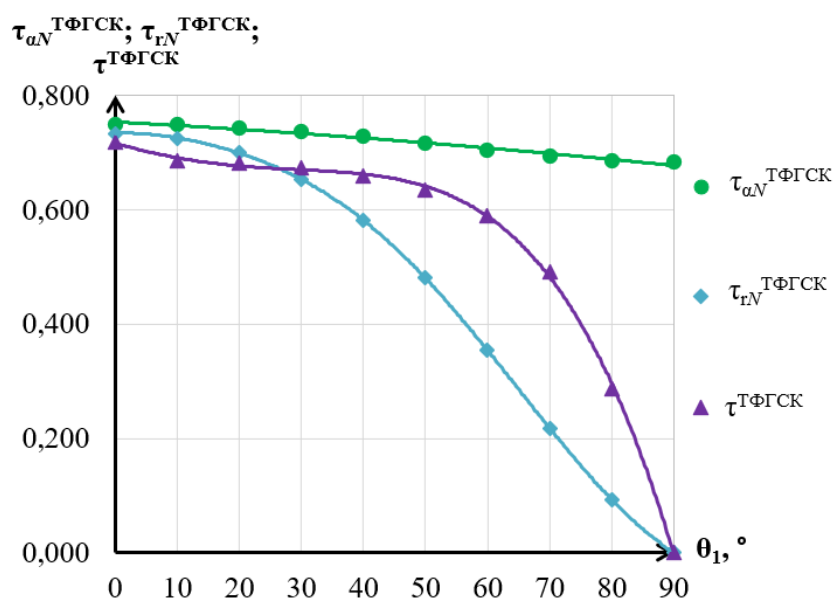


Рисунок 2.7 – Модель взаємодії оптичних коефіцієнтів у конструкції ТФГСК, що містить 4 шиб без селективного покриття

Аналогічно побудовано графічні залежності коефіцієнта пропускання СВ в залежності від його кута надходження на поверхню ТФГСК, що містить 5 шиб (рис. 2.8). Проте слід звернути увагу, що загальний коефіцієнт пропускання залежно від кількості шиб суттєво змінюється. Коефіцієнт пропускання зменшується із збільшенням кількості шиб і враховує втрати тільки на поглинання. Ця властивість коефіцієнта узалежнена від повного коефіцієнта пропускання.

Коефіцієнт, що враховує втрати тільки на поглинання за зміни кутів надходження СВ на поверхню конструкції ТФГСК зменшується

не більше ніж 10 % (рис. 2.8). Такий показник, згідно даних літератури, залежить від якості скла для вибраного типу конструкції ТФГСК [38].

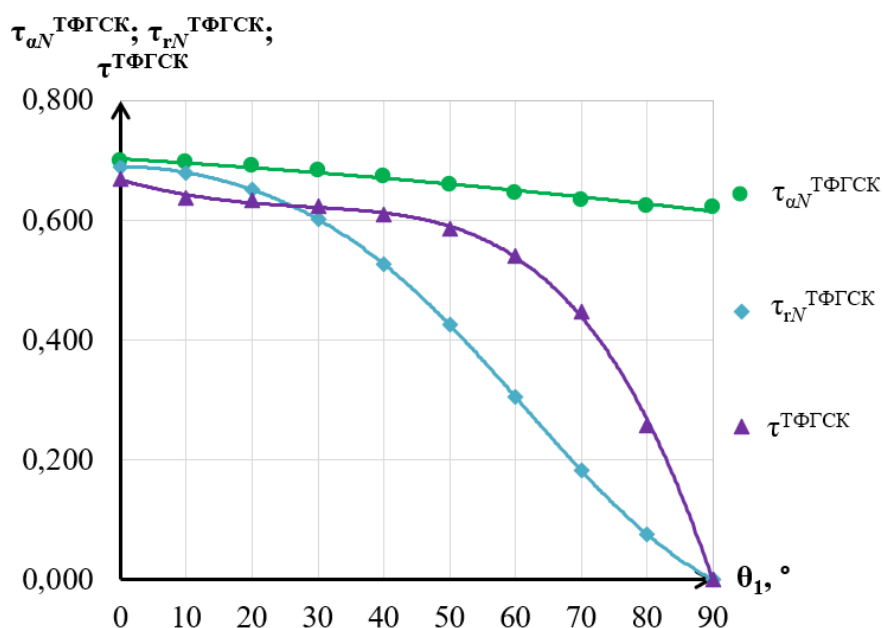


Рисунок 2.8 – Модель взаємодії оптичних коефіцієнтів у конструкції ТФГСК, що містить 5 шиб без селективного покриття

Іншим варіантом конструкції ТФГСК є наявність селективного покриття.

Також, було визначено співвідношення приведеної поглинальної властивості конструкції ТФГСК до здатності поглинання нею по нормалі. Встановлено, що поглинальна здатність конструкції ТФГСК з селективним покриттям, що містить 5 шиб скляного покриття, змінюється залежно від зміни кута надходження сонячного випромінювання (рис. 2.9).

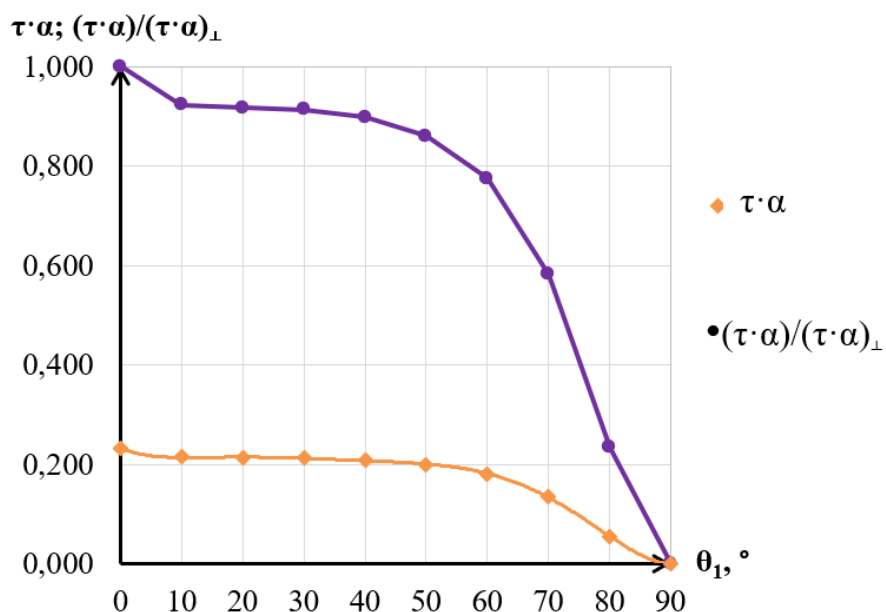


Рисунок 2.9 – Поглинальна здатність конструкції ТФГСК із селективним покриттям, що містить 5 шиб



Співвідношення показника  $(\tau \cdot \alpha)/(\tau \cdot \alpha)_{\perp}$  отримане на рисунку 2.9, не залежить від параметрів коефіцієнта екстинкції скла та його товщини. Відомо, що цей показник можна застосовувати для всіх покриттів, що мають показник заломлення, близький до показника заломлення скла. Співвідношення цього показника залежно від кутів надходження сонячного випромінювання відображається кривою Клейна [38]. Отримана крива Клейна збігається з результатами отриманими при незалежному знаходженні кутової залежності  $\tau$  і  $\alpha$ , та дозволяє встановити теплопродуктивність ТФГСК.

Окрему увагу, було приділено співвідношенню приведеної поглинальної здатності конструкції ТФГСК до поглинальної здатності, що надходила по нормалі на поверхню абсорбера конструкції ТФГСК, та яка є ключовою у перспективі подальших досліджень. Співвідношення цих залежностей показує наскільки добре підібрана кількість покриттів в системі, коефіцієнт екстинкції скла та сприйнятність до гострих кутів надходження сонячного випромінювання на поверхню ТФГСК. Визначено, що усереднена оптична поглинальна здатність конструкції ТФГСК із селективним покриттям становить 0,185.

Варто звернути увагу, що за встановлення оптичних характеристик запропонованих конструкцій ТФГСК, а саме коефіцієнтів пропускання, поглинання та відбивання СВ не було враховано вплив експлуатаційних характеристик та метеорологічних параметрів на поверхню запропонованої конструкції, а саме: забруднення поверхні ТФГСК, опади, пил тощо.

Отримані системи рівнянь для визначення оптичних характеристик дають змогу моделювати конструкції ТФГСК залежно від величини падаючого СВ, товщини матеріалу, показника заломлення, коефіцієнта екстинкції матеріалу та кількості шиб. Результат обрахунків дав змогу встановити теплову та електричну ефективність конструкції ТФГСК [168].

Проте, визначення теплотехнічних характеристик ТФГСК  $U_{\text{пов}}$  та  $F_R$  додатково потребує побудови спрощеної математичної моделі процесів теплообміну в ТФГСК.

### 2.3 Створення спрощеної математичної моделі процесів теплообміну в тепловому та фотоелектричному гібридному сонячному колекторі

З метою встановлення технічних характеристик запропонованого ТФГСК було створено спрощену математичну модель в системі сонячного енергопостачання на основі показників його теплової продуктивності (рис. 2.10).

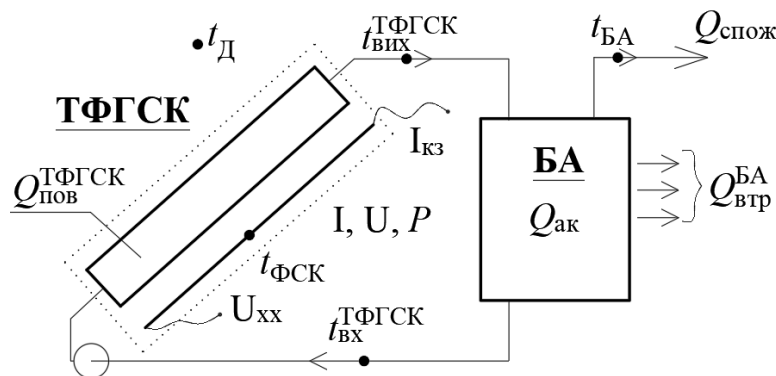


Рисунок 2.10 – ССЕП для розрахунку спрощеної математичної моделі:

$t_{вх}^{ТФГСК}$ ,  $t_{вих}^{ТФГСК}$  – температури теплоносія на вході та виході конструкції ТФГСК, відповідно, °С;  $t_{БА}$  – температура теплоносія на виході з БА, °С;  $t_{д}$  – температура довкілля, °С;  $Q_{пов}^{ТФГСК}$  – теплова потужність, що згенерована ТФГСК, Вт;  $Q_{спож}$  – теплова потужність, що постачається споживачу, Вт;  $Q_{ак}$  – теплова потужність, що акумулюється в БА, Вт;  $Q_{втр}^{БА}$  – теплова потужність, що втрачається БА, Вт;  $I_{кз}$  – струм короткого замикання, А;  $U_{хх}$  – напруга холостого ходу, В;  $I$  – фотострум, А;  $U$  – напруга, В;  $P$  – електрична потужність, Вт

Для створення математичної моделі конструкції ТФГСК в ССЕП було використано стаціонарні методи досліджень ТФГСК, підґрунтям яких є модель Хоттеля (Hottel) – Уїллера (Whillier) – Бліса (Bliss) [128, 173].

Миттєве значення питомої теплопродуктивності ТФГСК, за цією моделлю, можна розрахувати на основі усереднених значень за годину, день, місяць, сезон чи рік. За результатами теплового тестування в натурних умовах нехтують даними, що є незначними відносно перехідних процесів нагрівання/охолодження [1, 2].

Рівняння, що враховані в ССЕП, повинні містити інформацію про характер навантаження залежно від запропонованого компонування системи. Тому,

рівняння теплового балансу ТФГСК для встановлення повної теплової потужності, отримано за формулою (2.16):

$$Q_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = F_{\text{ТФГСК}} \cdot F_R \cdot \left[ I_B - U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} (t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}} - t_D) \right], \text{ Вт}, \quad (2.16)$$

де  $I_B$  – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>.

Крім цього, було враховано те, що повна кількість теплової потужності визначається через різницю ТТ на виході і вході конструкції за формулою (2.17):

$$Q_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{ТФГСК}} \cdot (t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}}) \cdot F_{\text{ТФГСК}}, \text{ Вт}, \quad (2.17)$$

де  $\dot{m}$  – питома масова витрата теплоносія в ТФГСК, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $c_p$  – питома теплоємність теплоносія за сталого тиску, Дж/(кг·°С).

ТТ на виході з конструкції ТФГСК розраховано за формулою (2.18):

$$t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}} = t_p^{\text{ТФГСК}} - (t_p^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}}) \cdot e^{-\frac{U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}}{(\dot{m} \cdot c_p)_{\text{ТФГСК}}}}, \text{ °С}, \quad (2.18)$$

де  $t_p^{\text{ТФГСК}}$  – рівноважна температура конструкції ТФГСК (у випадку, коли витрата теплоносія дорівнює нулю, тоді все поглинуте СВ віддається доквіллю і настає рівновага) за інтенсивності СВ, °С (2.19):

$$t_p^{\text{ТФГСК}} = \frac{\tau \cdot \alpha}{U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}} \cdot I_B \cdot S + t_D, \text{ °С}, \quad (2.19)$$

За цих умов ТТ на виході з ТФГСК не залежить від його геометричних параметрів, але повністю визначається за площею ССП, зовнішніми умовами експлуатації, режимом роботи теплоносія в ССЕР та досконалістю конструкції.

Оскільки втрата теплової потужності через БА у доквілля є інформативним показником у встановленні надійності запроектованого теплового процесу в ССЕР, то його було враховано у формулі (2.20):

$$Q_{\text{втр}}^{\text{БА}} = U_{\text{пов}}^{\text{БА}} \cdot F_{\text{БА}} \left( \bar{t}_{\text{БА}} - t_D \right), \text{ Вт}, \quad (2.20)$$

де  $U_{\text{пов}}^{\text{БА}}$  – повний коефіцієнт теплопередачі тепловтрат БА, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$F_{\text{БА}}$  – сумарна поверхнева площа БА, м<sup>2</sup>;  $\bar{t}_{\text{БА}}$  – усереднена ТТ в БА, °С.

Враховуючи припущення та спрощення наведені у Розділі 2, було отримано рівняння спрощеної математичної моделі теплових процесів у ССТ із ТФГСК за формулою (2.21):

$$Q_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} - Q_{\text{спож}} - Q_{\text{втр}}^{\text{БА}} = Q_{\text{ак}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{ак}} \frac{dt_{\text{БА}}}{d\tau}, \text{ Вт}, \quad (2.21)$$

де  $Q_{\text{спож}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{спож}} \cdot (t_{\text{вих}}^{\text{спож}} - t_{\text{вх}}^{\text{спож}}) \cdot F_{\text{ТФГСК}}$  – теплова потужність, що постачається споживачу, Вт.

Рівняння спрощеної математичної моделі (2.21) для розрахунку теплової потужності конструкції ТФГСК прийнято основним рівнянням для аналізу ССТ. Додатково в рівняння (2.21) можна вводити інші моделюючі компоненти, такі як, параметри теплообмінника, характеристики системи трубопровідного забезпечення тощо, що розширить можливість використання різноманітних підходів до їхнього застосування [113].

Оскільки, повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат ТФГСК та БА є невідомим, то необхідно прийняти його значення на початковому етапі як const із подальшим його уточненням. Детальний розрахунок даного коефіцієнта наведено в п. 2.4.

Крім цього, необхідно мати дані споживчого навантаження, встановлення якого вже саме по собі може бути окремим предметом дослідження. Загальний підхід для його визначення такий, як і для цілої системи. Тобто, для визначення споживчого навантаження необхідно ввести систему рівнянь, яка зв'язуватиме витрату теплоносія, температуру та інтенсивність сонячного випромінювання.

Коефіцієнт заміщення, в частині теплової енергії, без дублера теплової енергії, визначено за формулою (2.22):

$$f_{\text{ССТ}} = \frac{q_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} - q_{\text{втр}}^{\text{БА}}}{q_{\text{спожив}}} = 0 \dots 1. \quad (2.22)$$

Однак, у вище наведених математичних моделях залишаються невідомі дані, які можуть бути отримані експериментальним шляхом.

## 2.4 Визначення коефіцієнта відведення теплової енергії для теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора

Коефіцієнт теплопередачі тепловтрат ТФГСК є сумою втрат через бокові поверхні, а також через верхню та нижню частину колектора (рис. 2.11). Найбільші втрати для ТФГСК зумовлені боковими поверхнями колектора, а найменші – верхньою та нижньою частинами колектора. Зростання втрат, супроводжується зменшенням ефективності установки. Тепловтрати через бокові поверхні можна зменшити завдяки нанесенню прозорого селективного покриття на склопакет №3 (рис. 2.11), оскільки у такому випадку знижується рівень втрат інфрачервоного випромінювання. Також, тепловтрати можна зменшити, якщо в склопакет №1 та №3 ввести інертний газ (аргон, криптон тощо). Однак, таке конструкторське рішення призводить до збільшення вартості конструкції ТФГСК.

Як зазначалось раніше в п. 2.2, для розробленого ТФГСК істотне значення мають інші види втрат теплової енергії (рис. 2.11), які впливають на загальну продуктивність ССТ.

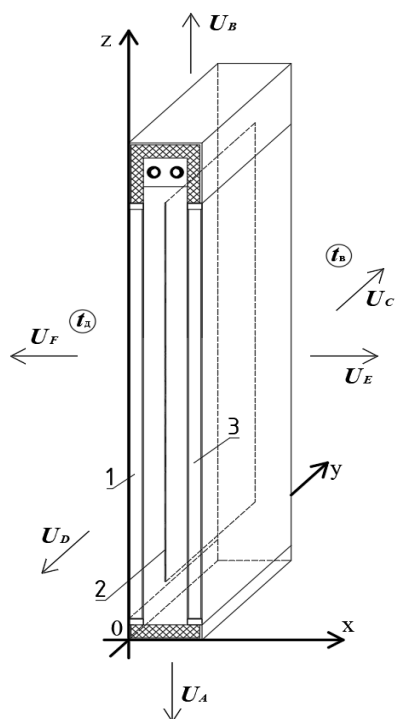


Рисунок 2.11 – Втрати теплової енергії в теплому та фотоелектричному гібридному сонячному колекторі:

1 – склопакет № 1; 2 – скло;

3 – склопакет № 3;

$U_A, U_B, U_C, U_D, U_E, U_F$  – повний коефіцієнт теплопередачі теплових тепловтрат із нижньої, верхньої та бокових сторін (перерізів площин) конструкції ТФГСК

Для визначення повного коефіцієнта теплопередачі теплових втрат запропонованої конструкції ТФГСК використано поверхневі інтеграли

обмежених перерізів площин, для яких характерна втрата теплової енергії, що відображено у рівнянні (2.23) [87]:

$$U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = \iint_{U_A^{\text{ТФГСК}}} f(x,y)dxdy + \iint_{U_B^{\text{ТФГСК}}} f(x,y)dxdy + \iint_{U_C^{\text{ТФГСК}}} f(x,z)dxdz + \\ + \iint_{U_D^{\text{ТФГСК}}} f(x,z)dxdz + \iint_{U_E^{\text{ТФГСК}}} f(y,z)dydz + \iint_{U_F^{\text{ТФГСК}}} f(y,z)dydz. \quad (2.23)$$

Для визначення коефіцієнта відведення теплоти необхідно врахувати теплову ефективність конструкції ТФГСК, що розраховується за методикою європейської практики [128]. Ефективність за цими даними є усередненою (2.24):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}} = F_R^{\text{СР}} (\tau \cdot \alpha)^{\text{ТФГСК}} - F_R^{\text{СР}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} (\bar{t}_{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}}) / I_{\text{В}}. \quad (2.24)$$

Окрім цього, визначення теплової ефективності можливе за формулами (2.25 а-б):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}} = F_R (\tau \cdot \alpha)^{\text{ТФГСК}} - F_R \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} (t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}}) / I_{\text{В}}, \quad (2.25\text{а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}} = F_R (\tau \cdot \alpha)^{\text{ТФГСК}} - F_R \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} (t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}}) / I_{\text{В}}. \quad (2.25\text{б})$$

Дані отримані на основі залежностей (2.25 а-б) будуть крайовими точками у визначенні теплової ефективності конструкції ТФГСК.

Параметр  $F_R^{\text{СР}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  залишається попарно невідомим. За умов відомої витрати теплоносія в ТФГСК, параметри  $F_R^{\text{СР}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  можна розрахувати користуючись графічною залежністю показника теплової ефективності відносно комплексу К, оскільки цей комплекс К – степінь нерівномірності температурного поля в поперечному перерізі ТФГСК, то він становить

$$K = \frac{\left( \frac{t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}}{2} - t_{\text{Д}} \right)}{I_{\text{В}}} = \frac{(\bar{t}_{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}})}{I_{\text{В}}}. \text{ В точці перетину лінії ТЕ залежно від комплексу}$$

К з ординатою, кут нахилу становитиме шукану величину [6, 32, 128].

Показник ТЕ можна розрахувати також за формулою (2.26):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}} = \frac{q_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}}{I_{\text{В}}}. \quad (2.26)$$

Зазвичай, значення коефіцієнта  $F_R^{CP} \cdot U_{повн}^{ТФГСК}$ , може приймати від'ємне значення, що потребує внесення правки  $K'$  (2.27) в значення ТЕ, яке отримане з графічної залежності за результатами експериментальних випробувань ТФГСК.

$$K' = G \cdot c_p / (G \cdot c_p - k / 2) \text{ для } \eta = f \left( \frac{(\bar{t}_{ТФГСК} - t_{Д})}{I_{В}} \right). \quad (2.27)$$

Оскільки, ССТ володіють своїми режимними характеристиками швидкості та витрати теплоносія, про що було зазначено в п. 2.1, то їх необхідно запланувати одразу в план-матрицях.

Крім цього, в дослідженнях використовують фактор ефективності колектора, який виражається співвідношенням двох коефіцієнтів теплопередачі (2.28):

$$F' = \frac{U_0}{U_L}. \quad (2.28)$$

де  $F'$  – коефіцієнт поглинальної здатності СК (значення, що характеризує ефективність перенесення тепла від активної поверхні СК до теплоносія).

Коефіцієнт  $F'$  є відношенням фактичного приросту енергії до приросту, за тих умов, якщо поглинальна поверхня колектора перебуває за локальної температури рідини. Інтерпретація параметра  $F'$  для наведеної та більшості геометрій є доцільною, якщо врахувати опір теплопередачі від рідини до навколишнього повітря  $U_L$ , а у чисельнику – від пластини поглинача до навколишнього повітря  $U_0$  [6, 32, 128].

Тоді, коефіцієнт теплопередачі колектора можна виразити формулою (2.29):

$$F_R^{CP} = \frac{G \cdot c_p \cdot (t_{вих}^{ТФГСК} - t_{вх}^{ТФГСК})}{I_{В} - U_{пов}^{ТФГСК} \frac{(\bar{t}_{ТФГСК} - t_{Д})}{I_{В}}}. \quad (2.29)$$

Теплові параметри узалеженні від наявності експериментальних даних, а саме від коефіцієнта теплової ефективності, оскільки надалі це дає змогу визначити коефіцієнт відведення теплової енергії. Проте, для цілісної картини, окрім теплових характеристик ТФГСК, необхідно розглянути ще електричні характеристики.

## 2.5 Визначення електричних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора

В Розділі 1 зазначалось про те, що однією з основних характеристик ФЕ є вольт-амперна характеристика (ВАХ), а також ВАХ є основним методом оцінки якості та експлуатації характеристик фотоелементів і ФСК на їхній основі. В п. 2.3 було обґрунтовано необхідність встановлення теплових параметрів для ТФГСК за експериментальних умов, проте важливим залишається визначення електричних параметрів ТФГСК.

Для визначення коефіцієнта заповнення, який є одним із важливих електричних параметрів для ТФГСК, необхідно зрозуміти вольт-амперні характеристики типового ФСК [26].

Якщо на графіку позначити струм на осі ординат, то у випадку  $U = 0$  отримаємо струм короткого замикання  $I_{кз}$ , а при перетині з віссю напруги (вісь абсцис) (де  $I = 0$ ) – напругу розімкнутого ланцюга  $U_{хх}$ . Відомо, що одинарна кремнієва комірка розміром  $1 \text{ см}^2$  за рівня сонячної радіації  $1000 \text{ Вт/м}^2$  має розімкнутий ланцюг, напруга якого близько  $0.6 \text{ В}$ , а струм короткого замикання наближено становить від  $20$  до  $30 \text{ мА}$ , що є важливим моментом в розумінні роботи ФЕ в цілому [104].

Оскільки потужність є функцією напруги, то максимальна потужність, яку можна отримати, відповідає прямокутнику максимальної площі під кривою  $I-U$ . У вихідній точці максимальна потужність становить  $P_{\text{макс}}$ , сила струму –  $I_{\text{макс}}$ , а напруга –  $U_{\text{макс}}$ . За ідеальних умов комірки завжди працюють у точці максимальної потужності, але на практиці комірки працюють в точці на кривій  $I-U$ , яка відповідає характеристиці  $P-U$  навантаження.

Отримання електричної енергії без її акумулювання у випадку застосування конструкції ТФГСК доводить, що температурний коефіцієнт для напруги розімкнутого ланцюга, який передбачений обраною моделлю, має відповідати співвідношенню (2.30):



$$\frac{\partial U_{xx}}{\partial t} = \mu_{U_{xx}} \approx \frac{U_{xx}(t_{\text{ком}}) - U_{xx}(t_{\text{ком.контр}})}{t_{\text{ком}} - t_{\text{ком.контр}}}, \quad (2.30)$$

де  $t_{\text{ком}}$  – температура комірки ФЕ, °С;  $t_{\text{ком.контр}}$  – температура комірки ФЕ за контрольних умов, °С.

Це співвідношення наочно ілюструється еквівалентною схемою (рис. 2.12), яка може бути використана для окремої комірки багатокоміркового ФЕ або масиву багатомодульного ФЕ в ФСК.

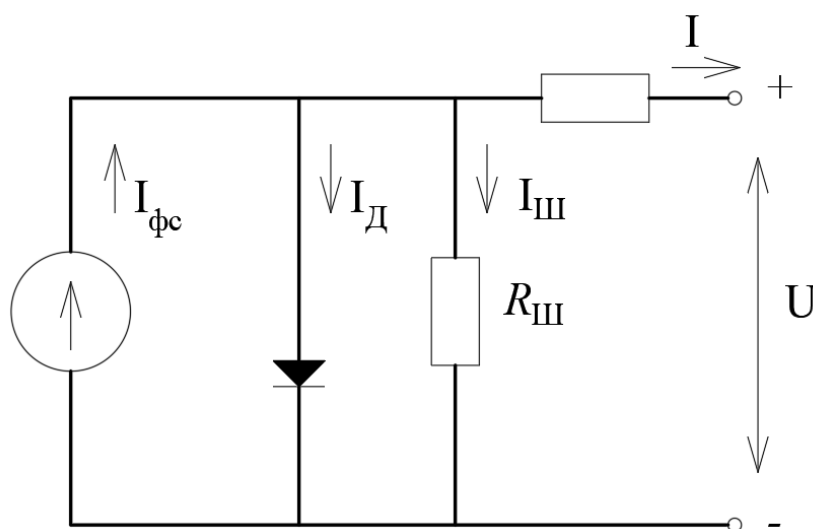


Рисунок 2.12 – Схема роботи електричного кола в конструкції ТФГСК

За фіксованої температури та сонячного випромінювання, I-U характеристика цієї моделі визначається за аналітичним співвідношенням ВАХ, що містить фізичні параметри ФСК (2.31):

$$I = I_{\text{фс}} - I_{\text{д}} - I_{\text{ш}} = I_{\text{фс}} - I_0 \cdot \left[ \exp\left( \frac{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot (U + I \cdot R_{\text{посл}})}{\text{Д} \cdot 1.381 \cdot 10^{-23} \cdot (t_{\text{кл}} + 273.15) \cdot N_{\text{ком}}} \right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_{\text{посл}}}{R_{\text{ш}}}, \quad (2.31)$$

де  $I_{\text{фс}}$  – фотострум, А;  $I_{\text{д}}$  – струм, що проходить через діод, А;  $I_{\text{ш}}$  – струм, що проходить через шунтуючий опір, А;  $I_0$  – зворотний струм насичення, А;  $U$  – вихідна напруга, В;  $I$  – струм навантаження, А;  $R_{\text{посл}}$  – послідовний опір ФСК, Ом;  $R_{\text{ш}}$  – шунтуючий опір ФСК, Ом;  $\text{Д}$  – діодний фактор,  $N_{\text{ком}}$  – кількість послідовно розташованих комірок.

Описана формула (2.31), що лежить в основі електричного кола охоплює п'ять параметрів: фотострум, зворотний струм насичення, послідовний опір, опір шунтування і параметр діодного фактору. Ці величини можуть бути функціями температури комірки та поглиненого сонячного випромінювання. В формулі присутній також модифікований коефіцієнт ідеальності, пов'язаний з фізичними константами (стала Больцмана, тощо), температурою комірки, кількістю послідовно розташованих комірок, електронним зарядом ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  кулон) і параметром Д (рівний 1 для ідеального діода і, як правило, від 1 до 2 для реальних діодів).

Вибране значення температури комірки  $t_{\text{ком}}$  малозначне, як наслідок вибір  $t_{\text{ком}}$  від 1 до 10 градусів вище або нижче  $t_{\text{ком.контр}}$  несуттєво змінює результат. Оскільки  $U_{\text{ХХ}}$  не може бути знайдено за рівнянням (2.31), тому необхідно використовувати чисельні методи для його визначення.

Вихідну електричну потужність отримано з рівняння для  $i$ -ї години дня (2.32):

$$P_i^{\text{ТФГСК}} = F_{\text{ТФГСК}} \cdot I_i \cdot \eta_{\text{макс}}^{\text{ТФГСК}}, \quad (2.32)$$

де  $F_{\text{ТФГСК}}$  – СПП конструкції ТФГСК, що містить фотоелементи,  $\text{м}^2$ ;  $I_i$  – інтенсивність сонячного випромінювання для  $i$ -ї години дня;  $\eta_{\text{макс}}^{\text{ТФГСК}}$  – максимальна електрична ефективність ТФГСК.

Методика визначення ККД ФЕ значною мірою залежить від опору навантаження. Коефіцієнт перетворення СВ можна визначити як відношення електричної потужності ФЕ до падаючої світлової потужності за номінального навантаження [13]. У зв'язку із цим, доцільно застосовувати параметри струму КЗ та напруги ХХ, які об'єднані співвідношенням (2.33):

$$U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{ТМВП}} \cdot I_{\text{ТМВП}}}{FF}, \quad (2.33)$$

де  $U_{\text{ХХ}}$  – напруга холостого ходу через ТФГСК, В;  $I_{\text{КЗ}}$  – струм короткого замикання через ТФГСК, А;  $U_{\text{ТМВП}}$  – напруга в точці максимальної вихідної потужності, В;  $I_{\text{ТМВП}}$  – струм в точці максимальної вихідної потужності, А;  $FF$  – коефіцієнт

заповнення вольт-амперної характеристики, який відповідно до його геометричної інтерпретації, є площею прямокутника із сторонами  $U_{\text{ТМВП}}$  та  $I_{\text{ТМВП}}$  на графіку вольт-амперної характеристики ТФГСК.

Застосовуючи дані формули, можна зазначити, що при моделюванні ВАХ буде спостерігатися систематичне відхилення теоретичної кривої від експериментальної. Дослідження систематичного відхилення є важливими для розробки моделі ФСК. Однак, в дисертаційному дослідженні основну увагу зосереджено на визначенні коефіцієнта заповнення ВАХ. Відомості п. 2.3-2.4 свідчать про те, що математична модель процесів теплообміну в ТФГСК потребує даних експериментального характеру, тому математичне моделювання коефіцієнта заповнення ВАХ не було б цілісним.

Для експериментальних досліджень було обрано модель монокристалічного ФСК, коефіцієнт заповнення якого математично розрахований за формулою (2.34) на основі паспортних даних виробника «Boguang» моделі KLD12X:

$$FF = \frac{2,22 \cdot 18}{2,44 \cdot 21,6} = 0,758. \quad (2.34)$$

Середньомісячну частку навантаження ССЕ, що переноситься фотоелектричною системою без зберігання, можна розрахувати за співвідношенням (2.35):

$$f_{\text{ССЕ}} = \frac{P_i^{\text{ТФГСК}}}{P_{\text{спожив}}} = 0 \dots 1. \quad (2.35)$$

Значення коефіцієнта заміщення, які є рекомендованими для системи сонячного тепло- та електропостачання, прийнято від 0 до 1. Якщо значення коефіцієнта заміщення сонячної енергії в системі електропостачання становитиме більше ніж 1, тоді слід передбачити наявність акумуляторної батареї. У випадку коли значення коефіцієнта заміщення до споживача буде менше 0.9, то необхідно в загальній схемі сонячного енергопостачання передбачити дублююче джерело енергії, що покриватиме пікове навантаження тепло- та/або електропостачання.

## Висновки до Розділу 2

1. Запропоновано спрощену математичну модель теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора на основі математичних алгоритмів для розрахунку його тепло- та електротехнічних параметрів в системі сонячного енергопостачання.

2. На основі метеорологічних статистичних даних, отримано графічні та аналітичні залежності для розрахунку сумарної річної сонячної радіації, що надходить на вертикальні фасади будівель і споруд залежно від географічної широти та орієнтації фасаду відносно сторін світу.

3. На основі статистичних даних, отримано рівняння коефіцієнта перерахунку  $i$ -ої години доби, що входить в основу теоретичного розрахунку температури довкілля й енергопродуктивності ТФГСК для  $i$ -тої години  $j$ -місяця.

4. Встановлено коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання по відношенню до нормалі прозорих покриттів, на основі методу трасування променів з врахуванням припущень та спрощень для процесів, що проходять в конструкції ТФГСК. Усереднений коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання для системи з 3-х прозорих покриттів без селективного покриття становить 0,654, тоді як із селективним покриттям в системі із 5-ти шиб – 0,341.

5. Варіювання усередненої поглинальної здатності ТФГСК з селективним покриттям в системі з 5-ти шиб знаходилось в межах від 0,204 до 0,082 відповідно для кута надходження інтенсивності сонячного випромінювання відносно нормалі та під кутом  $80^\circ$ , з врахуванням спрощень та припущень за розрахованого коефіцієнта розсіяного відбивання.

6. Аналітично встановлено теплові характеристики запропонованої конструкції ТФГСК та побудовано спрощену математичну модель процесів теплообміну для визначення коефіцієнта відведення теплової енергії та коефіцієнта теплопередачі повних теплових втрат конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання на основі теплової продуктивності.

7. На основі теоретичних даних математично розраховано коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики теплового та фотоелектричного сонячного колектора, який становить 0.758, що дозволило розрахувати ефективність генерування електричної енергії.

8. Теоретичними дослідженнями складно врахувати всі теплоенергетичні процеси, які проходять в запропонованій конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що зумовило необхідність проведення подальших експериментальних досліджень.

## **РОЗДІЛ 3**

### **РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Теплоенергетичні процеси, які відбуваються в запропонованій конструкції ТФГСК суміщеній з конструкцією СФБ є складними, тому розрахунки такої моделі узалежнені від даних, які можна отримати за експериментальних досліджень. У розділі наведено методику проведення та результати експериментальних досліджень теплотехнічних та електричних параметрів конструкції ТФГСК. Зокрема, наведено результати лабораторних та натурних експериментальних досліджень ТФГСК за впливу обраних факторів. Також, визначено вплив освітленості в приміщенні під час застосування запропонованої конструкції ТФГСК в СФБ.

#### **3.1 Експериментальні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора суміщеного із світлопрозорим фасадом будівлі**

##### **3.1.1 Опис експериментального стенда для досліджень теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Експериментальні дослідження для визначення теплових та електричних параметрів ТФГСК, зокрема, таких як коефіцієнтів корисної дії конструкції ТФГСК (теплової та електричної ефективності), коефіцієнта теплопередачі теплових втрат ТФГСК, виконували за допомогою стендів: стаціонарного (встановленого в приміщенні лабораторії) та виносного (розміщеному на території Національного університету «Львівська політехніка»).

Для проведення досліджень стенд з ТФГСК, що виконував роль СФБ, було закріплено під кутом  $90^\circ$  до горизонту, однак кут нахилу можна було змінювати за допомогою шарнірів. Конструкцію ТФГСК було приєднано до трубопроводів стенда. Контур трубопроводів стенду було заповнено водою, для зміни витрати теплоносія використовувався побутовий насос із частотним регулюванням. Перед початком дослідження було видалено повітря із циркуляційного контуру.

Кожного разу перед початком експерименту систему було заповнено свіжою порцією води (в якості теплоносія). Перевірено герметичність системи за робочого тиску та справність вимірювальних приладів [188].

У ході спостережень враховано коливання ТТ, швидкість вітру та кількість освітлення [182]. Досліджувані параметри реєструвались перед вмиканням імітатора СВ та під час його роботи. Загальна схема експериментального стенда ССЕП для досліджень конструкції ТФГСК наведена на рисунку 3.1.

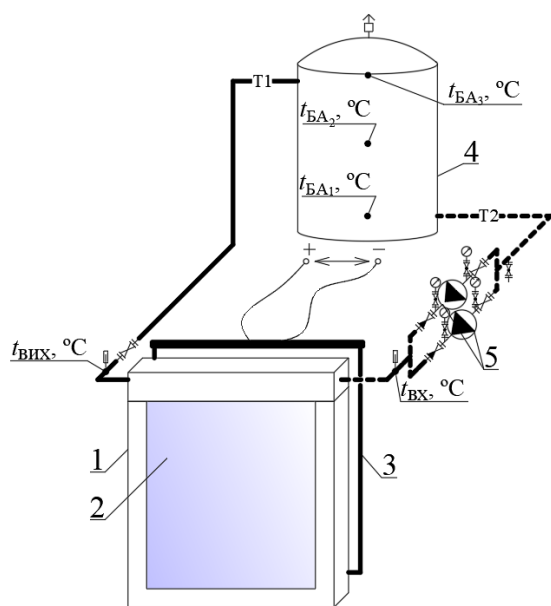


Рисунок 3.1 – Схема експериментального стенда ССЕП у режимі ВЦТ, що містить конструкцію ТФГСК: 1 – корпус ТФГСК; 2 – СПП ТФГСК; 3 – СЗП, що містить фотоелементи в конструкції ТФГСК; 4 – БА; 5 – циркуляційні насоси;  $t_{ВХ}$  – ТТ на вході в конструкцію ТФГСК, °С;  $t_{ВИХ}$  – ТТ на виході з конструкції ТФГСК, °С;  $t_{БА1}$ ,  $t_{БА2}$ ,  $t_{БА3}$  – ТТ в трьох точках умовно поділеного об'єму БА, °С

Як імітатор СВ було використано електричні портативні галогенові лампи, оскільки вони дозволяють імітувати наблизений спектр до СВ необхідний для ТФГСК. Теплова потужність випромінювання змінювалась в межах 100-900 Вт/м<sup>2</sup>.

Перед початком дослідів було складено план досліджень у якому узгоджувалися умови проведення досліджень, методи і конструктивна організація установки. Здійснювався контроль за тим, щоб на проведення експерименту не впливали інші фактори (СВ, що надходило через вікна приміщень, затінення СК тощо) [120].

Нерівномірність надходження СВ на конструкцію ТФГСК, яка містить фотоелементи, що з'єднані в конструкцію фотоелектричного сонячного колектора (ФСК), була в межах  $\pm 15\%$ , тоді як на поверхню теплового сонячного колектора (ТСК) в конструкції ТФГСК –  $\pm 10\%$ . З метою зменшення похибки освітлення та

перевідбивання навколо лабораторного та натурального стендів було сконструйовано імітовану сіру кімнату. Прилади, які використовували для проведення експериментальних досліджень та їхні похибки, наведені у Додатку А.

В результаті огляду актуальних установок, що перетворюють СВ (див. Розділ 1) в теплову та електричну, в основу конструкції ТФГСК було обрано плоску форму колектора. Для лабораторних досліджень було використано ФСК з максимальною потужністю 40 Вт, а для натурних досліджень – 6 штук фотоелектричних модулів по 6 В кожний, що були з'єднані в ролетну панель загальною кількістю 72 ФЕ. Кожен модуль був укомплектований діодами Шотткі. В дослідженнях використано саме ролетну панель з метою широкомасштабного впровадження такого типу СЗП для СФБ. Окрім цього, імітатор СВ був попередньо випробуваний, в результаті чого підтверджено відповідність ФСК заявленій потужності виробника.

Експериментальні дослідження проведено за наступних умов, припущень та спрощень:

- інтенсивність імітованого СВ була прийнята однаковою по всій площині ТФГСК;
- вплив відбитого СВ від навколишніх предметів не враховувався;
- ТФГСК не затінювався;
- вплив інтенсивності на коефіцієнт заповнення ВАХ не враховувався;
- прийнято довірчу ймовірність результатів експерименту 0,95.

Врахувати одночасну зміну всіх факторів, що можуть мати вплив на експериментальні дослідження є доволі складним завданням [156]. Тому, необхідно навести фактори, що мають значний вплив на параметри ТФГСК.

### **3.1.2 Опис факторів, що впливають на конструкцію теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Для ефективної роботи складено план-таблицю, в якій досліди було сплановано відповідно до існуючих методик та визначено найменовані матриці експериментальних досліджень (табл. 3.1) [3, 4, 21, 24].

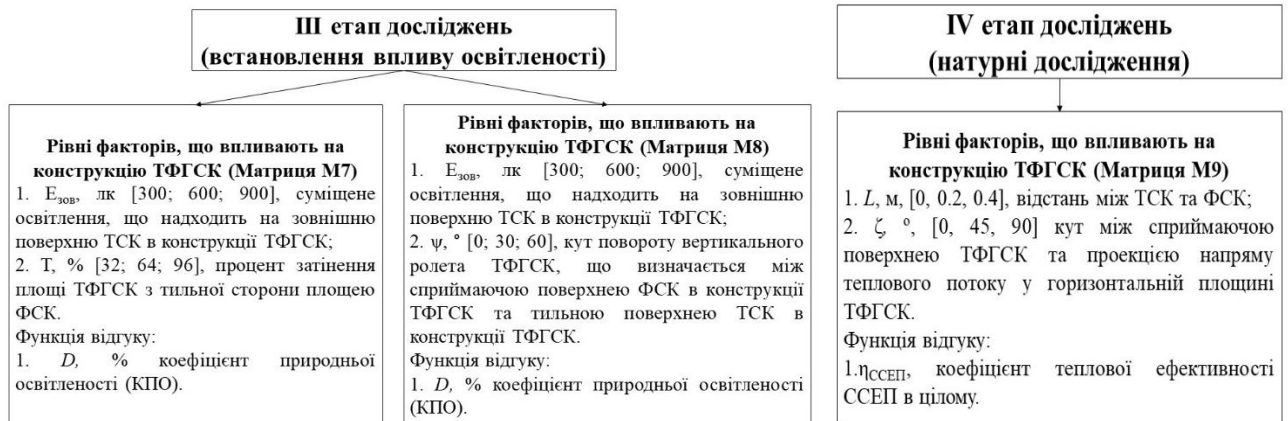


З метою врахування конструктивних особливостей СФБ (див. Розділ 1) в експериментальних дослідженнях було відтворено дві моделі установок. Тому, експериментальні дослідження було розділено на два етапи.

Таблиця 3.1 – Послідовність виконання експериментальних досліджень



продовж. таблиці 3.1



По-перше, виділено контрольні (базові) дослідження, що зумовлювали I етап досліджень, за яких конструкцію ТФГСК досліджено без селективного покриття, тобто конструкція ТФГСК містила звичайне скло. По-друге, досліджували ТФГСК, конструкція якого містила скло з селективним покриттям (II етап дослідження). Окрему увагу було приділено наявності фотоелементів у його схемному рішенні та дослідженню впливу вітру на теплотехнічні характеристики ТФГСК.

Під час експериментальних досліджень було обрано наступні основні фактори (рис. 3.2), які впливали на ефективність ТФГСК [166, 169, 170]:

- $x_1$  [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4] – відстань на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК,  $L$ , м;
- $x_2$  [100, 300, 500, 700, 900] – інтенсивність імітованого потоку енергії, що випромінює джерело,  $I_b$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- $x_3$  [10, 30, 50, 70, 90] – кут між сприймаючою поверхнею ТФГСК та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК (кут надходження теплового випромінювання),  $\theta$ , °;
- $x_4$  [0.008, 0.012, 0.015, 0.019, 0.023] – витрата теплоносія встановлена в системі сонячного енергопостачання,  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·с);
- $x_5$  [2, 4.5, 6] – швидкість вітрового потоку (вітру)  $v$ , м/с;
- $x_6$  [0, 45, 90] – кут між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК (кут надходження вітрового потоку),  $\xi$ , °;
- $x_7$  [0, 45, 90] – кут між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку в горизонтальній площині ТФГСК,  $\zeta$ , °.

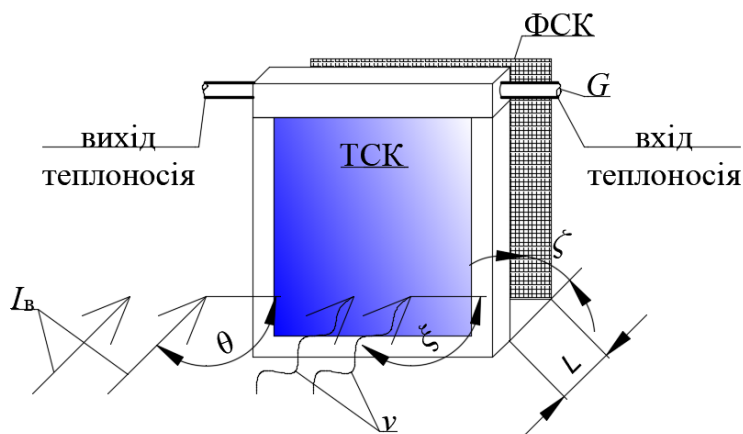


Рисунок 3.2 – Фактори, які були використані для досліджень функцій відгуку конструкції ТФГСК

Взаємодію відповідних факторів за експериментальних досліджень об'єднано у вигляді таблиці 3.1. Функцією відгуку обрано коефіцієнт теплової ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}_i}^{\text{ТЕ}}$ , який підтверджує вплив обраних факторів на теплові характеристики ТФГСК (3.1):

$$\eta_{\text{ТФГСК}_i}^{\text{ТЕ}} = \frac{q_{\text{пов}_i}}{I_{\text{в}_i}}. \quad (3.1)$$

Для матриць М3 та М6 як функцію відгуку вибрано коефіцієнт електричної ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}_i}^{\text{ЕЕ}}$ , який підтверджує вплив обраних факторів на електричні характеристики ТФГСК (3.2):

$$\eta_{\text{ТФГСК}_i}^{\text{ЕЕ}} = \frac{P_{\text{макс}_i}}{F_{\text{ФСК}_i} \cdot I_{\text{в}_i}}. \quad (3.2)$$

Кут надходження теплового потоку  $30^\circ$  за інтенсивності  $I_{\text{в}} = 300 \text{ Вт/м}^2$  відповідає надходженню СЕ в ранковий та вечірній період доби, а кут  $90^\circ$  за значення параметра  $I_{\text{в}} = 900 \text{ Вт/м}^2$  – в полудень.

Варто звернути увагу, що дефекти ФЕ в даних дослідженнях не визначались, оскільки конструктивний матеріал ФЕ в ФСК не розроблявся в межах експерименту, тому пріоритетними були дослідження щодо конструкції в цілому. Коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики (ВАХ) було розраховано математично [18, 121].

З метою оцінки отриманих експериментальних даних було проведено їхній статистичний розрахунок. Результати статистичної обробки експериментів

наведено в Додатку Б. Оскільки, кожен експеримент має імовірність виникнення похибки, то для оцінки імовірності її виникнення, експеримент виконано декілька раз, що призвело до необхідності проведення паралельних дослідів. Відтворюваність дослідів була перевірена дисперсією. За допомогою таблиці випадкових чисел досліди виконувались у випадковій послідовності.

### **3.2 Лабораторні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора без селективного покриття (I етап досліджень)**

#### **3.2.1 Визначення теплової ефективності ТФГСК без селективного покриття, без ФСК в його конструкції залежно від впливу інтенсивності випромінювання та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напряму випромінювання у вертикальній площині ТФГСК**

На початковому етапі лабораторний стенд для дослідження енергоефективності конструкції ТФГСК площею  $0,2 \text{ м}^2$  було досліджено із звичайним віконним склом в режимі ВЦТ з БА ємністю  $0,015 \text{ м}^3$ . Принципове рішення експериментальної установки для досліджень ТФГСК без селективного покриття наведено на рисунку 3.3.

Конструкція запропонованого світлопрозорого фасаду будівлі із ТФГСК складається із рамного корпусу 3 в верхній частині якого розміщено трубопровід циркуляції теплоносія, що містить пластинчасте оребрення. Таке рішення не є принциповим, оскільки розміщення трубопроводу циркуляції теплоносія може здійснюватися як і в бічних частинах СФБ, так і в комплексі. Як світлопрозорий матеріал використано скло товщиною 4 мм з пропусканням  $\text{SE} \approx 89\%$ . Між зовнішнім і внутрішнім склом ТФГСК встановили третє додаткове скло, що не прилягало повністю до верхньої та нижньої рамної частини СФБ, з метою турбулізації повітряного теплоносія в конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора та інтенсифікації передачі теплової енергії до теплообмінника 2 [87]. З цією ж метою, як варіант, передбачено вентилятор, що мав живлення від ФСК, який розміщений у конструкції ТФГСК (рис. 3.3).

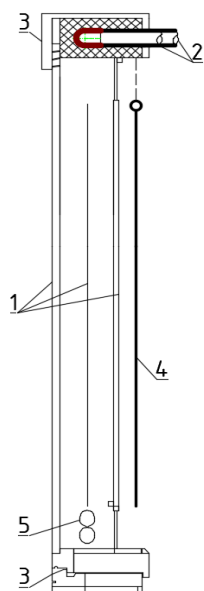


Рисунок 3.3 – Розріз конструкції ТФГСК без селективного покриття:

1 – СПШ ТСК; 2 – трубопровід для циркуляції теплоносія в конструкції ТФГСК;  
3 – ТСК; 4 – ФСК

Усереднені результати експериментальних досліджень теплової ефективності ТФГСК без селективного покриття залежно від впливу теплового випромінювання за різної інтенсивності та кута між сприймаючою поверхнею ТФГСК та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК, наведено в таблиці 3.2 «Матриця М1». Зокрема експериментально встановлено, що тепла ефективність запропонованої конструкції ТФГСК без наявності ФСК в ній досягала 22 %.

Таблиця 3.2 – Матриця М1

№ п/п	$I_{\text{в}}, \text{Вт/м}^2$	$\theta, ^\circ$	$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$	Усереднені допоміжні результати		
				$\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$	$U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$	К
1	900	30	0,17	0,08	8	0,0013
2	900	60	0,20	0,11	6	0,0044
3	900	90	0,22	0,13	5	0,0027
4	600	30	0,16	0,08	8	0,0027
5	600	60	0,18	0,10	8	0,0013
6	600	90	0,19	0,12	7	0,0038
7	300	30	0,11	0,06	14	0,0003
8	300	60	0,12	0,08	15	0,0022
9	300	90	0,13	0,09	13	0,0018

Окрім цього було побудовано графічну залежність температур на вході  $t_{\text{вх}}$ , °C та виході  $t_{\text{вих}}$ , °C з експериментальної установки, й температури довкілля  $t_{\text{д}}$ , °C залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв (рис. 3.4).

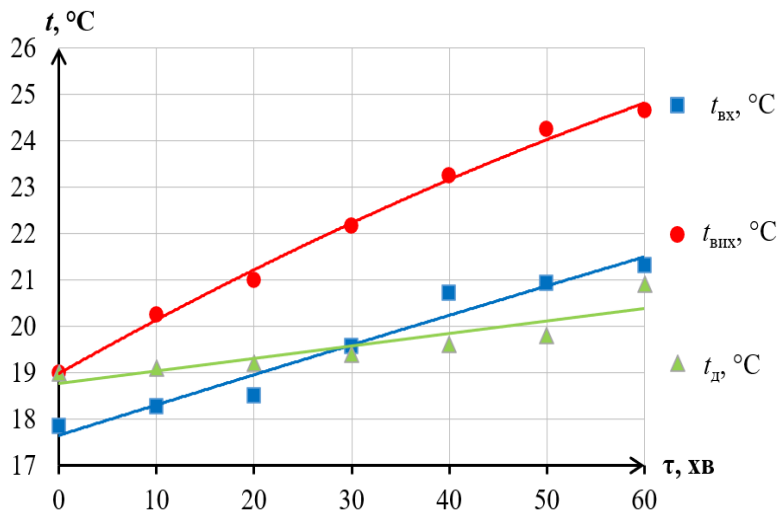


Рисунок 3.4 – Зміна ТТ на вході  $t_{\text{вх}}$ , °C та виході  $t_{\text{вих}}$ , °C з експериментальної установки, й ТД  $t_{\text{д}}$ , °C залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв за сталих умов:  $I_{\text{в}} = 900 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 90^\circ$

Встановлено, що температура теплоносія конструкції ТФГСК мала середній приріст температури на 43 % відносно вхідної. Також, розраховано дані миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{\text{ТФГСК}}$ , Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3.5).

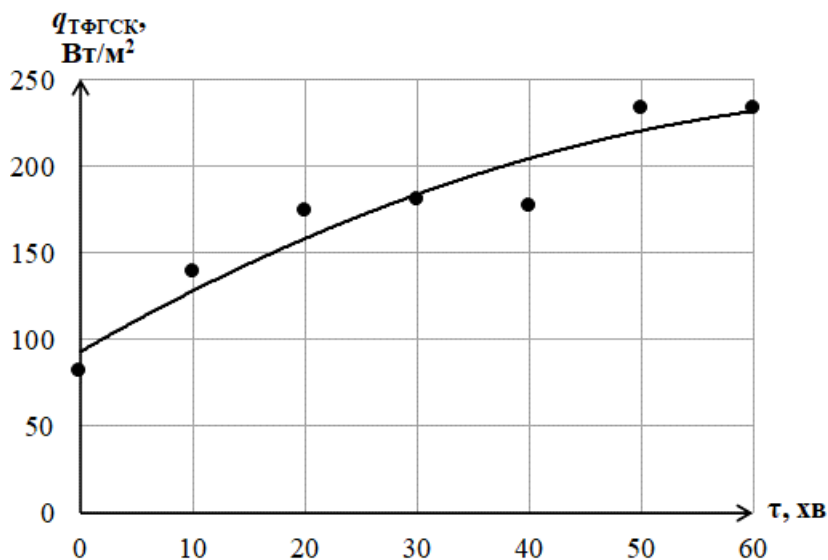


Рисунок 3.5 – Зміна миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{\text{ТФГСК}}$ , Вт/м<sup>2</sup> за сталих умов:  $I_{\text{в}} = 900 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 90^\circ$

За результатами експериментальних досліджень було побудовано графік теплової ефективності ТФГСК (рис. 3.6) залежно від кута надходження теплового випромінювання та інтенсивності потоку теплової енергії. На основі експериментальних досліджень можна стверджувати, що тепловий коефіцієнт

корисної дії  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  запропонованого ТФГСК в конструкції із звичайним склом (без селективного покриття) досягав в середньому 17 %, за сталої витрати теплоносія  $G = 0.017 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

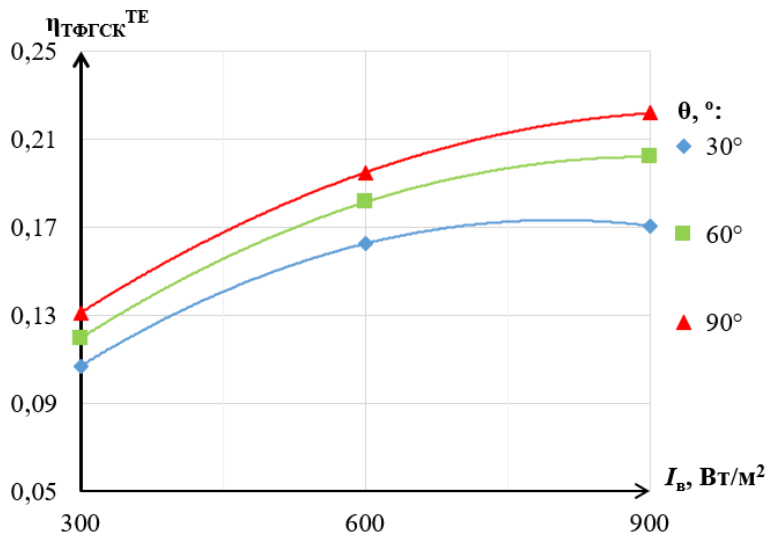


Рисунок 3.6 – Теплова ефективність ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  залежно від кута надходження теплового випромінювання  $\theta, ^\circ$  та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії,  $I_B, \text{Вт}/\text{м}^2$

У результаті аналізу отриманих експериментальних даних (рис. 3.6) було отримано математичні рівняння ТЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(\theta^\circ)}$  (ф-ли 3.3 а-в) залежно від кута падіння теплового випромінювання на конструкцію ТФГСК без селективного покриття та ФСК, з достовірністю апроксимації  $R^2=1$ :

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(30^\circ)} = \frac{-0,024 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000}{300^2}, \quad (3.3 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(60^\circ)} = \frac{-0,02 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000}{300^2}, \quad (3.3 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(90^\circ)} = \frac{(-0,017 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000)}{300^2}. \quad (3.3 \text{ в})$$

Теплова ефективність ССЕР  $\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{ТЕ}}$  мала зростаючий характер за різного кута надходження теплового випромінювання  $\theta, ^\circ$ , зокрема спостерігалось збільшення теплової ефективності за умов більшої інтенсивності та перпендикулярного кута надходження теплового випромінювання відносно поверхні конструкції ТФГСК (рис. 3.7).

Теплова ефективність ССЕР із конструкцією ТФГСК набувала тенденції зростання і досягала 13 %, а в середньому становила 9 % [167].

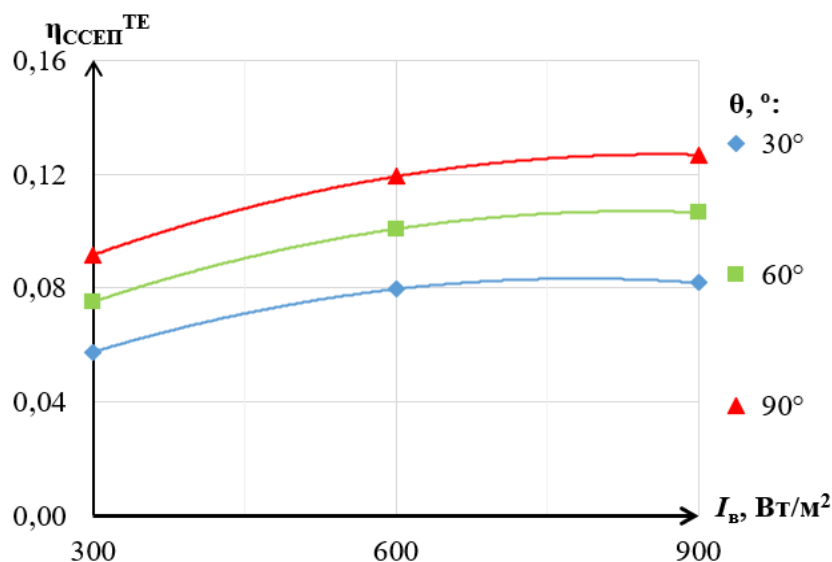


Рисунок 3.7 – Теплова ефективність ССЕСП із конструкцією ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕСП}}^{\text{TE}}$  залежно від кута надходження теплового випромінювання  $\theta, ^\circ$  та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_B, \text{Вт/м}^2$

Отримано типові графічні залежності теплової ефективності ТФГСК від

комплексу  $K = \frac{\left( \frac{t_{\text{ВХ}}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{ВИХ}}^{\text{ТФГСК}}}{2} - t_{\text{Д}} \right)}{I_B} = \frac{(\bar{t}_{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}})}{I_B}$ , що дозволило встановити коефіцієнт

відведення теплової енергії  $F_R^{\text{CP}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  та теплопередачі теплових втрат (рис. 3.8).

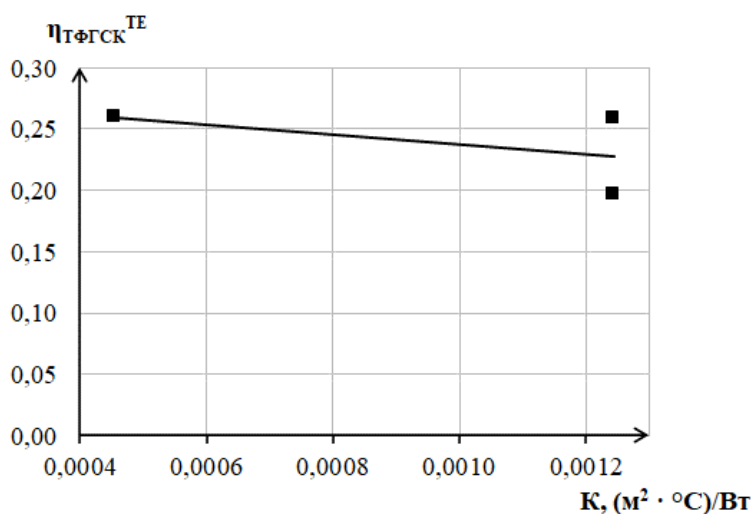


Рисунок 3.8 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}}$  залежно від комплексу  $K, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$  за сталих умов:

$$I_B = 900 \text{ Вт/м}^2, \theta = 90^\circ$$

Проаналізувавши отримані дані (рис. 3.8) встановлено, що коефіцієнт відведення теплової енергії становить  $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , тоді як коефіцієнт теплопередачі  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Аналогічні графічні залежності для встановлення коефіцієнта  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  було побудовано і за інших факторів впливу. Усереднений коефіцієнт теплопередачі теплової енергії становив  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .



### 3.2.2 Визначення теплової ефективності конструкції ТФГСК без селективного покриття залежно від швидкості вітру та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК

Усереднені результати експериментальних досліджень теплової ефективності ТФГСК без селективного покриття залежно від впливу швидкості вітру та кута між сприймаючою поверхнею і проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК наведені в таблиці 3.3 «Матриця М2» (табл. 3.3). Експериментальні дослідження теплової ефективності ТФГСК відповідно до матриці М2 проведено за інтенсивності СВ 600 Вт/м<sup>2</sup> та витрати теплоносія 0,017 кг/(м<sup>2</sup>·с) згідно рекомендацій наведених в роботі [40].

Таблиця 3.3 – Матриця М2

№ п/п	v, м/с	ξ, °	η <sub>ТФГСК</sub> <sup>ТЕ</sup>	Усереднені допоміжні результати			
				F <sub>R</sub> <sup>сп</sup> (τ·α)	U <sub>пов</sub> <sup>ТФГСК</sup>	t <sub>вх</sub> , °С	t <sub>вих</sub> , °С
1	2,0	0	0,20	0,28	16	19,70	21,58
2	2,0	45	0,20	0,21	10	19,43	20,94
3	2,0	90	0,16	0,18	7	19,52	20,68
4	4,5	0	0,12	0,16	13	19,19	20,37
5	4,5	45	0,11	0,14	18	19,07	19,96
6	4,5	90	0,07	0,07	9	19,19	19,77
7	6,0	0	0,06	0,07	15	18,70	19,14
8	6,0	45	0,04	0,05	12	18,64	18,94
9	6,0	90	0,03	0,04	14	19,14	19,35

Аналізуючи отримані дані з таблиці 3.3 можна виділити тенденцію зменшення теплового ККД η<sub>ТФГСК</sub><sup>ТЕ</sup> за дії вітрового потоку на ТФГСК. ККД зменшується на 12 % за зміни швидкості від 2 до 6 м/с за кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині конструкції ТФГСК, який становив ξ = 0°.

Показано, що за швидкостей повітряного потоку 2 м/с та 6 м/с, за різних кутів надходження вітрового потоку, кількість теплової енергії, що було згенерована

конструкцією ТФГСК, максимально відрізнялась на 15 %. Такі результати щодо теплової енергії, виробленої конструкцією ТФГСК підтверджують те, що швидкість та кут надходження вітрового потоку має на дану конструкцію значний вплив, який потрібно враховувати в інженерних розрахунках ТФГСК [23].

Згідно отриманих даних, було побудовано діаграму накопичення теплової енергії  $q_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$ , кДж/м<sup>2</sup> в баку для акумулювання. В результаті експериментальних досліджень, встановлено, що після досліду в баку-акумуляторі було накопичено наближено 1 МДж/м<sup>2</sup> теплової енергії за швидкості вітру  $v = 2$  м/с та кута надходження вітрового потоку  $\xi = 0^\circ$  (рис. 3.9).

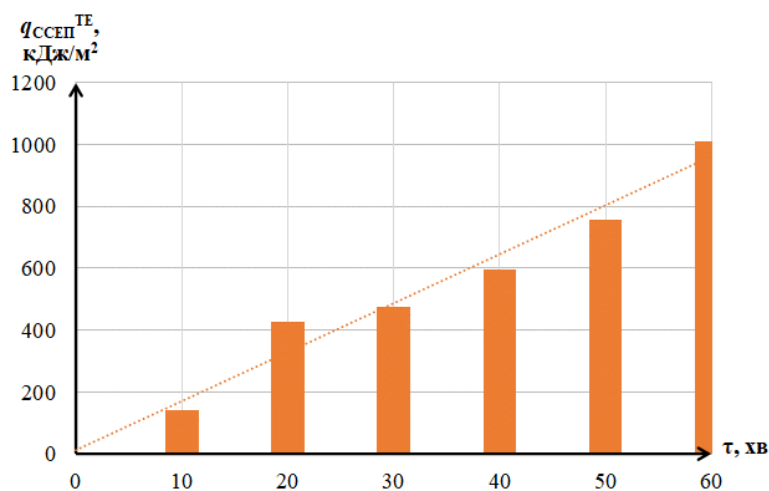


Рисунок 3.9 – Зміна кількості накопиченої теплової енергії  $q_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$ , кДж/м<sup>2</sup> в баку для акумулювання теплової енергії за сталих умов:  
 $v = 2$  м/с,  $\xi = 0^\circ$

З метою глибшого розуміння теплових процесів, що відбуваються в ССЕП, побудовано графічні залежності зміни ТТ в трьох точках умовно поділеного об'єму БА  $t_{\text{БА1}}$ ,  $t_{\text{БА2}}$ ,  $t_{\text{БА3}}$ , °С залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв (рис. 3.10).

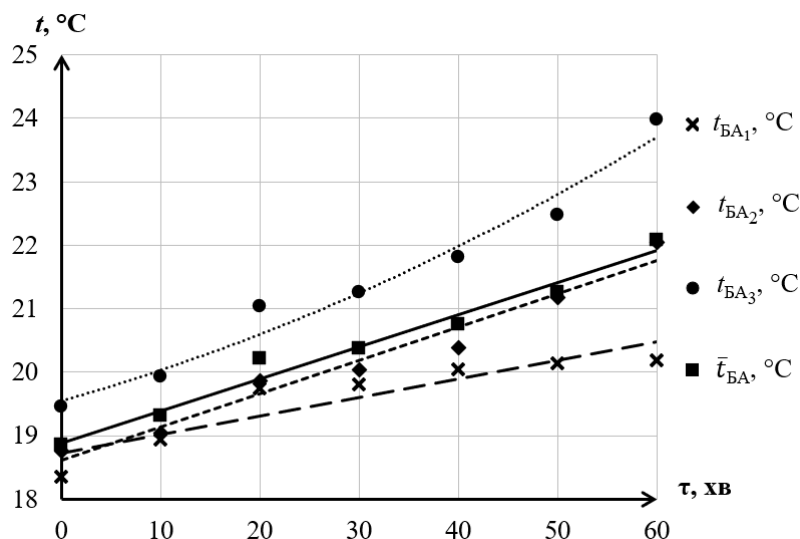


Рисунок 3.10 – Зміна ТТ в БА  $t_{\text{БА1}}$ ,  $t_{\text{БА2}}$ ,  $t_{\text{БА3}}$ , °С та усередненої ТТ БА  $\bar{t}_{\text{БА}}$ , °С залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв за сталих умов:  
 $v = 2$  м/с,  $\xi = 0^\circ$

На основі аналізу отриманих даних (рис. 3.11) встановлено, що кут падіння вітрового потоку має низхідний характер впливу на тепловий ККД конструкції ТФГСК за умов малих швидкостей – до 4,5 м/с, тоді як із збільшенням швидкості вітрового потоку ця тенденція стає менше помітною. Вплив швидкості вітру на роботу експериментального стенду із конструкцією ТФГСК в ССЕР має чітко виражену динаміку падіння рівня визначуваного параметру за його збільшення. Теплова ефективність ССЕР із ТФГСК за дії швидкості вітру 6,0 м/с зменшується в  $\approx 3.3$  рази, порівняно із дослідом зі швидкістю 2,0 м/с.

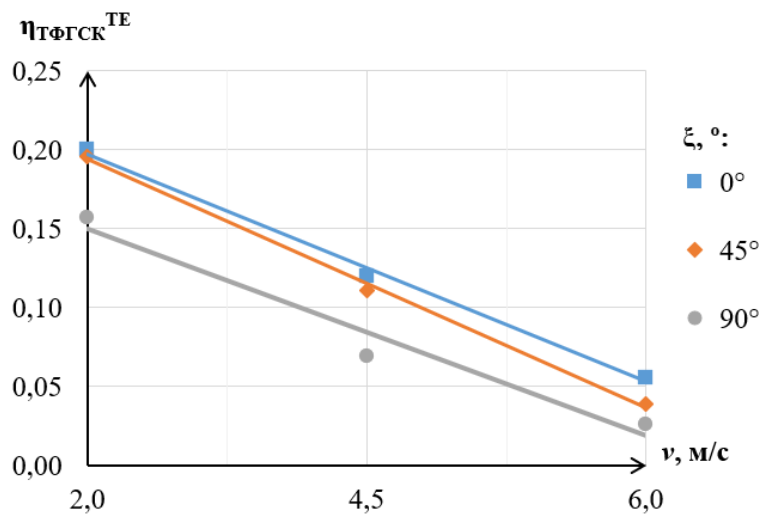


Рисунок 3.11 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{ТФГСК}^{ТЕ}$  за різних швидкостей вітру  $v$ , м/с та кута надходження вітрового потоку  $\xi$ , °

Варто звернути увагу, що теплова ефективність ССЕР із ТФГСК за умов надходження вітрового потоку під кутом 90° до поверхні ТФГСК є меншою в  $\approx 1,5$  рази порівняно з іншими результатами досліджуваних кутів (рис. 3.12).

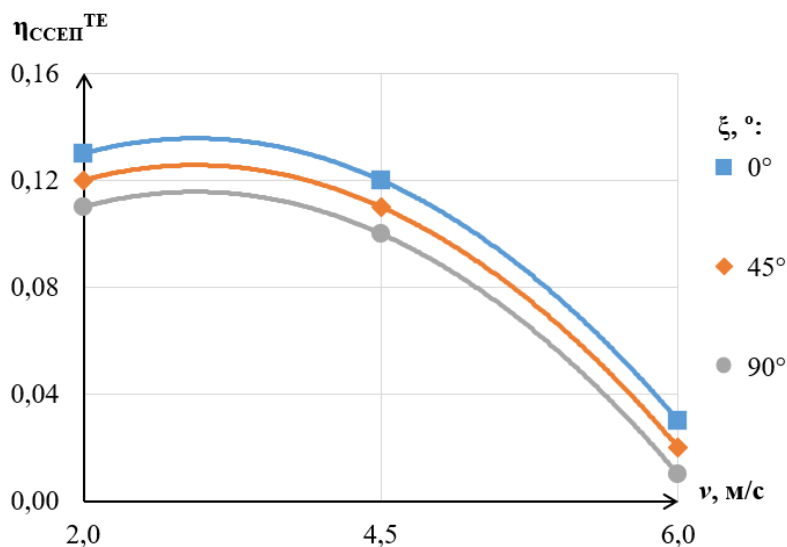


Рисунок 3.12 – Теплова ефективність ССЕР із ТФГСК  $\eta_{ССЕР}^{ТЕ}$  за різних швидкостей вітру  $v$ , м/с та кута надходження вітрового потоку  $\xi$ , °

Проаналізувавши вплив швидкості вітру на ТЕ конструкції ТФГСК в ССЕР визначено чітко виражену динаміку падіння досліджуваного параметру за збільшення кута надходження вітрового потоку. Необхідно звернути увагу, що експериментальні дослідження виконано за дії швидкості вітру до 6 м/с, проте за більшої швидкості вітру низхідна тенденція ККД може змінитись [71, 189]. Однак, середня швидкість вітру для Львівської області не перевищує 6 м/с, тому було обрано ці межі для вимірювань [45, 119].

На основі даних отриманих у результаті експериментальних досліджень (рис. 3.10) описано математичні рівняння (3.4 а-в) для визначення теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(\xi^\circ)}$ , за досліджуваних кутів надходження швидкості повітряного потоку на її поверхню з достовірністю апроксимації  $R^2=1$ :

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(0^\circ)} = -0,036 \cdot v + 0,273, \quad (3.4 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(45^\circ)} = -0,038 \cdot v + 0,272, \quad (3.4 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(90^\circ)} = -0,031 \cdot v + 0,215. \quad (3.4 \text{ в})$$

Визначено усереднений коефіцієнт теплопередачі теплової енергії, що становив 12 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), однак для цілісності картини, необхідно проаналізувати ТФГСК за наявності в ньому конструкції ФСК відповідно до запропонованих досліджуваних факторів.

### **3.2.3 Визначення енергетичної ефективності ТФГСК без селективного покриття залежно від впливу інтенсивності випромінювання та відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК**

Результати проведених експериментальних досліджень ТФГСК без селективного покриття залежно від впливу інтенсивності імітованого потоку теплової енергії та відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони теплопоглинача ТСК наведені в таблиці 3.4 «Матриця М3». Експериментальні дослідження теплової ефективності ТФГСК відповідно до

матриці МЗ проведено за витрати теплоносія  $G = 0,017$  кг/(м<sup>2</sup>·с) та кута надходження теплового випромінювання  $\theta = 90^\circ$ .

Таблиця 3.4 – Матриця МЗ (результати теплової ефективності)

№ п/п	L, м	I <sub>в</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$	Усереднені допоміжні результати	
				$\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$	$F_R^{\text{сп.}}(\tau \cdot \alpha)$
1	0	300	0,20	0,13	16
2	0	600	0,25	0,15	11
3	0	900	0,26	0,15	41
4	0,2	300	0,16	0,11	16
5	0,2	600	0,22	0,13	47
6	0,2	900	0,23	0,14	23
7	0,4	300	0,12	0,09	10
8	0,4	600	0,19	0,12	28
9	0,4	900	0,21	0,13	47

З метою більш ґрунтовного вивчення теплових процесів у ССЕП із ТФГСК проаналізовано зміну температури теплоносія в БА впродовж експерименту. На рисунку 3.13 наведено ТТ в трьох точках умовно поділеного об'єму БА  $t_{\text{БА}1}$ ,  $t_{\text{БА}2}$ ,  $t_{\text{БА}3}$ , °С залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв. Виявлено, що усереднений приріст ТТ в БА збільшився на 17 % за сталих  $I_{\text{в}} = 900$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 0$  м.

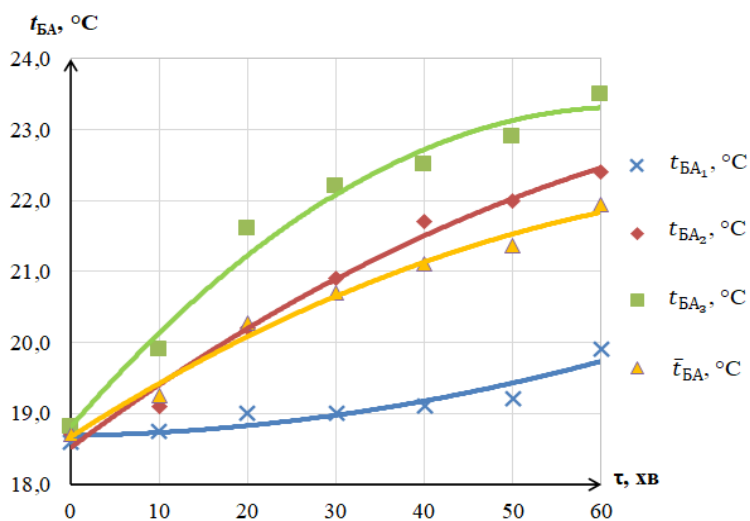


Рисунок 3.13 – Зміна ТТ в БА  $t_{\text{БА}1}$ ,  $t_{\text{БА}2}$ ,  $t_{\text{БА}3}$ , °С та усередненої ТТ БА  $\bar{t}_{\text{БА}}$ , °С залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв за сталих умов:  
 $I_{\text{в}} = 900$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 0$  м

Водночас, порівнюючи динаміку надходження приведеної кількості імітованої енергії  $q_{\text{в}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, що надходила на поверхню ТФГСК, відносно

теплової енергії, яка накопичувалась в БА ССЕРП  $q_{\text{ССЕРП}}^{\text{ТЕ}}$ ,  $\text{кДж/м}^2$ , проаналізовано, що для  $I_{\text{в}} = 300 \text{ Вт/м}^2$  та  $L = 0 \text{ м}$  графічні залежності відрізняються в середньому приблизно в 1.7 раза (рис. 3.14).

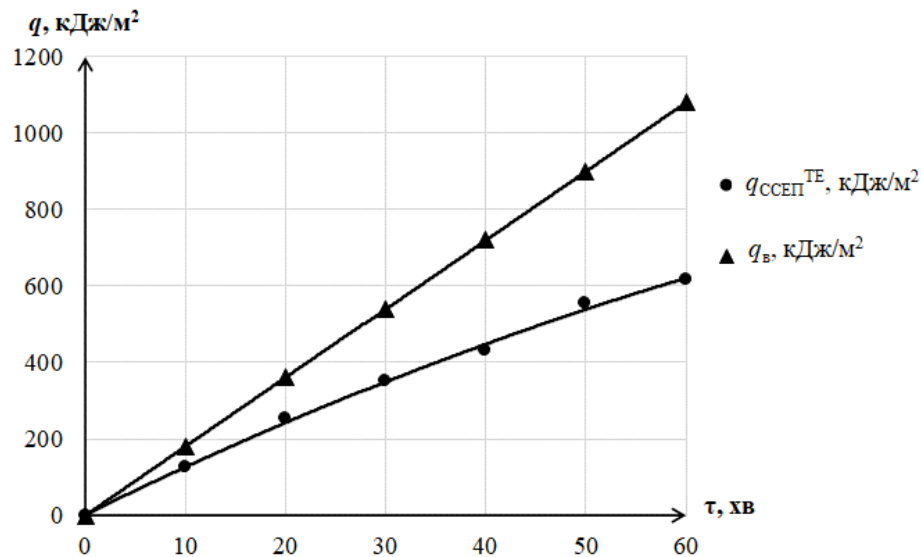


Рисунок 3.14 – Зміна надходження приведеної кількості імітованої енергії, що надходила з накопиченням на поверхню конструкції ТФГСК  $q_{\text{в}}$ ,  $\text{кДж/м}^2$ , та теплової енергії, що накопичувалась в БА ССЕРП  $q_{\text{ССЕРП}}^{\text{ТЕ}}$ ,  $\text{кДж/м}^2$ , залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв за сталих умов:  $I_{\text{в}} = 300 \text{ Вт/м}^2$ ,  $L = 0 \text{ м}$

Пораховано, усереднений рівень кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , в результаті експериментальних досліджень (рис. 3.15).

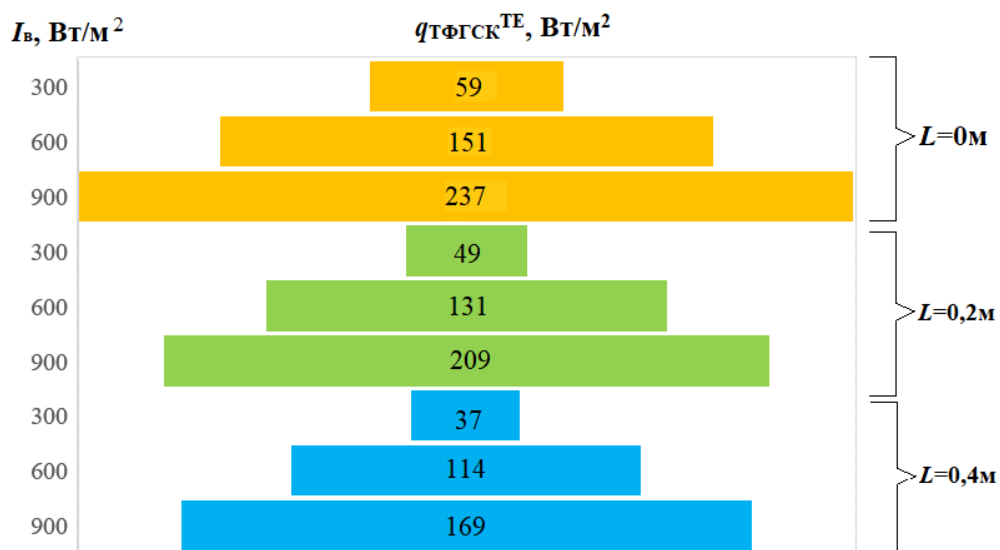


Рисунок 3.15 – Усереднена кількість теплоти  $q_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , отримана в результаті експериментів залежно від обраних факторів

З огляду на запропоновану матрицю лабораторних досліджень, доцільно було порівняти вплив відстані, на якій було розміщено ФСК від ТСК в конструкції ТФГСК, на теплову ефективність. На рисунку 3.16 наведено динаміку зміни теплової ефективності, залежно від інтенсивності надходження імітованого потоку теплової енергії. Динаміка ТЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  на відстані  $L = 0$  м є більша, ніж на відстані  $L = 0,4$  м, приблизно в 1,3 раза [169, 170].

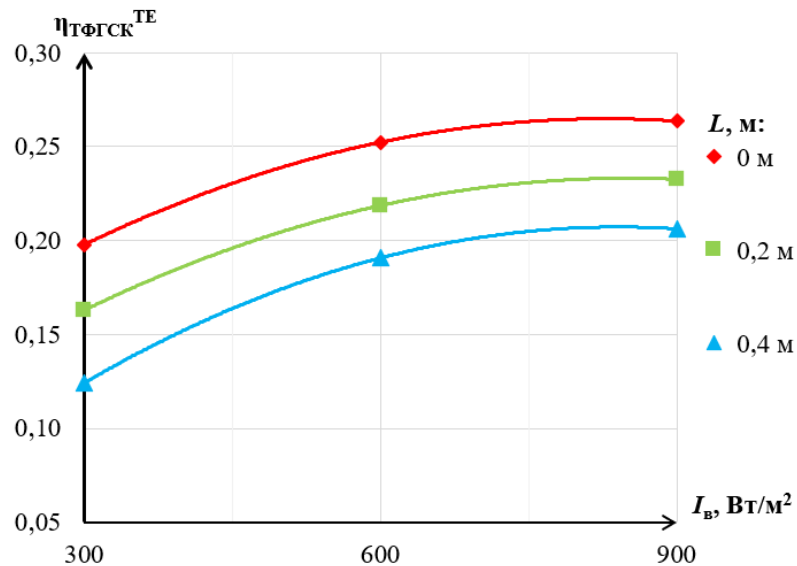


Рисунок 3.16 – Зміна ТЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$ , залежно від відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_{\text{в}}, \text{Вт/м}^2$

Аналізуючи отримані дані в результаті експериментальних досліджень (рис. 3.16) описано математичні рівняння (3.5 а-в) для розрахунку теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(L, \text{м})}$ , що містить фотоелементи:

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(0)} = \frac{-0,022 \cdot I_{\text{в}}^2 + 35 \cdot I_{\text{в}} + 9000}{300^2}, \quad (3.5 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(0,2)} = \frac{-0,021 \cdot I_{\text{в}}^2 + 35 \cdot I_{\text{в}} + 6000}{300^2}, \quad (3.5 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(0,4)} = \frac{-0,020 \cdot I_{\text{в}}^2 + 35 \cdot I_{\text{в}} + 3000}{300^2}. \quad (3.5 \text{ в})$$

На основі експериментальних даних ТЕ конструкції ТФГСК розраховано усереднений коефіцієнт теплопередачі теплової енергії, який становив  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

Наприклад, повний коефіцієнт теплопередачі теплової енергії за сталих умов  $L = 0,4$  м та  $I_B = 600$  Вт/м<sup>2</sup>, становить  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} - 9$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), що було визначено на основі побудованої графічної залежності наведеної на рисунку 3.17, що в  $\approx 4$  рази більше, ніж за сталих умов:  $L = 0$  м та  $I_B = 900$  Вт/м<sup>2</sup>.

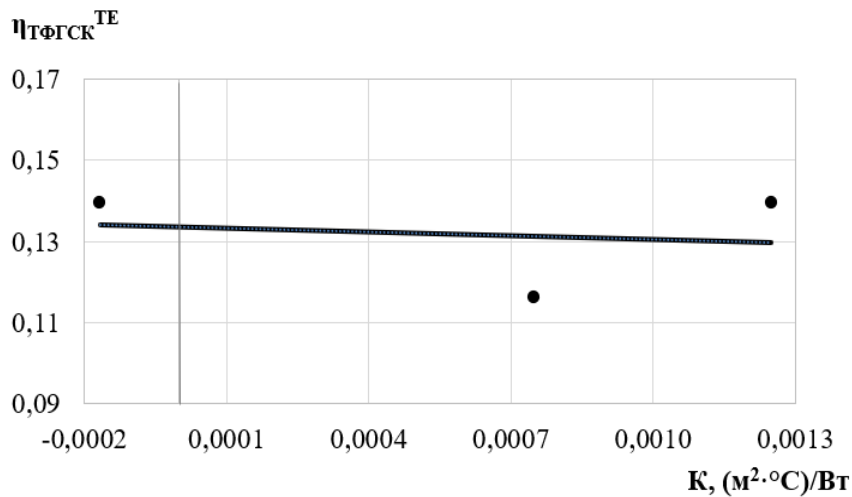


Рисунок 3.17 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}}$  залежно від комплексу  $K$ , (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, за сталих умов:  $I_B = 600$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 0,4$  м

Результати теплової ефективності ССЕР із ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{TE}}$ , що містить фотоелементи в своїй конструкції графічно представлено на рисунку 3.18.

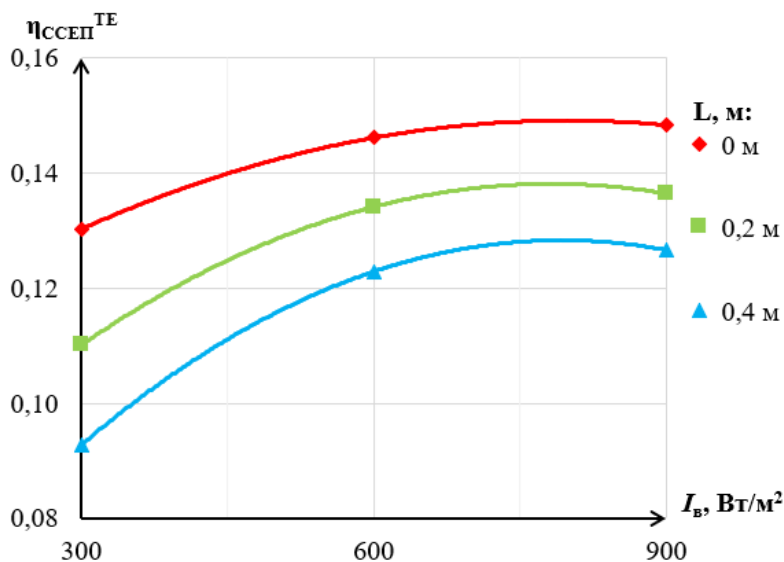


Рисунок 3.18 – ТЕ ССЕР із ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{TE}}$ , залежно від відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_B$ , Вт/м<sup>2</sup>

Відповідно до зазначених виробником технічних характеристик ФСК було розраховано коефіцієнт заповнення ВАХ. Використовуючи цей показник для оцінки динаміки і тенденції електричної ефективності ТФГСК за обраних умов, можна спрогнозувати ефективність інших конструкцій ФСК.



За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму електричної ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}}$  залежно від відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_B$ , Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3.19).

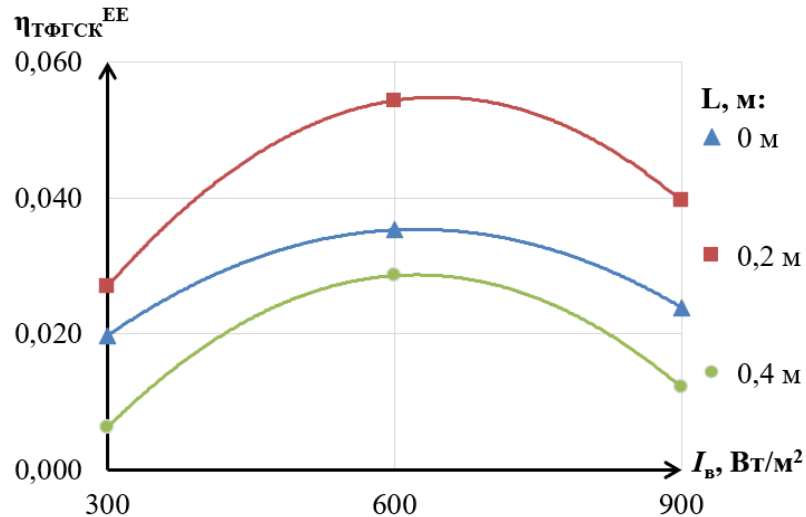


Рисунок 3.19 – Зміна ЕЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}}$ , залежно від відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_B$ , Вт/м<sup>2</sup>

На основі проаналізованих даних отриманих в результаті експериментальних досліджень (рис. 3.19) описано математичні рівняння (3.6 а-в) для розрахунку електричної ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}(L, m)}$ , що містить ФСК в своїй конструкції:

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}(0)} = \frac{-0,0135 \cdot I_B^2 + 16,8 \cdot I_B - 2050}{300^2}, \quad (3.6 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}(0,2)} = \frac{-0,0211 \cdot I_B^2 + 27,2 \cdot I_B - 3840}{300^2}, \quad (3.6 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}(0,4)} = \frac{-0,0194 \cdot I_B^2 + 24,1 \cdot I_B - 4940}{300^2}. \quad (3.6 \text{ в})$$

З метою наочності, побудовано кругові діаграми, що показують співвідношення показників ТЕ та ЕЕ конструкції ТФГСК залежно від відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_B$ , Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3.20).

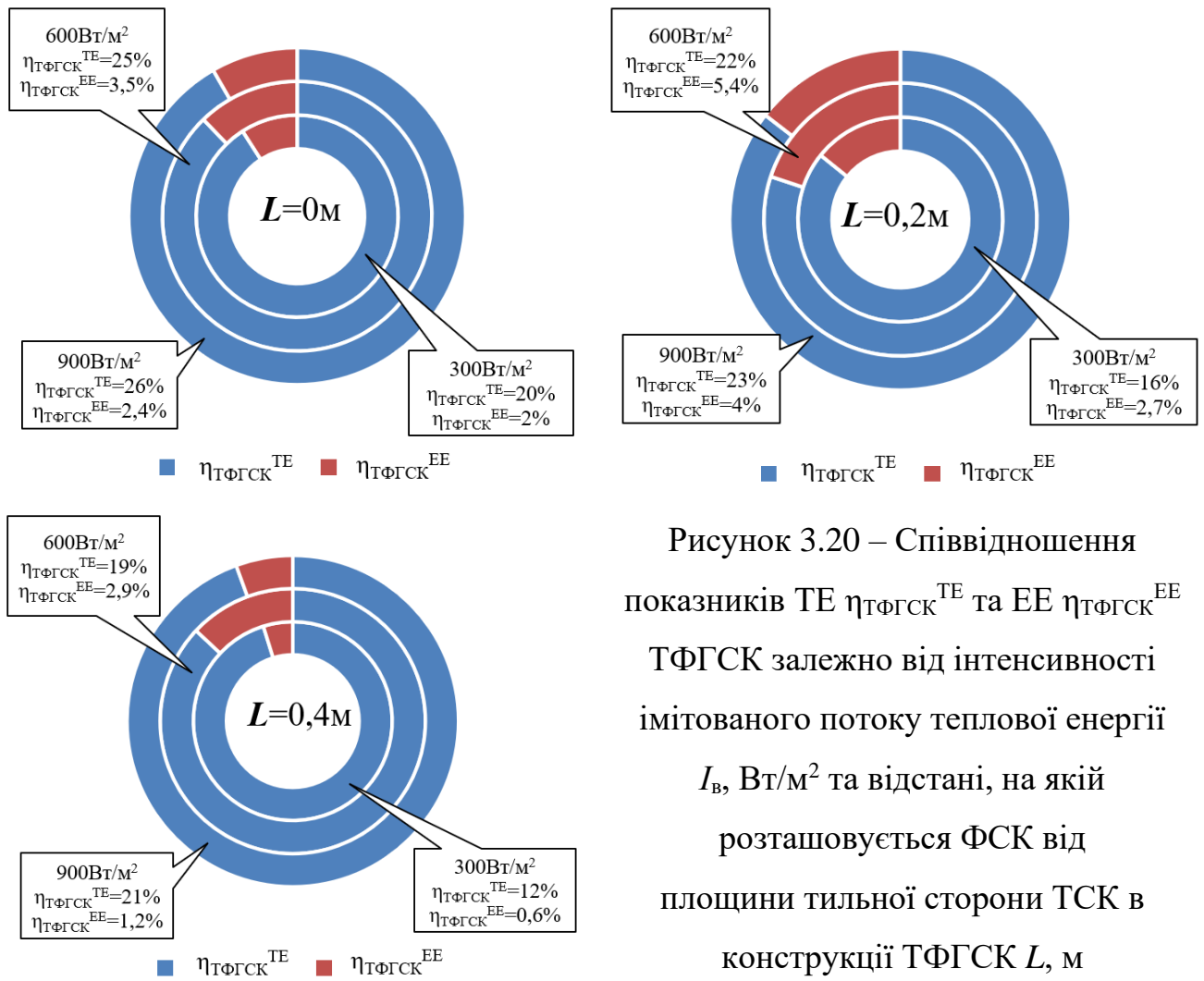


Рисунок 3.20 – Співвідношення показників ТЕ  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{TE}}$  та ЕЕ  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{EE}}$  ТФГСК залежно від інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_{\text{в}}$ ,  $\text{Вт/м}^2$  та відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК  $L$ , м

На рисунку 3.21 наведено співвідношення між енергетичною ефективністю конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{TФГСК}}$ , та ефективністю, що стосується електричного  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{EE}}$ , та теплового  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{TE}}$ , генерування.

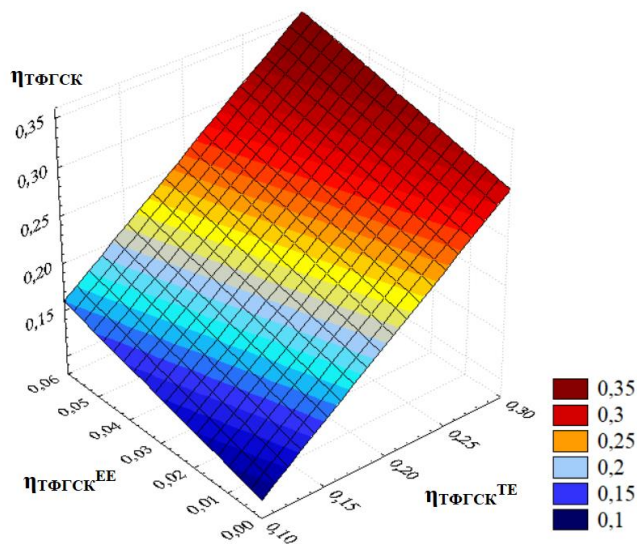


Рисунок 3.21 – Зміна енергетичної ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{TФГСК}}$ , залежно від електричної ефективності  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{EE}}$ , та теплової  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{TE}}$

Наступним етапом дослідження було визначення енергетичної ефективності конструкції ТФГСК із селективним покриттям, що нанесене на скло, з метою зменшення втрат теплової енергії в ньому та підтримання комфортних мікрокліматичних умов в приміщенні для людини.

### **3.3 Лабораторні дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі із селективним покриттям (II етап досліджень)**

#### **3.3.1 Визначення теплової ефективності ТФГСК із селективним покриттям, без наявності ФСК в його конструкції залежно від впливу інтенсивності випромінювання та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК**

Варто згадати, що під час перетворення СВ, приблизно 80 % енергії витрачається на теплове нагрівання ФЕ, що знижує їхню ефективність та призводить до падіння напруги на виході із ФСК, а це основна причина зменшення електричного ККД [169]. Тому, з метою ефективного теплообміну в запропонованій конструкції та за умов строгого дотримання відповідності параметрів мікроклімату в приміщенні, ФСК було розташовано за склом із селективним покриттям. Крім цього, на основі результатів експериментальних досліджень визначено, що розроблена конструкція ТФГСК із селективним покриттям, елементи якого інтегровані в світлопрозорий фасад будівлі, дозволяє збільшити перетворення СВ для генерації більшої кількості ТЕ та ЕЕ. Відведення теплоти теплоносієм, що циркулює по контуру ССЕР та отримана електрична потужність підвищують рівень сумарного продукування енергії.

Експериментальний стенд складався із конструкції ТФГСК, що містила склопакети: звичайний (4-16-4) та із селективним покриттям (4-16-4i), між якими було розміщено звичайне скло. В верхній рамній частині СФБ було розташовано трубки контуру циркуляції, а з боку надходження СВ на рамну частину конструкції

СК нанесено променевідбиваючий шар. За склопакетом 4-16-4і розташували ФСК. Розріз ТФГСК для експериментальних досліджень наведено на рисунку 3.22.

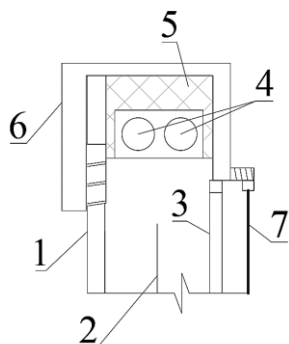


Рисунок 3.22 – Розріз конструкції ТФГСК із селективним покриттям:

- 1 – СП 4-16-4; 2 – звичайне скло; 3 – СП 4-16-4і;  
4 – трубки контуру циркуляції; 5 – теплоізоляція;  
6 – променевідбиваюче покриття; 7 – ФСК

Експериментальна установка працює за визначеною схемою, а саме теплота надходить на світлопрозору теплосприймаючу частину 1. Далі частина енергії затримується в ТФГСК, завдяки використанню склопакета 3 із селективним покриттям 4-16-4і, на який вакуумним напиленням нанесено тришарове покриття з почергових прошарків срібла і діелектрика. Таке скло є низькоемісійним, оскільки покриття не тільки забезпечує захист від УФ-променів із зовнішнього боку, але утримує довгохвильове СВ всередині приміщення. Для такого склопакету характерно близько 98 % світлопрозорості та наявність високих показників опору теплопередачі. Окрім цього, його застосовують для підвищення енергозбереження будівлею. Потім отримана частина енергії від повітряного теплоносія, що міститься між склопакетами 4-16-4 та 4-16-4і, передається рідинному теплоносію. Цей процес відбувається завдяки конвективному перенесенню енергії, що циркулює в трубках контуру циркуляції 4. Для розділення більш нагрітого від прохолоднішого повітряного теплоносія передбачено звичайне скло 2.

З метою підвищення ефективності роботи ТФГСК використано шар теплоізоляції 5 із пінополістиролу товщиною 30 мм і променевідбиваючого екрану 6. Завдяки такому конструктивному рішенню ТФГСК було створено умови для максимального поглинання і передачі теплоносієві падаючого на нього СВ. Фотографії експериментального стенда ТФГСК наведено на рисунку 3.23.

Для зменшення тепловтрат ССЕСП, всі підвідні трубопроводи та БА були теплоізольовані з використанням алюмінієвого покриття як тепловідбивача.

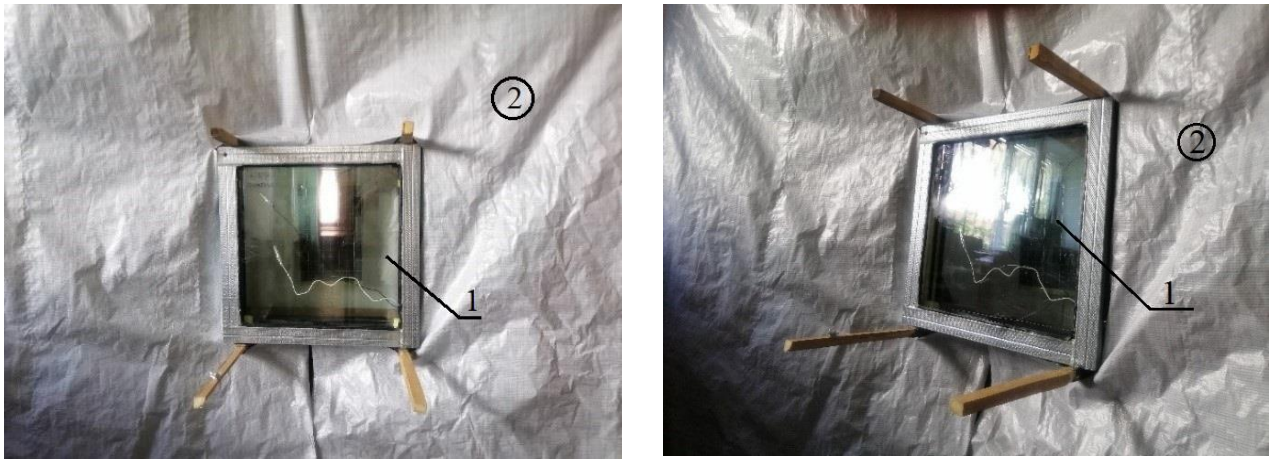


Рисунок 3.23 – Експериментальний стенд для досліджень конструкції ТФГСК, що містить селективне покриття: 1 – ТФГСК; 2 – імітована сіра кімната

Усереднені результати експериментальних досліджень конструкції ТФГСК з селективним покриттям залежно від впливу інтенсивності імітованого теплового випромінювання, кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напряму теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК без наявності ФСК в своїй конструкції за сталої витрати  $G = 0.015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  наведені в таблиці 3.5 «Матриця М4». Проаналізовано, що теплова ефективність запропонованої конструкції із селективним покриттям і без ролетів із ФСК, що є частиною ТФГСК, досягала 27%, що на 18 % більше, ніж для конструкції із звичайним склом.

Таблиця 3.5 – Матриця М4

№ п/п	$I_{\text{в}},$ $\text{Вт}/\text{м}^2$	$\theta, ^\circ$	$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$	Усереднені допоміжні результати			
				$\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$	$U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$	$q_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	$q_{\text{в}}, \text{кДж}/\text{м}^2$
1	900	30	0,22	0,15	7	201	2160
2	900	60	0,26	0,16	2	236	2160
3	900	90	0,30	0,19	10	270	2160
4	600	30	0,21	0,11	2	128	1440
5	600	60	0,25	0,14	16	116	720
6	600	90	0,27	0,16	4	165	1440
7	300	30	0,16	0,06	4	48	720
8	300	60	0,18	0,08	11	54	720
9	300	90	0,19	0,10	9	57	720

Під час проведення експериментів було побудовано графічні залежності приросту ТТ на виході з конструкції ТФГСК  $\Delta t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  та усереднених ТТ в БА  $\Delta \bar{t}_{\text{БА}}, ^\circ\text{C}$  (рис. 3.24).

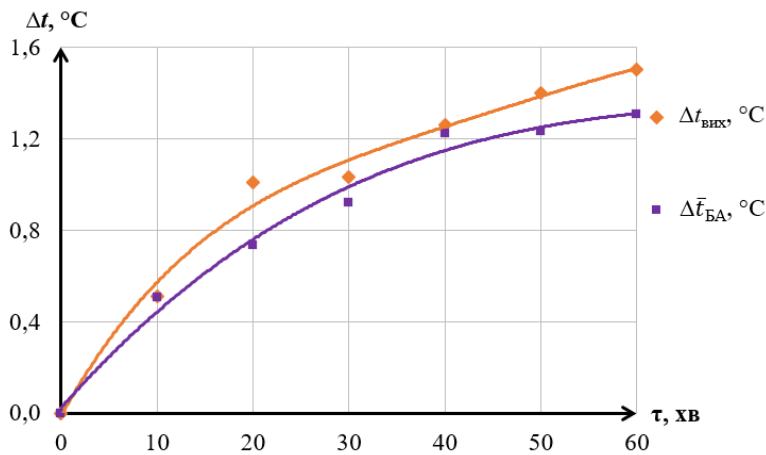


Рисунок 3.24 – Динаміка приросту ТТ на виході з конструкції ТФГСК  $\Delta t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  з селективним покриттям і усереднених ТТ в БА  $\Delta \bar{t}_{\text{БА}}, ^\circ\text{C}$ , залежно від часу проведення експерименту  $\tau, \text{хв}$  за сталих умов:  $I_{\text{в}} = 300 \text{ Вт/м}^2, \theta = 30^\circ$

Окрім цього, було побудовано графічну залежність ТТ на вході  $t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$  та виході  $t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  з експериментальної установки, й температури довкілля  $t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$  залежно від часу проведення експерименту  $\tau, \text{хв}$  (рис. 3.25).

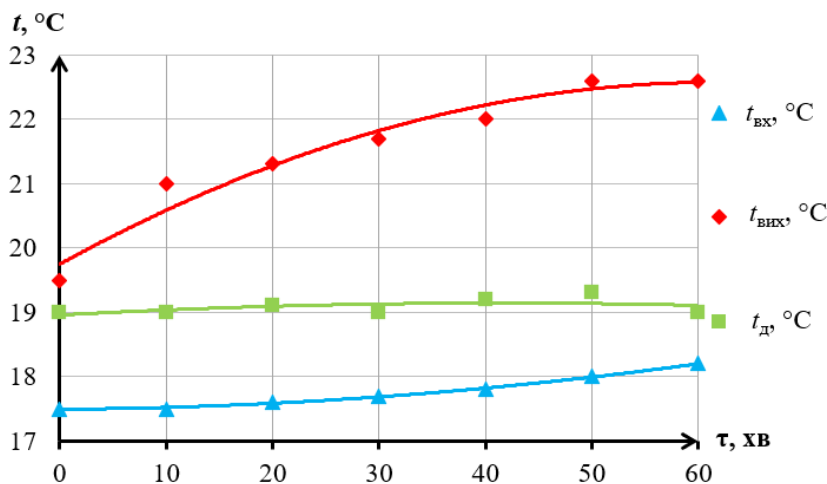


Рисунок 3.25 – Зміна ТТ на вході  $t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$  та на виході  $t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  з ТФГСК з селективним покриттям та ТД  $t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$  залежно від часу проведення експерименту  $\tau, \text{хв}$  за сталих умов:  $I_{\text{в}} = 900 \text{ Вт/м}^2, \theta = 90^\circ$

На основі експериментальних даних побудовано графічну залежність миттєвої кількості тепла отриманої від конструкції ТФГСК в залежності від впливу обраних факторів (рис. 3.26). Встановлено, що миттєва кількість тепла приймала тенденцію до збільшення і досягала максимальних значень за найбільших

надходжень теплового випромінювання. Варто звернути увагу, що це починало спостерігатись після надходження  $600 \text{ Вт/м}^2$  на площину ТФГСК.

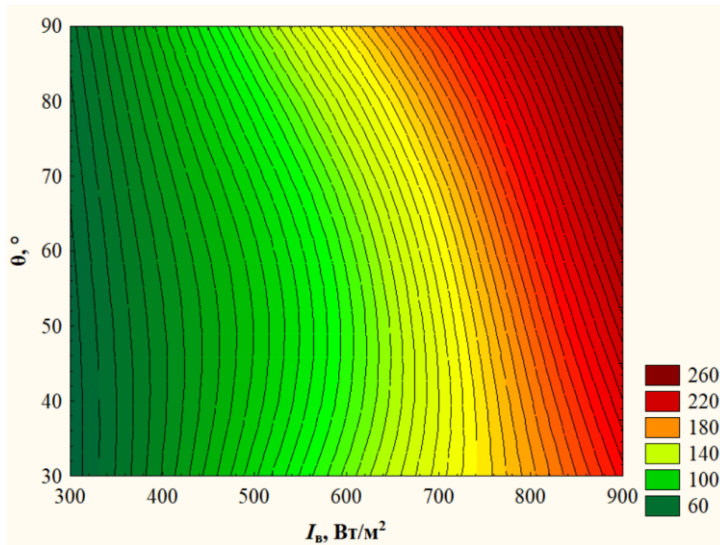


Рисунок 3.26 – Зміна миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{\text{ТФГСК}}$ ,  $\text{Вт/м}^2$  з селективним покриттям залежно від кута надходження теплового випромінювання  $\theta$ ,  $^\circ$  та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії,  $I_B$ ,  $\text{Вт/м}^2$

Проаналізовано, що середнє значення теплової ефективності (рис. 3.27), ТФГСК із селективним покриттям без наявності ФСК в його конструкції становило 23 %. Найменша теплова ефективність становила 16 % за інтенсивності імітованого теплового потоку  $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$  та за кута надходження теплового випромінювання  $30^\circ$ . Отриманий результат був на 14 % менше, порівняно з умовами за найбільшого надходження імітованого потоку теплової енергії та найбільшого кута надходження теплового випромінювання.

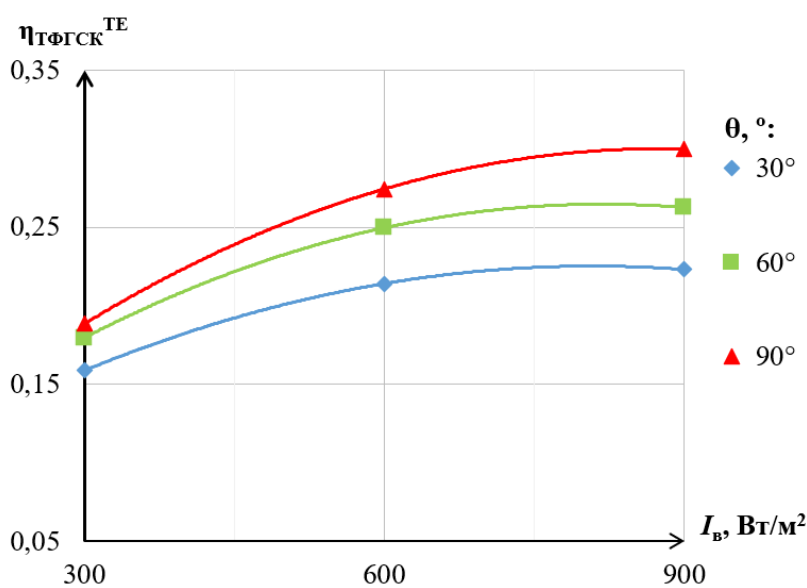


Рисунок 3.27 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  із селективним покриттям залежно від кута надходження теплового випромінювання  $\theta$ ,  $^\circ$  та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії,  $I_B$ ,  $\text{Вт/м}^2$

У результаті аналізу отриманих експериментальних даних (рис. 3.27) отримано математичні рівняння теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(\theta^\circ)}$  із селективним покриттям (ф-ли 3.7 а-в) залежно від кута падіння теплового випромінювання на конструкцію та інтенсивності надходження імітованого потоку теплової енергії:

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(30^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{в}}^2 + 50 \cdot I_{\text{в}} + 1000}{300^2}, \quad (3.7 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(60^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{в}}^2 + 50 \cdot I_{\text{в}} + 3000}{300^2}, \quad (3.7 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(90^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{в}}^2 + 50 \cdot I_{\text{в}} + 5000}{300^2}. \quad (3.7 \text{ в})$$

Окрім цього, було експериментально встановлено значення теплової ефективності ССЕР  $\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{TE}}$ , що містить конструкцію ТФГСК з селективним покриттям (рис. 3.28).

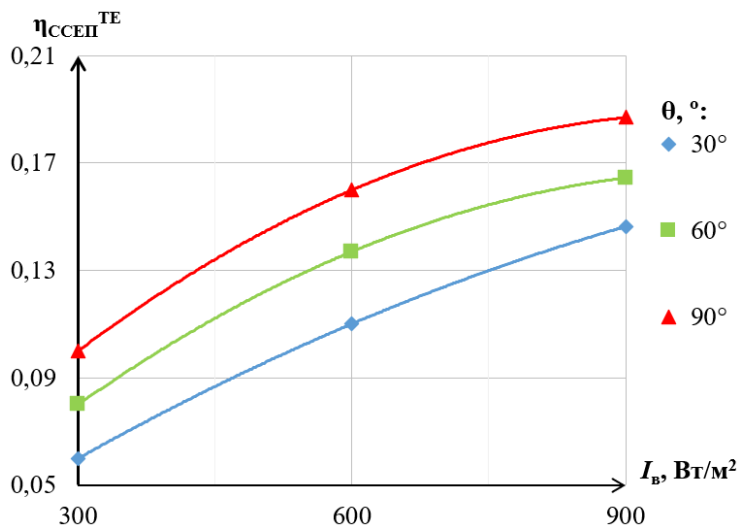


Рисунок 3.28 – Теплова ефективність ССЕР  $\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{TE}}$ , що містить конструкцію ТФГСК із селективним покриттям залежно від кута надходження теплового випромінювання  $\theta$ , ° та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії,  $I_{\text{в}}$ , Вт/м<sup>2</sup>

Максимальний коефіцієнт теплової ефективності в ССЕР, що містить конструкцією ТФГСК із селективним покриттям становить 19 %, що на 6 % більше, ніж із конструкцією, що не містить селективного покриття.

Також, було визначено коефіцієнт відведення теплової енергії  $F_R^{\text{CP}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$ , який за сталих параметрів  $I_{\text{в}} = 900 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 60^\circ$  становить  $3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ , а



коефіцієнт теплопередачі теплової енергії  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Усереднений повний коефіцієнт теплопередачі теплової енергії становив  $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Для порівняння результатів, отриманих за дії вітрового потоку на конструкцію ТФГСК без селективного покриття, а також з метою встановлення теплотехнічних параметрів ТФГСК за дії обраних факторів, були проведені аналогічні дослідження ТФГСК із селективним покриттям.

### 3.3.2 Визначення теплової ефективності ТФГСК з селективним покриттям залежно від впливу швидкості вітру та кута між сприймаючою поверхнею і проекцією напрямку вітрового потоку у його вертикальній площині

Під час експериментальних досліджень отримано усереднені результати теплової ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  з селективним покриттям залежно від впливу швидкості вітру  $\nu$ , м/с та кута між сприймаючою поверхнею і проекцією напрямку вітрового потоку у його вертикальній площині ТФГСК  $\xi$ , °, що відображено в таблиці 3.6 («Матриця М5»). Експериментальні дослідження теплової ефективності ТФГСК були проведені за інтенсивності СВ  $I_{\text{в}} = 600 \text{ Вт}/\text{м}^2$  та витрати теплоносія  $G = 0,017 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Таблиця 3.6 – Матриця М5

№ п/п	$\nu$ , м/с	$\xi$ , °	$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$	Допоміжні результати		
				$\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$	$U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$	К
1.	2,0	0	0,28	0,17	10	0,0019
2.	2,0	45	0,23	0,15	4	0,0034
3.	2,0	90	0,20	0,14	3	-0,0008
4.	4,5	0	0,18	0,14	15	0,0013
5.	4,5	45	0,16	0,12	7	0,0029
6.	4,5	90	0,11	0,09	3	0,0037
7.	6,0	0	0,10	0,08	17	0,0004
8.	6,0	45	0,07	0,05	21	0,0006
9.	6,0	90	0,06	0,04	20	0,0004

Згідно отриманих даних побудовано 3D-графік зміни миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК з селективним покриттям за дії вітрового потоку, залежно від обраних факторів. В результаті експериментальних досліджень, встановлено, що за обраних умов усереднена кількість миттєвої кількості тепла  $q_{\text{ТФГСК}}$  становила  $165 \text{ Вт/м}^2$ , а максимальна – досягала  $194 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 3.29).

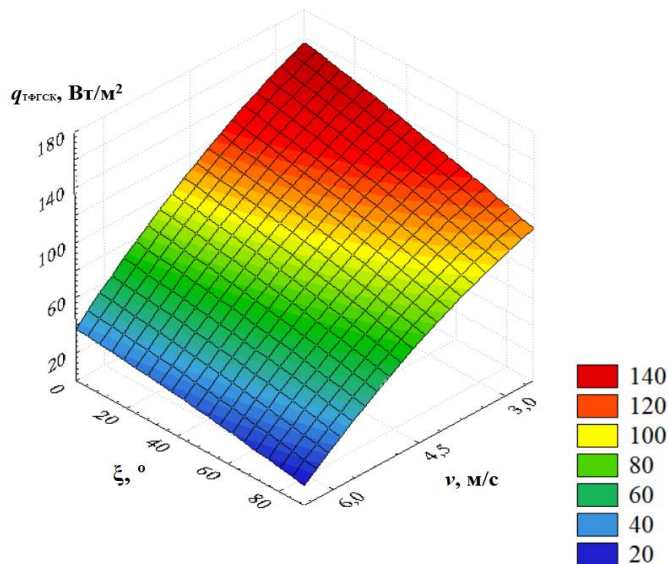


Рисунок 3.29 – Зміна миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{\text{ТФГСК}}$ ,  $\text{Вт/м}^2$  з селективним покриттям за дії різних швидкостей вітру  $v$ ,  $\text{м/с}$  та кута надходження вітрового потоку  $\xi$ ,  $^\circ$

З метою глибшого розуміння теплових процесів, що відбуваються в ССЕР, побудовано графічну залежність зміни температури в баку для акумулювання теплової енергії залежно від часу проведення експерименту (рис. 3.30). Під час аналізу результатів підраховано, що температура в БА на другому умовному рівні  $t_{\text{БА}2}$ ,  $^\circ\text{C}$ , є близькою до середньої температури в БА  $\bar{t}_{\text{БА}}$ ,  $^\circ\text{C}$  (рис. 3.30).

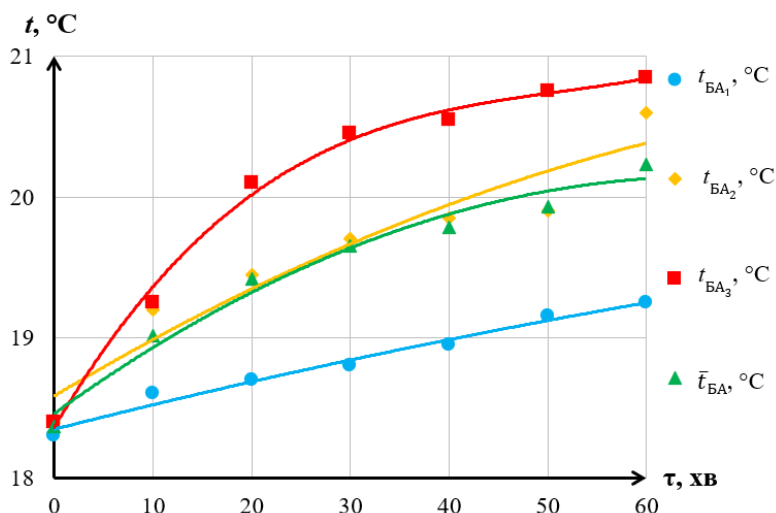


Рисунок 3.30 – Зміна ТТ в БА  $t_{\text{БА}1}$ ,  $t_{\text{БА}2}$ ,  $t_{\text{БА}3}$ ,  $^\circ\text{C}$  та усередненої ТТ БА  $\bar{t}_{\text{БА}}$ ,  $^\circ\text{C}$  залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ ,  $\text{хв}$  за сталих умов:  $v = 4,5 \text{ м/с}$ ,  $\xi = 45^\circ$

Відмічено, що найменші та найбільші отримані значення теплової ефективності, за швидкості повітряного потоку 6 м/с та 2 м/с відповідно, відрізняються між собою на 20 %. Отримані результати свідчать про значний вплив вітру на роботу конструкції ТФГСК із селективним покриттям (рис. 3.31).

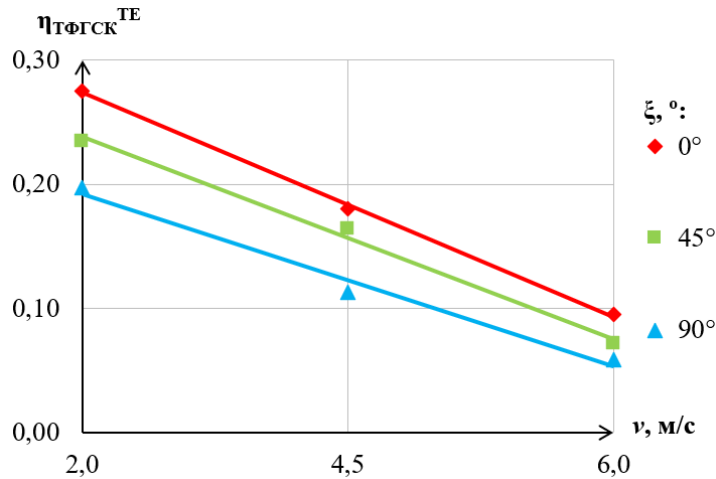


Рисунок 3.31 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  з селективним покриттям за різних швидкостей вітру  $v$ , м/с та кута надходження вітрового потоку  $\xi$ ,  $^\circ$

Під час I етапу досліджень для ССЕП встановлено, що за умов зростання швидкості вітрового потоку отриманим графічним залежностям притаманний стрімкий низхідний характер, тоді як за II-го етапу досліджень ССЕП, в основі якої є конструкція ТФГСК з селективним покриттям за аналогічних умов такою тенденцією не володіла (рис. 3.32).

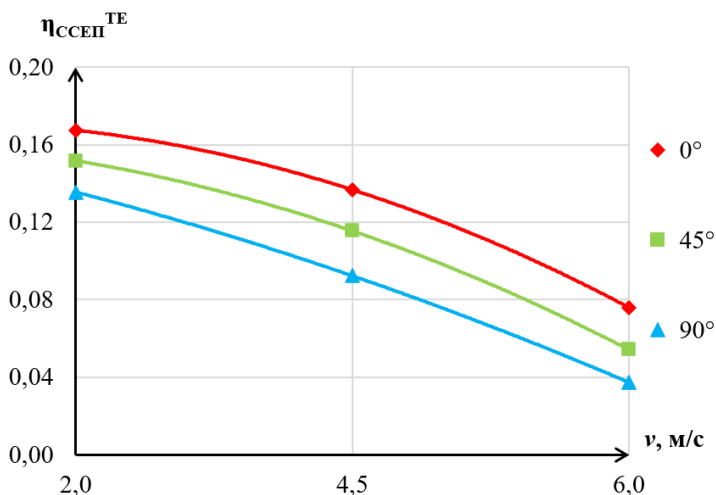


Рисунок – 3.32 Теплова ефективність ССЕП в основі якої є конструкція ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$  із селективним покриттям залежно від швидкості вітру  $v$ , м/с та кута надходження вітрового потоку  $\xi$ ,  $^\circ$

В результаті опрацювання експериментальних даних (рис. 3.32) було отримано математичні рівняння (3.8 а-в) для визначення ТЕ ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}(\xi)}$  з селективним покриттям залежно від  $v$ , м/с та  $\xi$ ,  $^\circ$ :

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(0^\circ)} = -0,045 \cdot \nu_B + 0,37, \quad (3.8 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(45^\circ)} = -0,04 \cdot \nu_B + 0,32, \quad (3.8 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(90^\circ)} = -0,035 \cdot \nu_B + 0,27. \quad (3.8 \text{ в})$$

Усереднений коефіцієнт теплопередачі теплової енергії для конструкції ТФГСК з селективним покриттям становив  $3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  за  $\nu = 4,5 \text{ м/с}$  та  $\xi = 90^\circ$ . Значення коефіцієнта теплопередачі теплової енергії визначено із графіка наведеного на рисунку 3.33. Усереднений коефіцієнт відведення теплової енергії  $F_R^{\text{CP}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  за обраних факторів становив  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , а коефіцієнт теплопередачі теплових втрат –  $11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

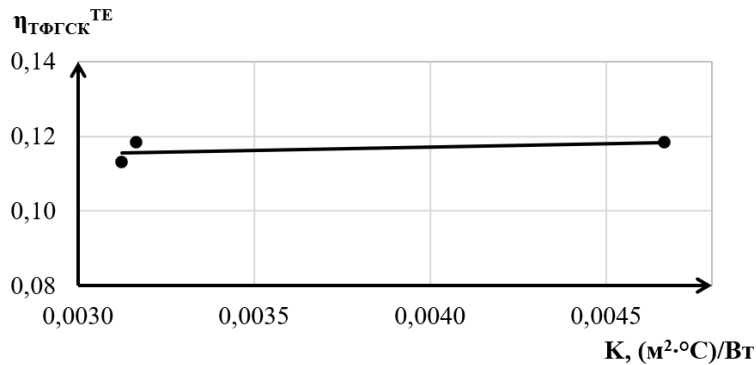


Рисунок 3.33 – Теплова ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}}$  залежно від комплексу  $K$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$  за сталих умов:  $\nu = 4,5 \text{ м/с}$  та  $\xi = 90^\circ$

Наступним етапом дослідження було визначення ефективності ТФГСК з селективним покриттям за сумісної роботи в його конструкції ФСК.

### 3.3.3 Визначення енергетичної ефективності ТФГСК з селективним покриттям і наявністю ФСК в його конструкції залежно від обраних факторів

У результаті проведення експериментальних досліджень отримано результати ТЕ ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}}$  з селективним покриттям залежно від впливу інтенсивності імітованого потоку,  $I_B$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  та відстані, на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони теплопоглинача ТСК,  $L$ ,  $\text{м}$ , що відображено в таблиці 3.7 («Матриця Мб»). Крім цього, відповідно до матриці Мб враховано фактор зміни витрати теплоносія,  $G \cdot 10^{-3}$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , що дав змогу охарактеризувати його вплив на схемне рішення енергоефективної установки.

Таблиця 3.7 – Матриця М6 (результати ТЕ конструкції ТФГСК)

№ п/п	L, м	I <sub>в</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	θ, °	G·10 <sup>-3</sup> , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	η <sub>ТФГСК</sub> <sup>ТЕ</sup>	Допоміжні результати		
						η <sub>ССЕП</sub> <sup>ТЕ</sup>	F <sub>R</sub> <sup>СП</sup> U <sub>пов</sub> <sup>ТФГСК</sup>	t <sub>вх</sub> , °С
1	0,1	700	70	12	0,29	0,14	28	19,9
2	0,3	300	30	12	0,20	0,09	12	20,8
3	0,1	700	30	12	0,26	0,12	11	19,8
4	0,3	700	30	12	0,22	0,13	16	19,7
5	0,1	300	30	12	0,27	0,12	8	21,2
6	0,3	300	70	12	0,23	0,12	26	20,4
7	0,1	300	70	12	0,28	0,14	32	21,1
8	0,3	700	70	12	0,23	0,11	7	19,4
9	0,1	300	30	19	0,18	0,09	19	20,2
10	0,3	300	30	19	0,16	0,09	3	19,5
11	0,1	700	30	19	0,19	0,11	27	19,9
12	0,3	700	30	19	0,17	0,10	13	19,3
13	0,1	300	70	19	0,23	0,10	12	20,6
14	0,3	300	70	19	0,18	0,10	4	20,4
15	0,1	700	70	19	0,21	0,05	2	20,0
16	0,3	700	70	19	0,18	0,10	17	20,0
17	0	500	50	15	0,27	0,16	4	19,6
18	0,4	500	50	15	0,17	0,10	9	19,7
19	0,2	100	50	15	0,23	0,09	28	19,9
20	0,2	900	50	15	0,20	0,11	5	19,4
21	0,2	500	10	15	0,17	0,09	17	20,1
22	0,2	500	90	15	0,25	0,15	18	19,0
23	0,2	500	50	8	0,26	0,14	32	20,0
24	0,2	500	50	23	0,16	0,08	5	20,8
25	0,20	500	50	15	0,21	0,11	11	20,0

У результаті аналізу даних експериментальних досліджень, було побудовано типові графічні залежності зміни температур поверхні на яку надходив тепловий потік, а саме з селективним покриттям (4-16-4і) та без нього (4-16-4). Проаналізовано, що усереднена температура на поверхні СП відрізнялась між собою наближено на 20.5% (рис. 3.34).

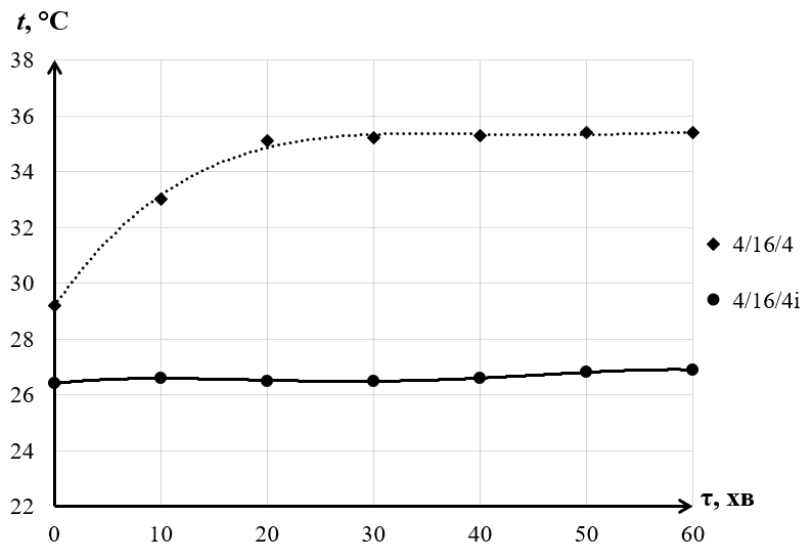


Рисунок 3.34 – Зміна температури на поверхні скла без селективного покриття  $t_{4/16/4}, ^\circ\text{C}$  та з селективним покриттям  $t_{4/16/4i}, ^\circ\text{C}$  за сталих умов:  $L = 0,1\text{м}$ ,  $I_B = 700 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $G = 0,019 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , залежно від  $\tau, \text{хв}$

Аналіз цих показників підтверджує доцільність застосування селективного покриття в конструкції ТФГСК і її ефективність у підтримці комфортних мікрокліматичних умов в приміщенні в жаркий період доби.

Окрім цього, було отримано графічну залежність зміни температури в БА залежно від часу проведення експерименту. Відмічено, що температура за період проведення експерименту збільшилась на 27 % (рис. 3.35).

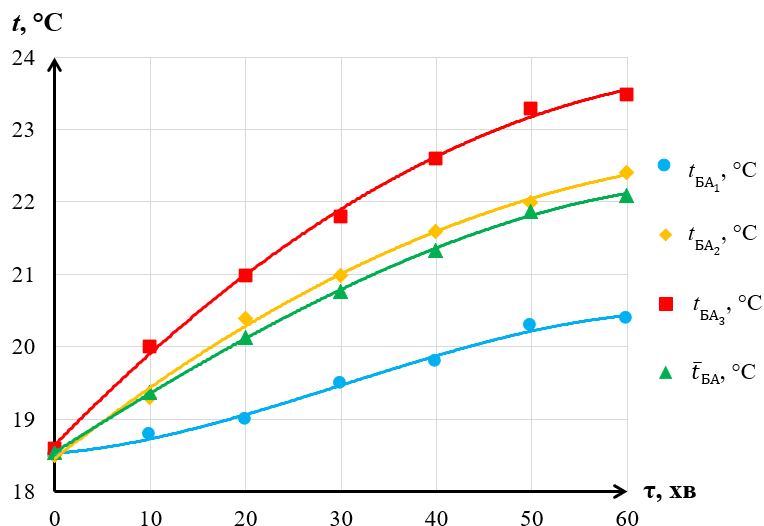


Рисунок 3.35 – Зміна ТТ в баку для акумулювання теплової енергії  $t_{\text{БА}_1}, t_{\text{БА}_2}, t_{\text{БА}_3}, ^\circ\text{C}$  та усередненої ТТ в БА  $\bar{t}_{\text{БА}}, ^\circ\text{C}$  за сталих умов:  $L = 0\text{м}$ ,  $I_B = 500 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 50^\circ$ ,  $G = 0,019 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$  залежно від  $\tau, \text{хв}$

Зміна миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора з селективним покриттям має зростаючий характер, проте із продовженням надходження стабільної кількості

імітованої теплової енергії поступово виходить на плато, про що свідчать отримані результати за обраних факторів (рис. 3.36).

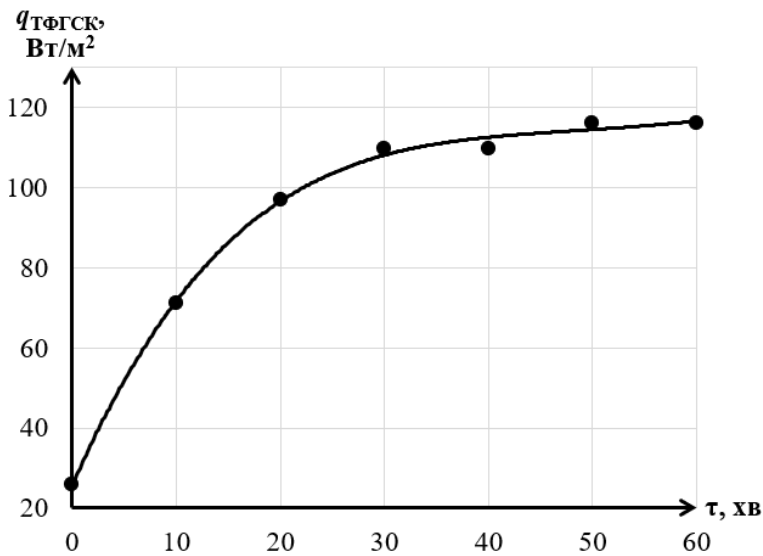


Рисунок 3.36 – Зміна миттєвої кількості теплоти отриманої від конструкції ТФГСК  $q_{ТФГСК}$ , Вт/м<sup>2</sup> з селективним покриттям за сталих умов:  $L = 0,2$  м,  $I_B = 500$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\theta = 50^\circ$ ,  $G = 0,015$  кг/(м<sup>2</sup>·с), залежно від часу проведення експерименту  $\tau$ , хв

Досліджено, що при збільшенні відстані між поверхнями ТСК і ФСК у конструкції ТФГСК, за інтенсивності 500 Вт/м<sup>2</sup> динаміка зміни ТЕ набуває стрімкого низхідного характеру (рис. 3.37).

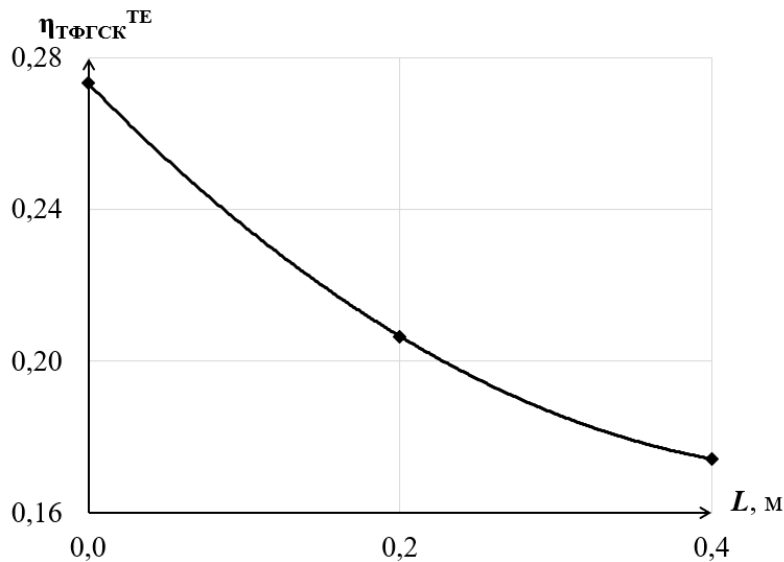


Рисунок 3.37 – Зміна ТЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{ТФГСК}^{ТЕ}$  за сталих умов:  $I_B = 500$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\theta = 50^\circ$ ,  $G = 0,015$  кг/(м<sup>2</sup>·с), в залежності від відстані між ТСК та ФСК  $L$ , м

Крім вище зазначеного, отримано графічні залежності зміни коефіцієнта теплової ефективності системи сонячного енергопостачання в основі якої є конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора з селективним покриттям залежно від часу проведення експерименту. Показано, що

теплова ефективність в ССЕСП збільшується приблизно на 13 % за 50 хв впродовж експерименту (рис. 3.38).

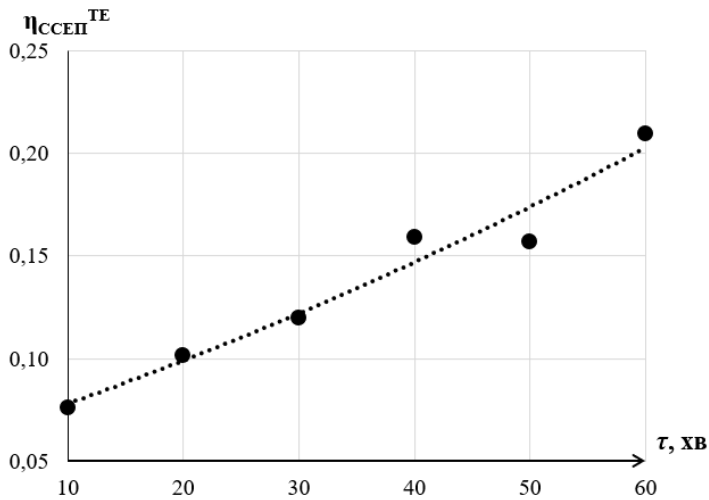


Рисунок 3.38 – ТЕ ССЕСП в основі якої є конструкція ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕСП}}^{\text{ТЕ}}$  з селективним покриттям за сталих умов:  $L = 0,1$  м,  $I_{\text{в}}=700$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\theta=70^\circ$ ,  $G = 0,015$  кг/(м<sup>2</sup>·с) залежно від тривалості проведення експерименту  $\tau$ , хв

На рисунку 3.39 наведено 3D-графік зміни теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  залежно від впливу відстані на якій розташовується ФСК від тильної сторони поверхні ТСК в розробленій установці  $L$ , м, та інтенсивності імітованого потоку теплової енергії  $I_{\text{в}}$ , Вт/м<sup>2</sup>. Ця графічна залежність показує лінійну динаміку зміни ефективності за обраних факторів.

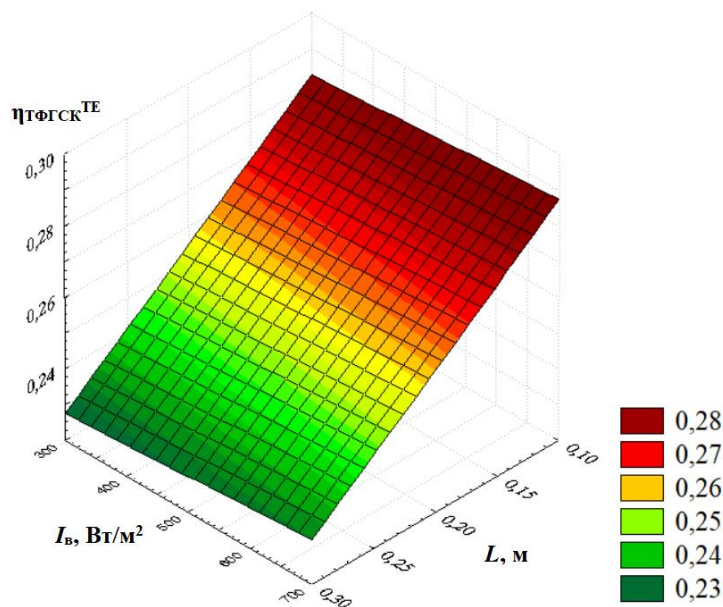


Рисунок 3.39 – Зміна ТЕ ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  залежно від зміни інтенсивності СВ  $I_{\text{в}}$ , Вт/м<sup>2</sup> та відстані між тильною поверхнею ТСК та ФСК в розробленій конструкції  $L$ , м за сталих умов:  $\theta = 70^\circ$ ,  $G = 0,012$  кг/(м<sup>2</sup>·с) залежно від тривалості експерименту  $\tau$ , хв



Також, було отримано дані співвідношення значень теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  від встановленої витрати в системі сонячного енергопостачання  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) та кута надходження імітованого потоку сонячного випромінювання  $\theta$ , ° (рис. 3.40).

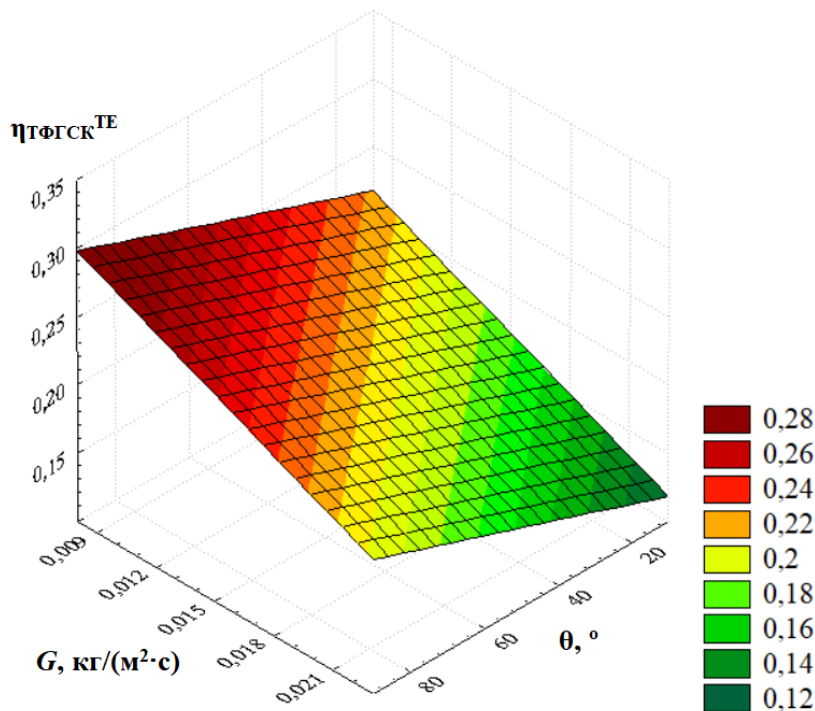


Рисунок 3.40 – Зміна ТЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  залежно від встановленої витрати в ССЕП  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) та кута надходження імітованого потоку СВ  $\theta$ , ° за сталих умов:  $L = 0,2$  м,  
 $I_{\text{в}} = 500$  Вт/м<sup>2</sup>

Інтерпретуючи отримані результати теплової ефективності конструкції ТФГСК (рис. 3.39-3.40) виявлено лінійну залежність між даними факторами. Найбільша ефективність спостерігалась за витрати  $G = 0,012$  кг/(м<sup>2</sup>·с) та відстані між ТСК та ФСК в конструкції ТФГСК  $L = 0,1$  м [182].

На основі результатів вище проведених досліджень конструкції ТФГСК в ССЕП відповідно до матриці М6 побудовано номограму впливу обраних факторів на функцію відгуку (рис. 3.41).

Окрім цього, охарактеризовано вплив обраних факторів на електричну ефективність ТФГСК. Оскільки, в конструкції ТФГСК фактор  $G \cdot 10^{-3}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) не має істотного впливу на електричну ефективність, то центральний композиційний ортогональний план другого порядку матриці М6 було змінено до загальної кількості 15 дослідів, серед яких: 8 точок ядра плану, 6 «зоряних» точок та відстань до «зоряного» плеча, яка становить 1,215.

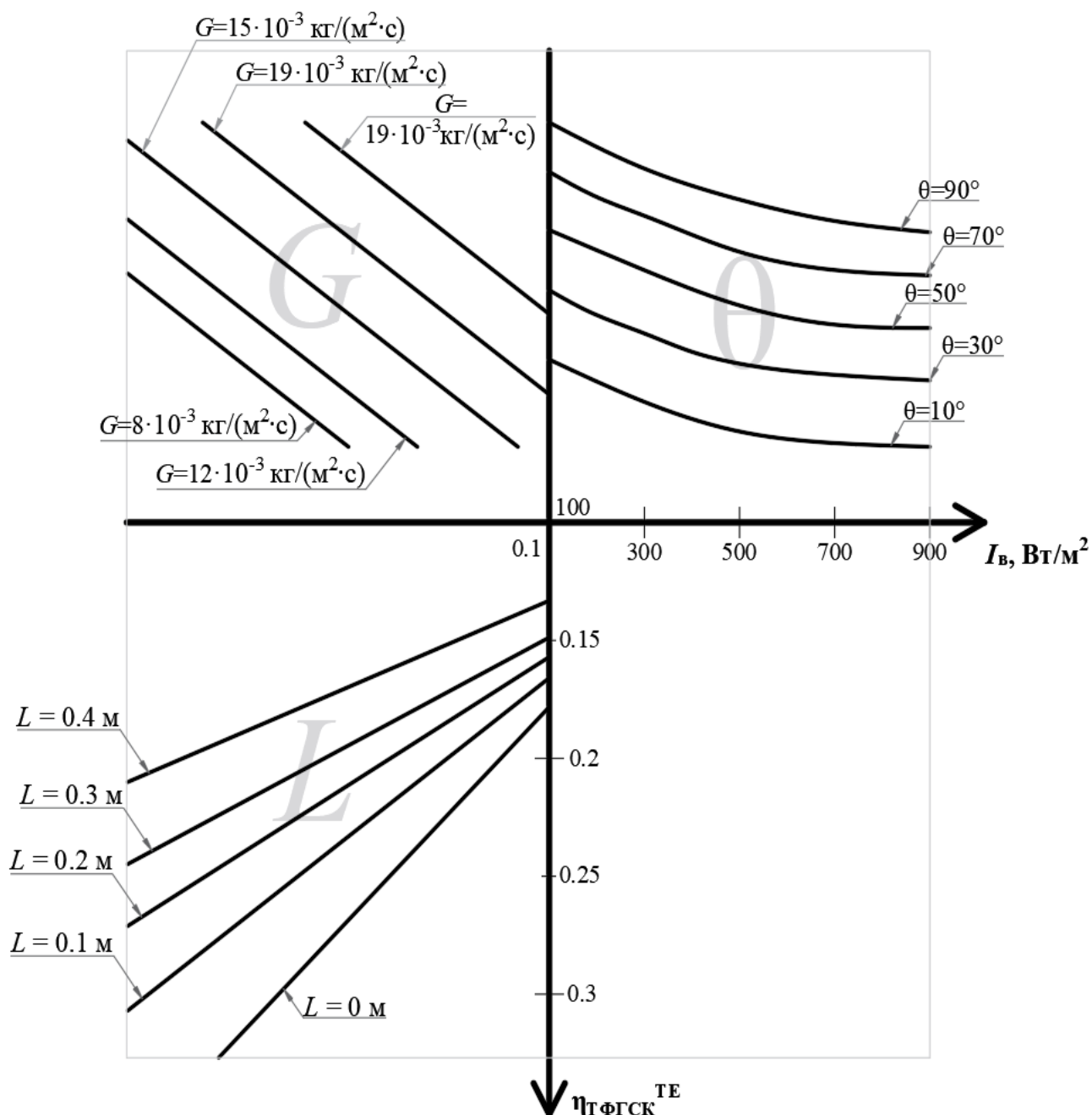


Рисунок 3.41 – Номограма визначення впливу факторів  $L$ , м;  $I_b$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$ , °;  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) на теплову ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{TФГСК}}^{\text{TE}}$

В цілому, отримана матриця  $M6'$  відрізняється від діагональної матриці  $M6$ , проте, згідно літературних даних, таке відхилення є наслідком заокруглення значення «зоряного» плеча та нормованості матриці (середнього квадратичного значення будь-якого параметру матриці), та не вносить суттєвих змін у властивості ортогональності. Результати електричної ефективності ТФГСК матриці  $M6'$  наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Матриця М6' (результати ЕЕ конструкції ТФГСК)

№	$L, \text{ м}$	$I_B, \text{ Вт/м}^2$	$\theta, ^\circ$	$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}}$
1	0,1	700	70	0,029
2	0,3	300	30	0,012
3	0,1	700	30	0,023
4	0,3	700	30	0,019
5	0,1	300	30	0,014
6	0,3	300	70	0,016
7	0,1	300	70	0,020
8	0,3	700	70	0,027
9	0	500	50	0,037
10	0,4	500	50	0,013
11	0,2	100	50	0,011
12	0,2	900	50	0,050
13	0,2	500	10	0,004
14	0,2	500	90	0,023
15	0,2	500	50	0,022

За отриманими даними побудовано типову графічну залежність електричної ефективності конструкції ТФГСК від температури на поверхні ФСК (рис. 3.42).

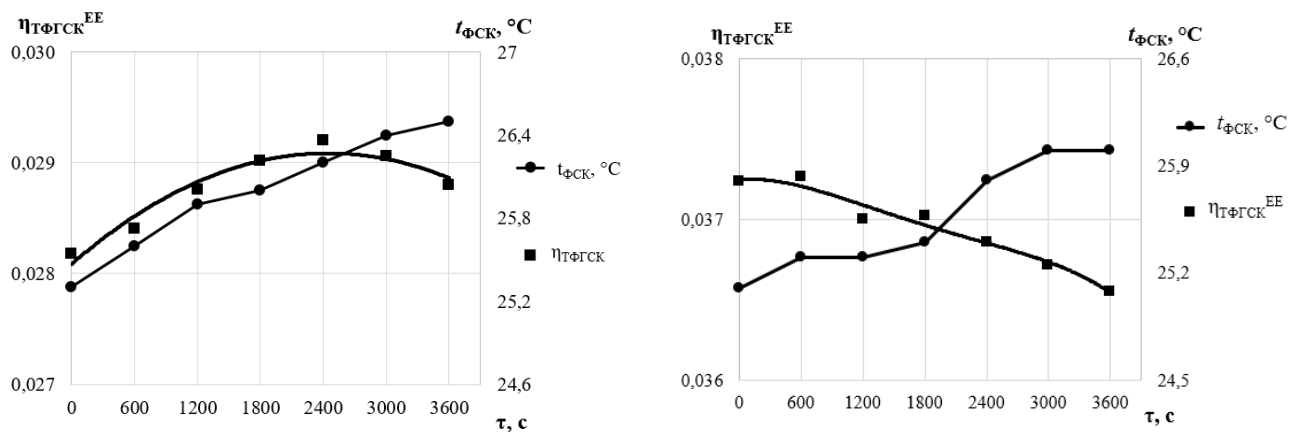
а)  $L = 0.1 \text{ м}$ ,  $I_B = 700 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 70^\circ$ б)  $L = 0 \text{ м}$ ,  $I_B = 500 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\theta = 50^\circ$ 

Рисунок 3.42 – ЕЕ конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}}$  та температура на поверхні ФСК  $t_{\text{ФСК}}, ^\circ\text{C}$  залежно від часу проведення експерименту  $\tau, \text{с}$

За наявності селективного покриття в конструкції ТФГСК не виявлено значного падіння напруги ХХ, оскільки стабілізація температури на поверхні ФСК

мала плавний характер, тому на протигагу конструкції ТФГСК без селективного покриття не спостерігається різкого падіння електричної ефективності за обраних факторів. Спадний характер падіння напруги проявлявся за щільного розташування ФСК відносно ТСК, тобто на відстані  $L = 0$  м. Проте, на відстані від 0,1 м до 0,4 м такого ефекту виявлено не було.

Аналізуючи отримані експериментальні дані, побудовано номограму визначення коефіцієнта ЕЕ ТФГСК із селективним покриттям (рис. 3.43).

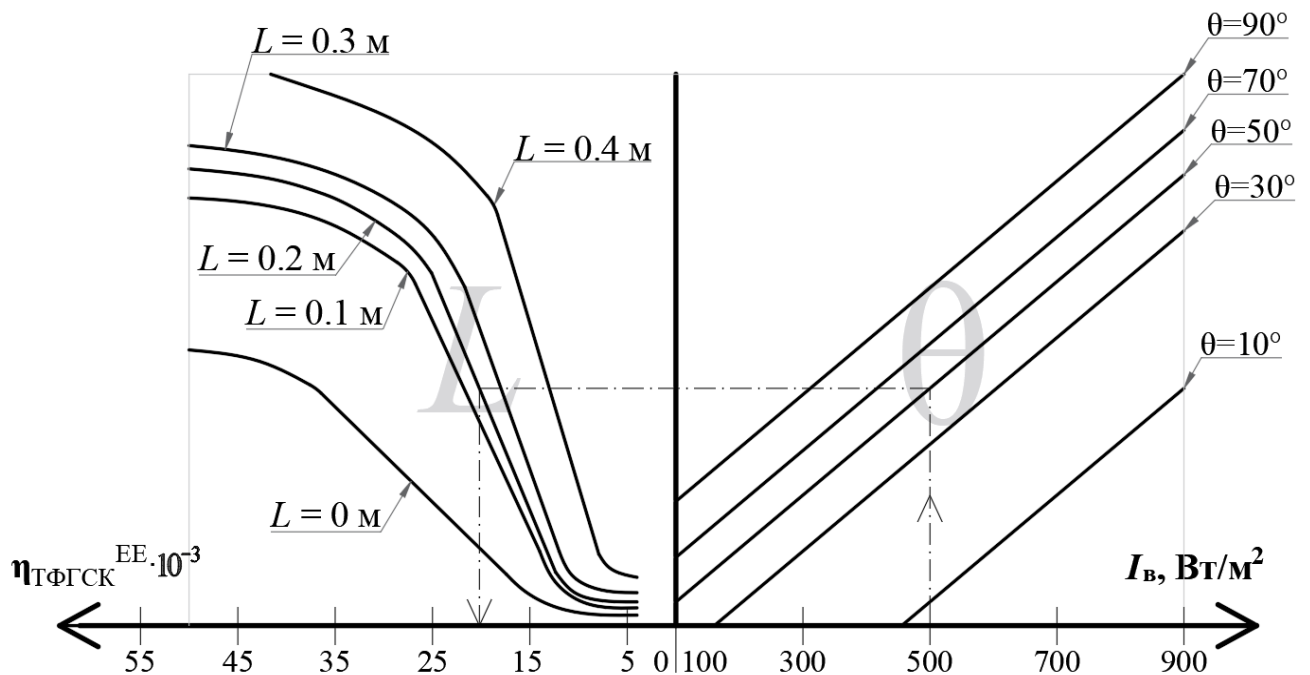


Рисунок 3.43 – Номограма впливу факторів  $L$ , м;  $I_b$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$ , ° на електричну ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ЕЕ}}$

Крім цього, було визначено усереднений коефіцієнт відведення теплової енергії  $F_R^{\text{CP}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  конструкції ТФГСК, який становив 15 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), при цьому коефіцієнт теплопередачі теплової енергії  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  – 8 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Варто звернути увагу на те, що отриманий коефіцієнт теплопередачі теплової енергії був досліджений і за несприятливих факторів таких як кут надходження СВ – 10° та інтенсивність СВ – 100 Вт/м<sup>2</sup>, що дозволило визначити умови для підвищення значень електричної ефективності.

Також, щоб забезпечити нормовані оптичні умови для комфортного перебування людини в приміщенні, було розроблено концепцію запропонованої

конструкції ТФГСК з рухомими вертикальними ролетами з визначенням нормованості освітлення в приміщенні.

### **3.4 Визначення впливу освітленості в приміщенні під час застосування конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Відомо, що рівень освітлення в приміщенні впливає на здоров'я та самопочуття людини, оскільки є чинником від якого залежить інтенсивність протікання метаболічних процесів у людському організмі. В Україні нормування освітлення визначено положеннями основного нормативного документа – ДБН В.2.5-28-2018 [33]. Під час вибору раціонального освітлення робочої зони в приміщенні необхідно керуватися потребою в найбільшій кількості природного освітлення. Однак, не можна забути, що при цьому неодмінною умовою є встановлення СЗП для споруд із перевищеним коефіцієнтом застосування фасаду, бо надмірне надходження освітлення в літній період призводить до дискомфорту людини в такому приміщенні.

Збільшення освітленості від 100 до 1000 люкс, за напруженої зорової роботи, призводить до: підвищення продуктивності праці на 10-20 %, зменшення помилок на 20 %, зниження кількості нещасних випадків на 30 % [97].

Для дослідження освітленості в приміщенні як функції відгуку було вибрано коефіцієнт природної освітленості (КПО),  $D$ , % (3.9):

$$D = (E_{\text{вн}}/E_{\text{зовн}}) \cdot 100 \%, \quad (3.9)$$

де  $E_{\text{вн}}$  – природна освітленість в даній точці площини всередині приміщення, яка створюється світлом в певний період доби (безпосереднього або після відбиття), лк;  $E_{\text{зовн}}$  – зовнішня горизонтальна освітленість, що створюється за умов безхмарного неба, лк.

Варто врахувати те, що за умов недостатньої кількості природного освітлення, застосовується штучне освітлення, тому розрахунки повинні відображати суміщене освітлення. За суміщеного освітлення КПО нормується так само, як за природного освітлення. Як наслідок, для проведення

експериментальних досліджень вибрано регульоване змішане освітлення на площину ТФГСК, а за функцію відгуку – КПО.

Експериментальні дослідження проводились на горизонтальній поверхні для умовно робочої зони на висоті 0,8 м від рівня підлоги та 1 м від ТФГСК [97]. Проведення замірів на відстані 1 м від ТФГСК дозволило забезпечити експериментальні дослідження освітленості щодо світлового прорізу з площею 0,5 м<sup>2</sup> на рівні допустимого. Для досліджень природного освітлення встановлено імітатор надходження теплового потоку з метою можливості зміни освітленості, яка надходила на площину ТФГСК. Дослідження проводились в імітованій сірій кімнаті для уникнення значного коефіцієнта перевідбивання та поглинання. В період проведення експериментальних досліджень зовнішня горизонтальна змішана освітленість приміщення становила 1230 лк, тоді як внутрішня горизонтальна змішана освітленість приміщення – 960 лк.

Нормованим значенням КПО для приміщення (ф-ла 3.10), яке розташоване в IV світловому поясі, в даному випадку для лабораторії, де відбувались експериментальні дослідження, становить:

$$\begin{aligned} D_{N_{\min}} &= D_{n_{\min}} \cdot m_N = 0,7 \cdot 0,85 = 0,595 \% , \\ D_{N_{\text{сеп}}} &= D_{n_{\text{сеп}}} \cdot m_N = 2,1 \cdot 0,85 = 1,785 \% , \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $D_n$  – нормоване значення КПО визначено за табл. Д2 [33];  $m_N$  – визначено за табл. Н1 [33].

При дослідженні КПО для світлопрозорого фасаду будівлі, що містить конструкцію ТФГСК обрано фактори:

- $x_8$  [300; 600; 900] – суміщене освітлення, що надходить на зовнішню поверхню ТФГСК,  $E_{\text{зовн}}$ , лк;
- $x_9$  [32; 64; 96] – процент затінення площі ТФГСК з тильної сторони площею ФСК,  $T$ , %;
- $x_{10}$  [0; 30; 60] – кут повороту вертикального ролета, що визначається між ФСК та тильною поверхнею ТСК в конструкції ТФГСК,  $\psi$ , °.

На основі обраних факторів, побудовано матрицю експериментальних досліджень М7, що враховує фактори  $x_8$  та  $x_9$ . Варто звернути увагу, що рівень освітлення 300-900 лк попадає в діапазон нормованого освітлення, що відповідає роботі, наприклад, в офісі, в конференц залі чи під час проектування будівель та споруд. Тобто, якщо в приміщення через світловий проріз буде надходити певна кількість освітлення, то за допомогою матриці досліджень М7 можна встановити, чи відповідатиме нормованим значенням отримана кількість освітлення за застосування ФСК в конструкції ТФГСК як частини СЗП фасаду. Процент затінення 32-96 % відповідає використаній в експериментальних дослідженнях площі ФСК, яка була вибрана по відношенню до кількості та площі рухомих вертикальних ролет ФСК, а також загальної площі ТФГСК (табл. 3.9).

Коефіцієнт КПО оцінює не величину освітленості, а частину світла, що надійшла в приміщення через світлопрозорий фасад будівлі, від зовнішньої горизонтальної освітленості. В цьому випадку для лабораторії мінімально визначений допустимий коефіцієнт КПО становить 0,595 %. Як наслідок, отримана функція відгуку відповідає мінімально встановленому коефіцієнту КПО, однак, коли процент затінення стає 96 %, то КПО є меншим середньо-рекомендованого для даного типу приміщення.

Таблиця 3.9 – Матриця М7

№ п/п	$E_{зовн}$ , лк	T, %	$E_{вн}$ , лк	$D_{\phi}$ , %
1	300	32	8	2,593
2	600	64	12	2,074
3	900	96	13	1,444
4	300	64	5	1,704
5	600	96	8	1,333
6	900	32	36	4,012
7	300	96	3	1,148
8	600	32	20	3,259
9	900	64	22	2,407

На основі результатів експериментальних досліджень, відповідно до матриці М7, для наочності побудовано 3D-графік зміни КПО залежно від проценту затінення площі ТСК з тильної сторони площею ФСК в конструкції ТФГСК та від кількості падаючого суміщеного освітлення на зовнішню поверхню ТСК в розробленій установці (рис. 3.44)

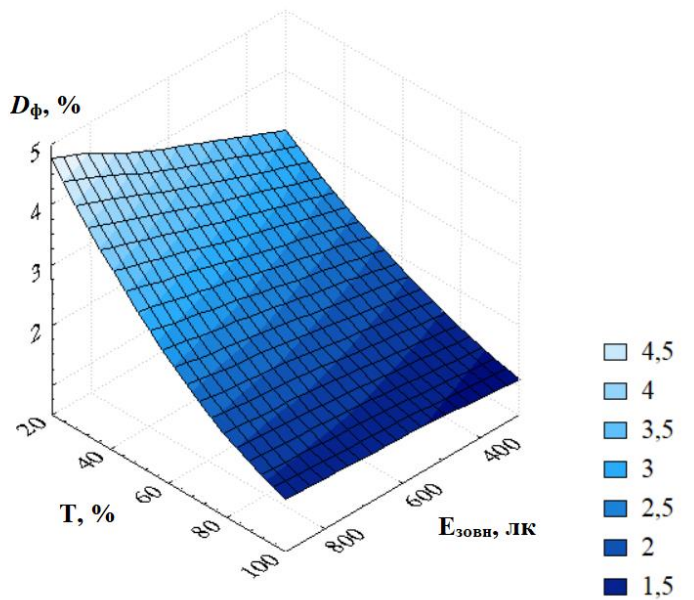


Рисунок 3.44 – Зміна КПО  $D_{\phi}$ , % залежно від проценту затінення площі ТФГСК з тильної сторони площею ФСК  $T$ , % та від кількості падаючого суміщеного освітлення на зовнішню поверхню ТСК в конструкції ТФГСК  $E_{\text{зовн}}$ , ЛК

Відповідно до матриці М8 було запропоновано розглянути вплив кількості падаючого суміщеного освітлення на зовнішню поверхню ТСК в конструкції ТФГСК  $E_{\text{зовн}}$ , ЛК враховуючи фактор обертання ролета, на який нанесено ФЕ, навколо вертикальної осі  $\psi$ , ° (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Матриця М8

№ п/п	$E_{\text{зовн}}$ , ЛК	$\psi$ , °	$E_{\text{вн}}$ , ЛК	$D_{\phi}$ , %
1	300	0	5	1,667
2	600	30	13,3	2,217
3	900	60	21	2,333
4	300	30	6,5	2,167
5	600	60	16,5	2,750
6	900	0	15	1,667
7	300	60	8	2,667
8	600	0	11	1,833
9	900	30	18,2	2,022



Для даного типу приміщення в якому проводились експериментальні дослідження (лабораторія), функція відгуку в матриці М8 мала значення не менше мінімально розрахованого КПО. Для встановлення кількості падаючого суміщеного освітлення на зовнішню поверхню ТСК конструкції ТФГСК в залежності від обертання додаткових кутів ролета, на який нанесено ФЕ, навколо вертикальної осі, запропоновано графічну залежність наведену на рисунку 3.45.

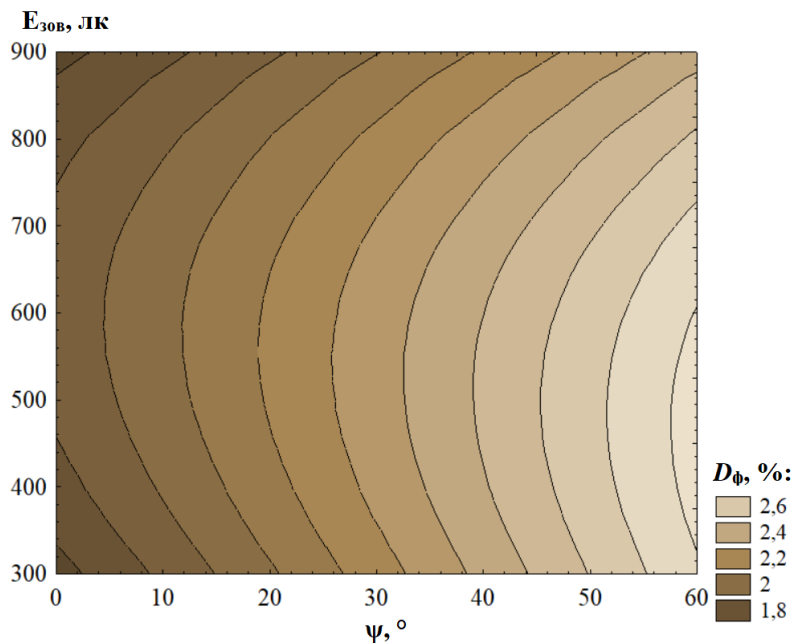


Рисунок 3.45 – Зміна КПО  $D_{\phi}$ , % залежно від кількості падаючого суміщеного освітлення на зовнішню поверхню ТСК в конструкції ТФГСК  $E_{\text{зов}}$ , лк та кута повороту ролета навколо його вертикальної осі в конструкції ТФГСК  $\psi$ , °

За допомогою рисунку 3.45 визначено практичне значення КПО за умов застосування ТФГСК в лабораторіях з підвищеним коефіцієнтом бокового застосування. Рішення щодо встановлення ТФГСК для такого типу приміщення та перебування в лабораторії персоналу дозволяє виконувати роботу III розряду [33].

Наступним етапом експериментального дослідження конструкції ТФГСК було проведення натурних дослідів, що дозволило врахувати вплив факторів, які не були виявлені експериментальним шляхом у лабораторних умовах.

### 3.5 Натурні дослідження конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора

Для підтвердження результатів лабораторних спостережень важливим є виконання натурних досліджень. Натурні дослідження виконано на території

Національного університету «Львівська політехніка». Для експериментальних досліджень було вибрано саме ТФГСК з селективним покриттям, оскільки під час лабораторних експериментальних досліджень ця конструкція володіла кращою ефективністю в цілому. Фото експериментального стенда наведено на рис. 3.46.



а)



б)

Рисунок 3.46 – Фото експериментального стенда ССЕР з ТФГСК під час натурних досліджень: а) – вид конструкції ТФГСК у випадку, коли кут між сприймальною поверхнею й проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині конструкції ТФГСК  $\zeta=0^\circ$ ; б) – вид конструкції ТФГСК у випадку, коли кут між сприймальною поверхнею й проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині конструкції ТФГСК  $\zeta=90^\circ$

Для вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання було застосовано безпосередній метод вимірювання спеціальними приладами, адже статистичний та фізичні методи дають лише наближені значення. Окрім цього, під час проведення натурних випробувань конструкції ТФГСК визначити деякі

технічні параметри оперативним способом є складно. Схемне рішення ССЕР із ТФГСК для натурних досліджень наведено на рисунку 3.47.

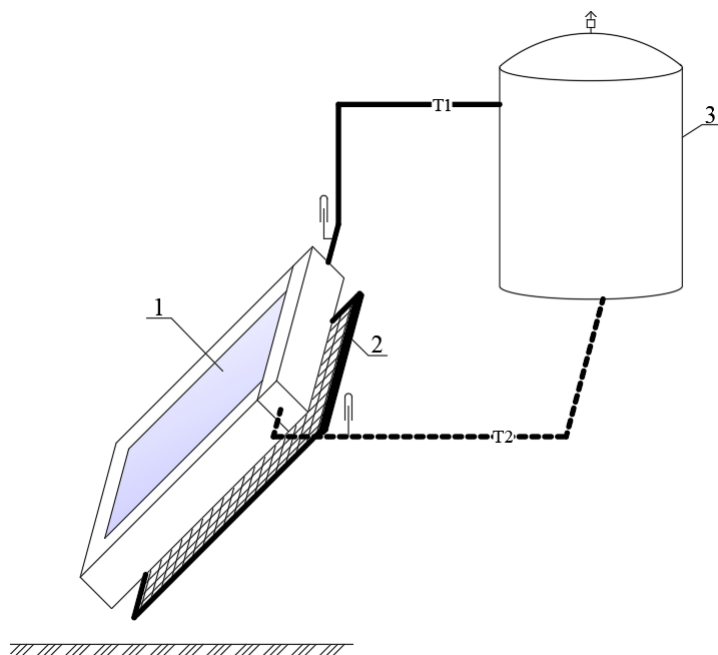


Рисунок 3.47 – Принципова схема конструкції ТФГСК для експериментальних досліджень в натурних умовах: 1 – ТСК; 2 – ролетний ФСК; 3 – БА

Схема електричного з'єднання ролетної панелі, що використана в ТФГСК під час натурних досліджень (рис. 3.48).

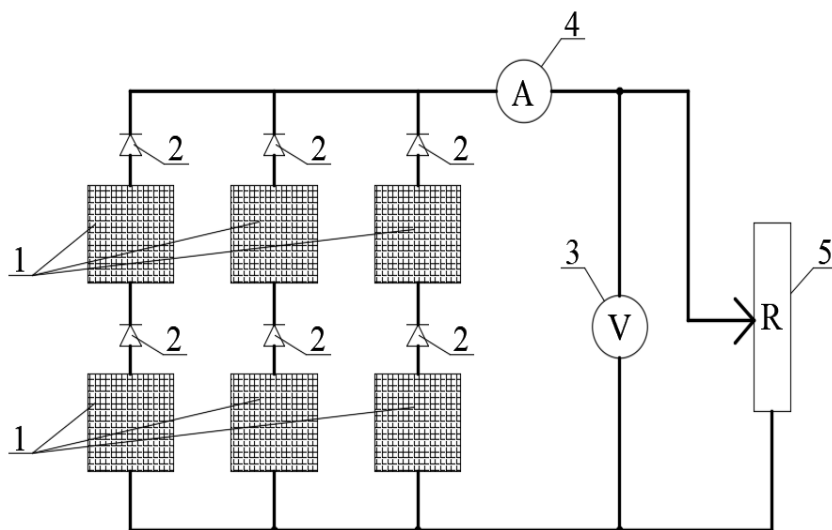


Рисунок 3.48 – Схема електричного з'єднання ролетного ФСК: 1 – фотоелектричний модуль; 2 – діод Шотткі; 3 та 4 – заміри мультиметра; 5 – банк опорів

Усереднене значення інтенсивності сонячного випромінювання за період натурних спостережень під час орієнтації експериментального стенда з конструкцією ТФГСК в ССЕР на південну сторону відносно горизонту наведено на рисунку 3.49.

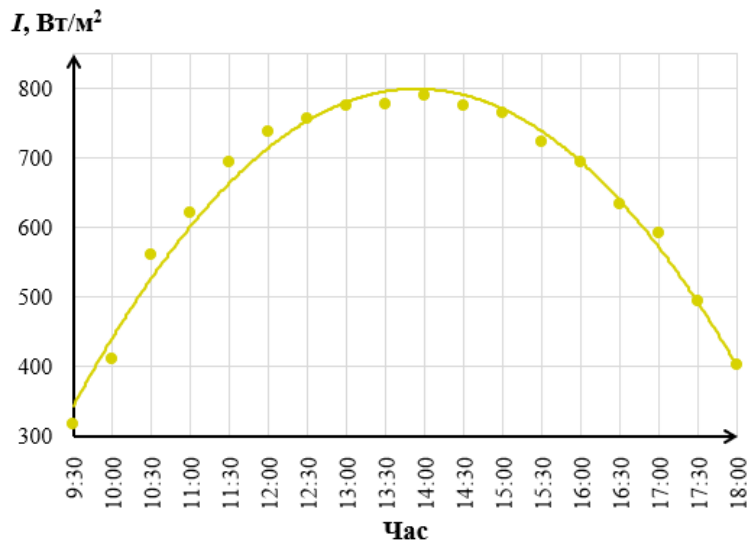


Рисунок 3.49 – Усереднені значення надходження сонячного випромінювання  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>, під час натурних досліджень за орієнтації експериментального стенда на південь відносно горизонту

Під час аналізу рівня генерування приведеної теплової енергії від конструкції ТФГСК, відмічено те, що зміна кількості приведеної теплової енергії  $q$ , кДж/м<sup>2</sup> відбувається із зростанням упродовж експерименту в першій половині дня. Така тенденція пов'язана, насамперед, з параболічним (або синусоїдальним) характером інтенсивності сонячного випромінювання [180, 181].

Результати експериментальних досліджень теплової ефективності ССЕР, в основі якої є конструкція ТФГСК в наведені в таблиці 3.11 «Матриця М9».

Таблиця 3.11 – Матриця М9

№п/п	$L$ , м	$\zeta$ , °	$\eta_{\text{ССЕР}}^{\text{TE}}$ (в цілому)	$\eta_{\text{ССЕР}}$ (в цілому)
1	0,0	0	0,29	0,30
2	0,0	45	0,42	0,44
3	0,0	90	0,33	0,34
4	0,2	0	0,25	0,27
5	0,2	45	0,32	0,34
6	0,2	90	0,30	0,32
7	0,4	0	0,20	0,20
8	0,4	45	0,20	0,21
9	0,4	90	0,19	0,19

Важливу роль при підрахунках відіграє зміна температури теплоносія на вході та виході конструкції ТФГСК (рис. 3.50). Зокрема, приріст температури

був в межах до  $10^{\circ}\text{C}$ , що підтвердило достатню ефективність такої установки для низькотемпературного теплопостачання.

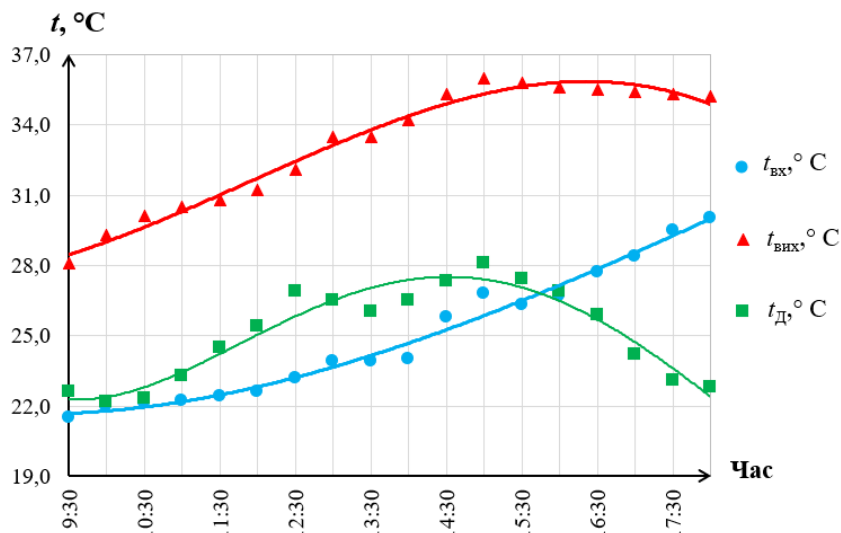


Рисунок 3.50 – Зміна ТТ на вході  $t_{\text{вх}}, ^{\circ}\text{C}$  та виході  $t_{\text{вих}}, ^{\circ}\text{C}$  конструкції ТФГСК та ТД  $t_{\text{д}}, ^{\circ}\text{C}$  за сталих умов:  $L=0,2$  м та  $\zeta=0^{\circ}$

Під час проведення експериментів кожного разу було зафіксовано температуру довкілля  $t_{\text{д}}, ^{\circ}\text{C}$ , температуру на поверхнях ТСК  $t_{4/16/4}, ^{\circ}\text{C}$  та ФСК в конструкції ТФГСК  $t_{\text{ФСК}}, ^{\circ}\text{C}$ , та швидкість вітру  $v, \text{м/с}$ . Реєстрація цих параметрів наведена на рисунку 3.51 для  $L=0,2$  м та  $\zeta=0^{\circ}$ .

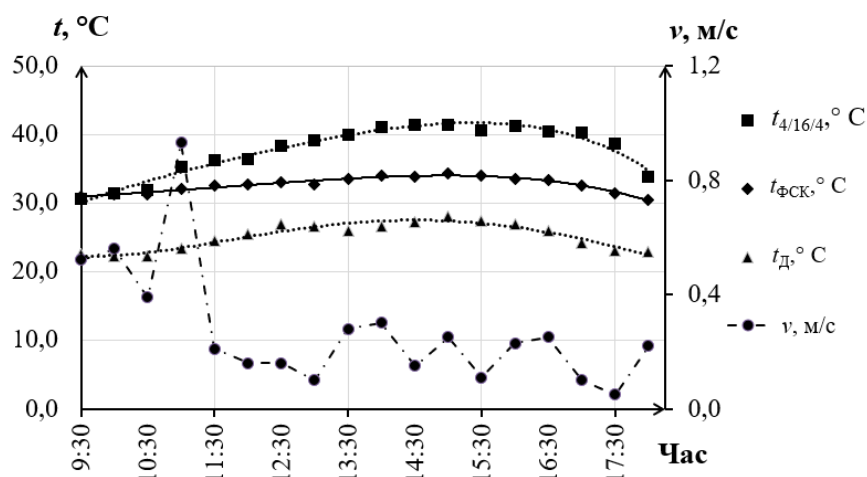


Рисунок 3.51 – Зміна ТД  $t_{\text{д}}, ^{\circ}\text{C}$ , температури на поверхнях ТСК  $t_{4/16/4}, ^{\circ}\text{C}$  та ФСК  $t_{\text{ФСК}}, ^{\circ}\text{C}$  в конструкції ТФГСК, та швидкості вітру  $v, \text{м/с}$  за сталих умов:  $L=0,2$  м та  $\zeta=0^{\circ}$

Для відображення генерування теплової ефективності ССЕР із конструкцією ТФГСК в цілому було побудовано тривимірний графік наведений на рисунку 3.52.

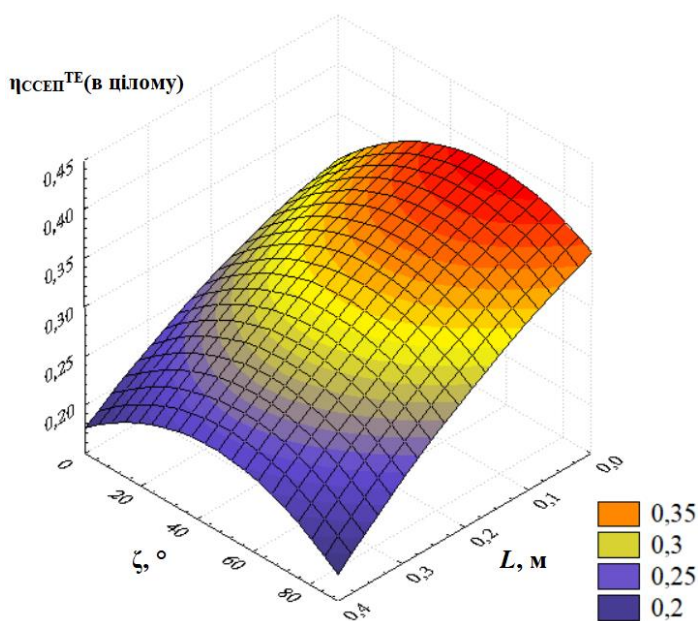


Рисунок 3.52 – ТЕ ССЕП, в основі якої є конструкція ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}}$  (в цілому) в залежності від відстані на якій розташовується ФСК від площини тильної сторони ТСК в конструкції ТФГСК,  $L$ , м та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку в горизонтальній площині,  $\zeta$ , °

На основі експериментальних даних відображених на рисунку 3.52 отримано рівняння регресії (3.11) для визначення обсягу ТЕ, що зможе отримати споживач під час використання конструкції ТФГСК з селективним покриттям в ССЕП:

$$\eta_{\text{ССЕП}}^{\text{ТЕ}} (\text{в цілому}) = 0,303 - 0,1464 \cdot L + 0,003 \cdot \zeta - 0,4275 \cdot L^2 - 0,0014 \cdot L \cdot \zeta - 2,7342 \cdot 10^{-5} \cdot \zeta^2. \quad (3.11)$$

Крім цього, було проведено окремі дослідження коефіцієнта ефективності в частині ТЕ за сталих умов  $L = 0,2$  м та  $\zeta = 0^\circ$  для різних орієнтацій відносно горизонту, що відображено на рисунку 3.53.

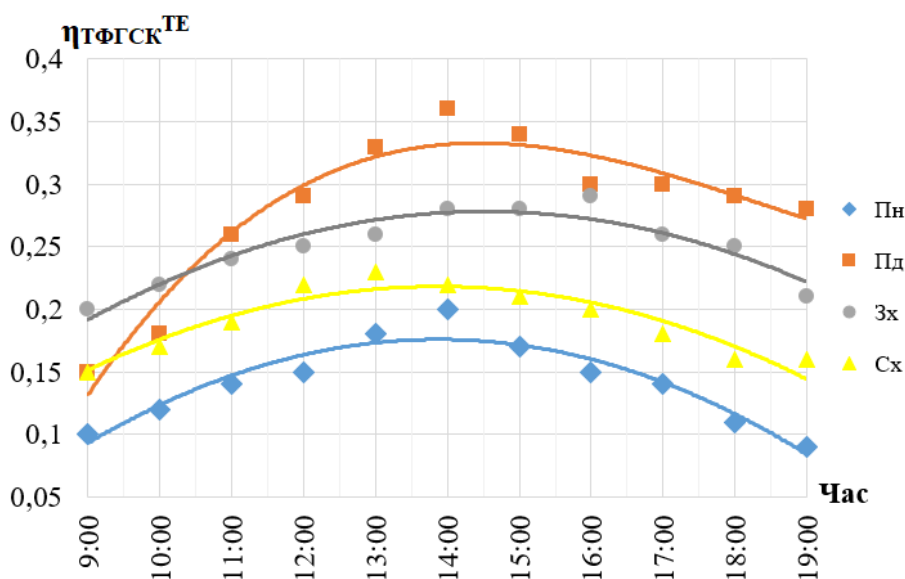


Рисунок 3.53 – Зміна теплової ефективності конструкції ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  за натурних умов залежно від різних орієнтацій відносно сторін світу

Також, в результаті експериментальних досліджень побудовано графічну залежність напруги холостого ходу  $U_{XX}$ , В та інтенсивності сонячного випромінювання  $I$ , Вт/м<sup>2</sup> впродовж часу проведення цих досліджень (рис. 3.54). Показано, що залежність даних параметрів є незначною.

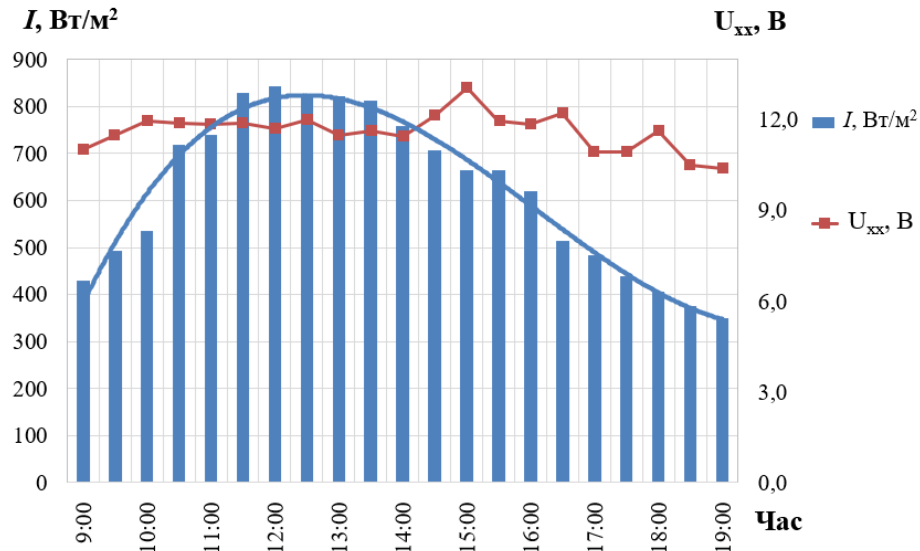


Рисунок 3.54 – Зміна інтенсивності СВ  $I$ , Вт/м<sup>2</sup> та напруги ХХ  $U_{XX}$ , В в залежності від часу проведення експерименту за сталих умов:  $L = 0$  м та  $\zeta = 0^\circ$

Отримано залежність електричної ефективності конструкції ТФГСК в залежності від відстані розташування ФСК від ТСК в конструкції ТФГСК та кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині ТФГСК (рис. 3.55).

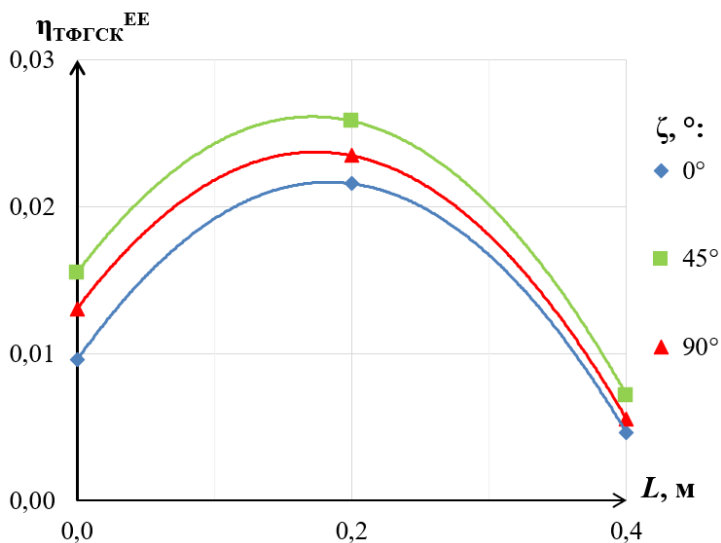


Рисунок 3.55 – Електрична ефективність конструкції ТФГСК  $\eta_{ТФГСК}^{EE}$  за натурних умов залежно від  $L$ , м та  $\zeta$ , °

Досліджено, що максимальна електрична ефективність досягається за  $L = 0,2$  м та за  $\zeta = 45^\circ$ , і становить 2,6 %.

На основі натурних досліджень було отримано типовий графік залежності теплової ефективності ТФГСК від комплексу  $K$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$ , що дозволило встановити коефіцієнт відведення теплової енергії  $F_R^{\text{CP}} \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  та коефіцієнт теплопередачі теплових втрат  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  за обраних факторів.

Аналізуючи отримані дані (рис. 3.56) визначено, що оптичний коефіцієнт корисної дії  $F_R^{\text{CP}} \cdot (\tau \cdot \alpha)$  становить 0.638, а коефіцієнт теплопередачі теплової енергії  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} - 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  із врахуванням правки  $K'$ . Аналогічні графіки для встановлення коефіцієнта теплопередачі побудовано і за інших факторів. Усереднений коефіцієнт теплопередачі теплової енергії під час натурних досліджень становив  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

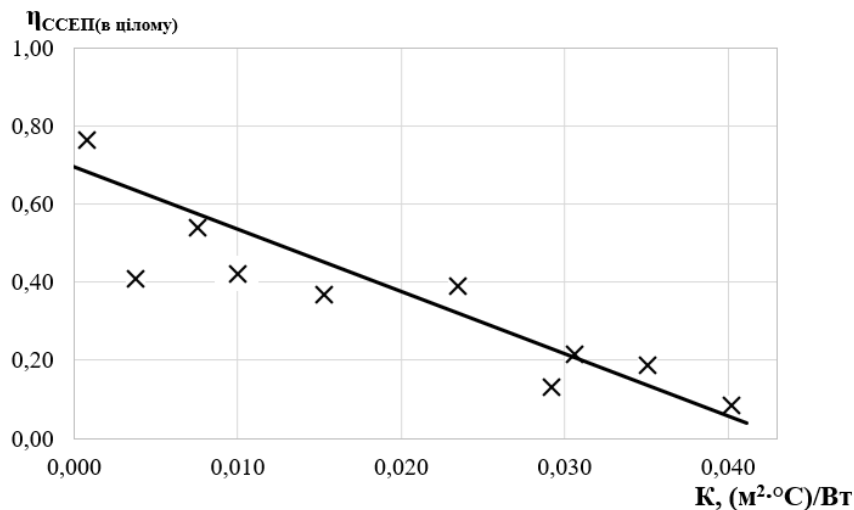


Рисунок 3.56 – Теплова ефективність ССЕР з ТФГСК  $\eta_{\text{ССЕР}}$  (в цілому) залежно від комплексу  $K$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$ , за сталих умов:  $L = 0$  м та  $\zeta = 45^\circ$

Проведення досліджень під час натурних умов підтвердили встановлену ефективність конструкції ТФГСК в ССЕР, а також вплив фактору кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині ТФГСК [180, 181]. Окрім цього, встановлені експериментальні значення надалі впроваджено для написання алгоритму встановлення ефективності ССЕР, що містить конструкцію ТФГСК.



### Висновки до Розділу 3

1. Проаналізовано результати лабораторних досліджень теплоенергетичних параметрів конструкції ТФГСК і отримано математичні рівняння для визначення теплової та електричної ефективності в залежності від: відстані, на якій розташовувався ФЕ від площини тильної сторони теплопоглинача ТСК; інтенсивності імітованого потоку теплової енергії, що випромінює джерело; швидкості вітру; кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК (кут надходження вітрового потоку); кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині ТФГСК. Отримані рівняння дали змогу розрахувати теплову та електричну ефективність ТФГСК в залежності від факторів, що діятимуть на конструкцію в ранковий, вечірній та обідній періоди доби.

2. Досліджено вплив швидкості вітру на зміну теплової ефективності конструкції ТФГСК. Встановлено, що швидкість вітру від 2 м/с до 4,5 м/с включно, зумовлює зменшення ефективності ТФГСК без селективного покриття в частині генерування теплової енергії в середньому на 7 %, у випадку якщо швидкість вітру більше 4,5 м/с – на 6 %. Конструкція ТФГСК з селективним покриттям за дії швидкості вітру від 2 м/с до 4,5 м/с включно знижує свою ефективність в середньому на 3,5 %, за швидкості вітру більше 4,5 м/с – на 6 %, що дає змогу стверджувати про кращу стійкість конструкції ТФГСК з селективним покриттям до малих швидкостей вітру.

3. На основі порівняння графічних та аналітичних залежностей теплової ефективності ТФГСК, за наявності чи відсутності ФСК в конструкції ТФГСК, виявлено, що наявність фотоелементів, підвищує теплову ефективність конструкції без та з селективним покриттям в середньому на 6 %.

4. На основі співвідношення показників теплової та електричної ефективностей конструкції ТФГСК із селективним покриттям та без, залежно від інтенсивності теплового потоку, визначено, що за розташування ФСК від ТСК на відстані 0,2 м, генерування електричної енергії є ефективнішим із незначною

втратою теплової енергії порівняно, ніж на відстані 0 м. Зокрема, електрична ефективність ТФГСК на відстані 0,2 м є  $\approx$  в 1,5 раза більшою, ніж за відстані 0 м та 0,4 м, тоді як електрична ефективність на відстані 0 м більша  $\approx$  1,3 раза, ніж на відстані 0,4 м.

5. На основі математичного опрацювання результатів експериментальних досліджень отримано номограми для визначення теплової або електричної ефективності конструкції ТФГСК з селективним покриттям за впливу різної інтенсивності імітованого потоку теплової енергії, кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК та відстані, на якій розташували ФСК відносно площини тильної сторони теплопоглинача ТСК.

6. Визначено усереднений коефіцієнт повної теплопередачі теплових втрат ТФГСК без селективного покриття, що становить  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , а для колектора з селективним покриттям –  $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , тоді як усереднений коефіцієнт відведення теплової енергії для ТФГСК без селективного покриття менший на 20 %, ніж з селективним покриттям, що дає змогу стверджувати про кращі теплотехнічні характеристики ТФГСК з селективним покриттям в цілому.

7. Встановлено вплив освітленості в приміщенні під час застосування ТФГСК, що містить селективне покриття залежно від проценту затінення площі ТФГСК з тильної сторони площею ФСК та кута повороту вертикального ролета, що визначений між сприймаючою поверхнею ФСК та тильною поверхнею ТСК в конструкції ТФГСК. Отримані значення відповідали встановленому КПО, однак за 96 %-го процента затінення приміщення, КПО є меншим середньо-рекомендованого для даного типу приміщення.

9. Отримано рівняння регресії для визначення обсягу ТЕ на основі натурних досліджень, що зможе отримати споживач під час використання конструкції ТФГСК з селективним покриттям в ССЕП залежно від відстані, на якій розташовано ФЕ від площини тильної сторони теплопоглинача ТСК та кута між сприймаючою поверхнею ТФГСК та проекцією напрямку теплового потоку у його горизонтальній площині.

## **РОЗДІЛ 4**

### **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛОВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА, ЕЛЕМЕНТИ ЯКОГО ІНТЕГРОВАНІ В СВІТЛОПРОЗОРИЙ ФАСАД БУДІВЛІ**

В даному розділі наведено запропоновану вдосконалену методику оцінки ефективності роботи теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора суміщеного із світлопрозорим фасадом будівлі в системі сонячного енергопостачання. Розроблено алгоритм розрахунку параметрів системи сонячного енергопостачання з тепловим та фотоелектричним сонячним колектором, елементи якого інтегровані в світлопрозорий фасад будівлі. Також, в даному розділі наведено розрахунок вартості елементів конструкції ТФГСК, що був прийнятий як цілісний об'єкт для незалежної реалізації на ринку, так і в системі сонячного енергопостачання.

#### **4.1 Методика розрахунку системи сонячного енергопостачання, суміщеної із світлопрозорою конструкцією будівлі**

Методика розрахунку комбінованої системи сонячного енергопостачання суміщеної із скляним фасадом полягає у виборі її конструктивної схеми/елементів та визначенні її кінцевої ефективності для споживача.

Під час проектування світлопрозорих фасадів із звичайним процентом скління необхідно передбачати на світлопрозорих конструкціях використання сонцезахисних пристроїв [33]. Тому, враховуючи необхідність встановлення сонцезахисних пристроїв для світлопрозорих конструкцій в дисертації було запропоновано використати як внутрішні сонцезахисні пристрої – фотоелементи. Крім цього, в розрахунок прийнято варіант скління фасаду на 25 % більше необхідного. Таке рішення обумовлено тим, що природне бокове освітлення в громадському будинку є, як правило, нерівномірним, а тому не забезпечує достатню кількість освітлення для робочих місць.

На стадії ескізного проектування наближене значення необхідної площі світлопрорізів за бокового освітлення приміщень розраховано за формулою (4.1):

$$S_B = \frac{D_n}{100m} \cdot \frac{K_3 \eta_B K_{\text{буд}}}{\tau_0 r_1} \cdot S_{\text{п}}, \quad (4.1)$$

де  $S_B$  – площа світлових прорізів (у світлі) за бокового освітлення,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{п}}$  – площа підлоги приміщення,  $\text{м}^2$ , прийнято  $200 \text{ м}^2$ ;  $D_n$  – нормоване значення КПО, прийнято 2;  $m$  – коефіцієнт світлового клімату світлопрорізу, прийнято І-шу світлокліматичну зону і орієнтування на Південь, що дорівнював 1.05;  $K_3$  – коефіцієнт запасу, який прийнято рівним 1;  $\eta_B$  – коефіцієнт, що враховує світлову активність вікон і ліхтарів, прийнято 17;  $K_{\text{буд}}$  – коефіцієнт, що враховує затінювання вікон протилежними будинками, прийнято 1.2;  $r_1$  – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО завдяки світлу, відбитого від внутрішніх поверхонь приміщення, прийнято 1.25;  $\tau_0$  – загальний коефіцієнт світлопропускання, який було визначено за формулою (4.2):

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5 = 0.75 \cdot 0.75 \cdot 1 \cdot 0.35 \cdot 1 = 0.197, \quad (4.2)$$

де  $\tau_1$  – коефіцієнт світлопропускання матеріалу, прийнято 0.75;  $\tau_2$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла в рамах світлопрорізу, прийнято 0.75;  $\tau_3$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла в несучих конструкціях, прийнято 1;  $\tau_4$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла в сонцезахисних пристроях, прийнято 0.35;  $\tau_5$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у захисній сітці, яка встановлюється під ліхтарями, прийнято 1.

Отримана площа збільшена на 1.25, тому в результаті подальших розрахунків прийнято площу світлопрозорого фасаду будівлі рівною  $300 \text{ м}^2$ .

Наступним етапом розрахунку був вибір схеми роботи ССЕР із сонцезахисними пристроями, що інтегровані у світлопрозорі фасади будівель та режиму роботи ССТ в ній. Схема роботи ССЕР можлива з дублером генерування теплової та/або електричної енергії чи без нього. Режим роботи ССТ можливий із примусовою або природною циркуляцією теплоносія [47]. Узагальнюючи відомості, підтверджується те, що вибір схеми та режиму роботи ССЕР залежить

від багатьох факторів, зокрема: від місця розташування сонцепоглиналих пристроїв, від конструктивних особливостей ССТ, техніко-економічного обґрунтування, необхідності в дублері теплової/електричної енергії і т.д.

Обсяг приведеної продуктивності за годину в ССЕР через ТФГСК без дублера із примусовою циркуляцією теплоносія, яка працює в режимі нагрівання до сталої температури в кг/(м<sup>2</sup>·год), визначено за формулою (4.3) [6, 32, 47]:

$$g_i^{\text{ТФГСК}} = \frac{0.86 \cdot U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}}{\ln \frac{t_{\text{макс}_i}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}}}{t_{\text{макс}_i}^{\text{ТФГСК}} - t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}}}, \quad (4.3)$$

де  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  – коефіцієнт теплопередачі теплових втрат ТФГСК, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t_{\text{вх}}^{\text{ТФГСК}}$ ,  $t_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}$  – ТТ на вході та виході з ТФГСК, °С, відповідно;  $t_{\text{макс}_i}^{\text{ТФГСК}}$  – рівноважна температура кожної години, яку визначено за формулою (4.4):

$$t_{\text{макс}_i}^{\text{ТФГСК}} = \frac{I_{\text{впогл}_i}}{U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}} + t_{\text{д}_i}, \quad (4.4)$$

де  $I_{\text{впогл}_i}$  – інтенсивність поглинутого СВ, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{\text{д}_i}$  – температура доквілля в  $i$ -ту годину, °С.

Площу СПП ТФГСК без дублера з природною циркуляцією теплоносія визначено за формулою (4.5):

$$F_{\text{ТФГСК}} = \frac{G_{\text{доб}}^{\text{ТФГСК}}}{\sum g_i^{\text{ТФГСК}}}, \quad (4.5)$$

де  $G_{\text{доб}}^{\text{ССЕР}}$  – витрата теплоносія в ССЕР через ТФГСК за добу, кг/добу [34];  $\sum g_i^{\text{ТФГСК}}$  – сумарна приведена продуктивність теплоносія в ССЕР з ТФГСК за  $i$ -годин роботи протягом доби, кг/(м<sup>2</sup>·доба).

Варто звернути увагу, що у випадку якщо в системах без дублера середньодобові витрати теплоносія неоднакові в різні місяці року, то розрахунок площі ТФГСК необхідно виконувати окремо для кожного місяця і прийняти найбільшу розрахункову площу. Відповідно, до цього було враховано те, що ССЕР з ТФГСК працює без дублера в літні місяці року, а саме розрахунок проводиться за найбільшої сонячної активності в серпні місяці.

Якщо ж, режим роботи ССЕП обраний із природною циркуляцією теплоносія, то приведена продуктивність за годину в ССЕП через ТФГСК без дублера теплової енергії  $g_i^{\text{ТФГСК}}$ , кг/(м<sup>2</sup>·год), яка працює в режимі нагрівання за сталої температури визначається за формулою (4.6):

$$g_i^{\text{ТФГСК}} = V^{\text{БА}} \cdot \rho_{t_i}, \quad (4.6)$$

де  $V^{\text{БА}}$  – питомий об'єм бака-акумулятора з розрахунку на 1 м<sup>2</sup> ТФГСК, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> (згідно початкових експериментальних даних та наближеного розрахунку ССЕП, було прийнято 0,3 м<sup>3</sup>. Для практичних реалізацій питомий об'єм необхідно збільшувати відповідно до ітераційного методу.);  $\rho$  – густина теплоносія за  $t_i$ , кг/м<sup>3</sup>.

Об'єм бака-акумулятора розраховували ітераційним методом. За цим методом потрібне значення було визначено використовуючи результати обчислень за попередньо прийнятими величинами  $V$ , згідно вибору найбільш прийняттого із них. Кожне з прийнятих значень  $V$  було перевірено розрахунком кінцевої температури води в акумуляторі, досягнутої протягом дня, або іншого заданого періоду роботи (наприклад, три – чотири години, у разі якщо нагріту воду використовувати з БА кілька разів на день). Для цього було розраховано щогодинну температуру теплоносія  $t$ , яку досягнуто в акумуляторі, за формулою (4.7):

$$t_{1_i}^{\text{БА}} = t_{1_{i-1}}^{\text{БА}} + (t_{\text{макс}_i}^{\text{БА}} - t_{1_{i-1}}^{\text{БА}}) \cdot \left( 1 - \exp\left( -\frac{U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}}{g_i^{\text{ТФГСК}} \cdot c_p} \right) \right), \quad (4.7)$$

де  $t_{1_i}^{\text{БА}}$ ,  $t_{1_{i-1}}^{\text{БА}}$  – температура теплоносія в розрахункову  $i$  попередню годину відповідно. У першу годину розрахунку температуру теплоносія  $t_{1_{i-1}}^{\text{БА}}$  прийнято такою, що дорівнювала температурі холодного теплоносія (у разі його подачі з магістралі) або температурі довкілля (у разі заповнення БА із зовнішнього джерела) [47];  $c_p$  – питома теплоємність теплоносія за сталою тиску, Дж/(кг·°С).

Якщо після закінчення періоду роботи температура теплоносія в ТФГСК  $t$ , була менше заданої, то значення  $V$  зменшується, і навпаки.

Оскільки, розрахунок прийнято для СО, то теплове навантаження  $Q_{CO}$ , Вт можна визначити за формулою (4.8):

$$Q_{CO} = \sum U_{пов}^{СФБ} \cdot F_{СФБ} \cdot \Delta t \cdot \tau - Q_{в.т.}, \quad (4.8)$$

де  $U_{пов}^{СФБ}$  – розрахунковий коефіцієнт теплопередачі тепловтрат СФБ, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_i$  – площа поверхні елемента СФБ, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – розрахункова різниця температур між внутрішнім середовищем та зовнішнім, °С;  $\tau$  – тривалість опалювального періоду, діб;  $Q_{в.т.}$  – внутрішні теплонадходження від людей, обладнання, освітлення, Вт.

Теплове навантаження на систему гарячого водопостачання (СГВП) можна визначити за формулою (4.9) [73]:

$$Q_{СГВП} = 1,2 \cdot \zeta \cdot c_p \cdot \rho \cdot (t_r - t_x) \cdot N \cdot n, \quad (4.9)$$

де  $N$  – кількість мешканців;  $\zeta$  – нормовані витрати теплоносія на СГВП, л/добу;  $c_p$  – питома теплоємність теплоносія за сталого тиску, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  $t_r$  і  $t_x$  – температури гарячого та холодного теплоносія відповідно, °С;  $n$  – кількість днів в розрахунковому періоді, діб.

Далі розрахунок було виконано із визначенням ТЕ конструкції ТФГСК в залежності від обраних його конструктивних особливостей. Зокрема, ТЕ ТФГСК  $\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(\theta^\circ)}$  без селективного покриття та без ФСК в його конструкції було визначено за отриманими в роботі залежностями (4.10 а-в):

$$\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(30^\circ)} = \frac{-0,024 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000}{300^2}, \quad (4.10 \text{ а})$$

$$\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(60^\circ)} = \frac{-0,02 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000}{300^2}, \quad (4.10 \text{ б})$$

$$\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(90^\circ)} = \frac{-0,017 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 2000}{300^2}. \quad (4.10 \text{ в})$$

Також, для розрахунку ТЕ ТФГСК  $\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(L, M)}$  без селективного покриття та із ФСК в його конструкції було прийнято формули (4.11 а-в):

$$\eta_{ТФГСК}^{ТЕ(0)} = \frac{-0,022 \cdot I_B^2 + 35 \cdot I_B + 9000}{300^2}, \quad (4.11 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(0,2)} = \frac{-0,021 \cdot I_{\text{В}}^2 + 35 \cdot I_{\text{В}} + 6000}{300^2}, \quad (4.11 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(0,4)} = \frac{-0,020 \cdot I_{\text{В}}^2 + 35 \cdot I_{\text{В}} + 3000}{300^2}. \quad (4.11 \text{ в})$$

Для розрахунку електричної ефективності ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{EE}(L, m)}$  без селективного покриття та в залежності від відстані на якій було розміщено ФСК від ТСК в конструкції ТФГСК прийнято формули (4.12 а-в):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{EE}(0)} = \frac{-0,0135 \cdot I_{\text{В}}^2 + 16,8 \cdot I_{\text{В}} - 2050}{300^2}, \quad (4.12 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{EE}(0,2)} = \frac{-0,0211 \cdot I_{\text{В}}^2 + 27,2 \cdot I_{\text{В}} - 3840}{300^2}, \quad (4.12 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{EE}(0,4)} = \frac{-0,0194 \cdot I_{\text{В}}^2 + 24,1 \cdot I_{\text{В}} - 4940}{300^2}. \quad (4.12 \text{ в})$$

Розрахунок ТЕ ТФГСК  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(\theta^\circ)}$  із селективним покриттям та без ФСК в його конструкції для різних кутів надходження сонячного випромінювання на поверхню ТФГСК в залежності від інтенсивності надходження потоку теплової енергії можна визначити за отриманими в роботі залежностями (4.13 а-в):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(30^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{В}}^2 + 50 \cdot I_{\text{В}} + 1000}{300^2}, \quad (4.13 \text{ а})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(60^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{В}}^2 + 50 \cdot I_{\text{В}} + 3000}{300^2}, \quad (4.13 \text{ б})$$

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{TE}(90^\circ)} = \frac{-0,03 \cdot I_{\text{В}}^2 + 50 \cdot I_{\text{В}} + 5000}{300^2}. \quad (4.13 \text{ в})$$

Для визначення теплової та електричної ефективності ТФГСК з селективним покриттям та наявністю ФСК в його конструкції було використано розроблені номограми наведені на рисунках 3.41 та 3.43 в залежності від  $L, m; I_{\text{В}}, \text{Вт}/\text{м}^2; \theta, ^\circ; G, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Окрім цього, за іншим варіантом розрахунку узагальненої електричної ефективності ТФГСК в ССЕП можна використовувати формулу (4.14):



$$\eta_{\text{ТФГСК}_i}^{\text{ЕЕ}} = \frac{P_{\text{макс}_i}}{F_{\text{ФСК}_i} \cdot I_{\text{В}_i}}. \quad (4.14)$$

Узагальнену теплову ефективність ТФГСК можна знайти за формулою відбору теплоти від колектора (4.15):

$$\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}} = F_R^{\text{CP}} \left[ (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} \cdot (\bar{t}_{\text{ТФГСК}} - t_{\text{Д}})}{I_{\text{В}}} \right], \quad (4.15)$$

де  $F_R^{\text{CP}}$  – коефіцієнт відведення теплової енергії (за Європейською практикою) [128];  $(\tau \cdot \alpha)$  – приведена ефективна поглинаюча здатність ТФГСК;  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}}$  – повний коефіцієнт теплопередачі тепловтра ТФГСК, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\bar{t}$  – усереднена температура теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, °C;  $t_{\text{Д}}$  – ТД, °C;  $I_{\text{В}}$  – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>.

Для визначення обсягу ТЕ, що зможе отримати споживач під час використання конструкції ТФГСК з селективним покриттям в ССЕП можна використати формулу (4.16):

$$\eta_{\text{ССЕП (в цілому)}}^{\text{ТЕ}} = 0,303 - 0,1464 \cdot L + 0,003 \cdot \zeta - 0,4275 \cdot L^2 - 0,0014 \cdot L \cdot \zeta - 2,7342 \cdot 10^{-5} \cdot \zeta^2. \quad (4.16)$$

Гідравлічний розрахунок трубопроводів ССЕП із ТФГСК визначається як сума втрат тиску на ділянках, які утворюють головне циркуляційне кільце [73]. Для наближеного розрахунку втрат тиску в трубопроводах ССЕП із ТФГСК було використано формули (4.17) або (4.18). Варто звернути увагу, що в розрахунку необхідно враховувати циркуляційні трубопроводи конструкції ТФГСК.

Якщо обрано розрахунок для ССЕП з примусовою циркуляцією теплоносія, то втрати тиску в системі  $\Delta P_{\text{ВЦТ}}$ , Па було визначено за формулою (4.17), що враховує втрати тиску по довжині трубопроводів  $\Delta P_{\text{л}}$  та на місцеві опори  $\Delta P_{\text{м}}$ :

$$\Delta P_{\text{ВЦТ}} = \Delta P_{\text{л}} + \Delta P_{\text{м}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \left( \frac{\lambda}{d} \cdot l + \sum \xi \right), \quad (4.17)$$

де  $\rho$  – густина теплоносія,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\nu$  – швидкість теплоносія в трубопроводах,  $\text{м/с}$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя, який можна розрахувати за допомогою формул для кожної із зон течії рідини або за рекомендаціями виробника вибраної марки трубопроводів чи за довідниковою літературою [146];  $l$  – довжина трубок контуру циркуляції теплоносія,  $\text{м}$ ;  $d$  – діаметр трубок контуру циркуляції теплоносія,  $\text{м}$ ;  $\sum \xi$  – сума коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів на ділянці.

В ССЕП із природною циркуляцією теплоносія виникає циркуляція внаслідок того, що густина нагрітого теплоносія в ТФГСК менша, ніж густина теплоносія після БА. Охолодження води в БА, та частково, і в трубах, забезпечує збереження постійної гравітаційної (вагової) циркуляції. Тиск, під дією якого відбувається ця циркуляція, можна визначити за умов, якщо відома температура води в різних точках циркуляційного кільця. Для розрахунків було прийнято зміну температури лише в двох точках: в ТФГСК та в БА. Втрати тиску в системі сонячного енергопостачання із природною циркуляцією теплоносія можна визначити за формулою (4.18):

$$\Delta P_{\text{ПЦТ}} = (\rho_{\text{вих}}^{\text{БА}} - \rho_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}) \cdot g \cdot h, \quad (4.18)$$

де  $\rho_{\text{вих}}^{\text{БА}}$  – густина теплоносія на виході із БА,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{вих}}^{\text{ТФГСК}}$  – густина теплоносія на виході із ТФГСК,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $h$  – відстань по вертикалі від центру нагріву до центру охолодження,  $\text{м}$ .

Наступним етапом методики розрахунку ССЕП суміщеної із СФБ, було встановлення температури, яка досягається в баку для акумулювання теплової енергії обраного об'єму, та встановлених параметрів ТФГСК в ході дослідження (повного коефіцієнта теплопередачі тепловтрат ТФГСК, оптичних параметрів ТФГСК), що було виконано на основі ітераційного методу. Отримано графіки динаміки зміни температури в БА за різний період року (рис. 4.1).

Досліджений параметр температури є багатofакторним, оскільки залежить від обладнання, яке встановлюється в ССЕП (БА, запірно-регулювання арматура, тип трубопроводів тощо). На рисунку 4.1 наведено прогнозовану (гіпотетичну) температуру в БА за застосування ТФГСК в цій системі. Таким чином, температура

теплоносія в конструкції ТФГСК із селективним покриттям була в середньому на 6 % більша, ніж із звичайним склом.

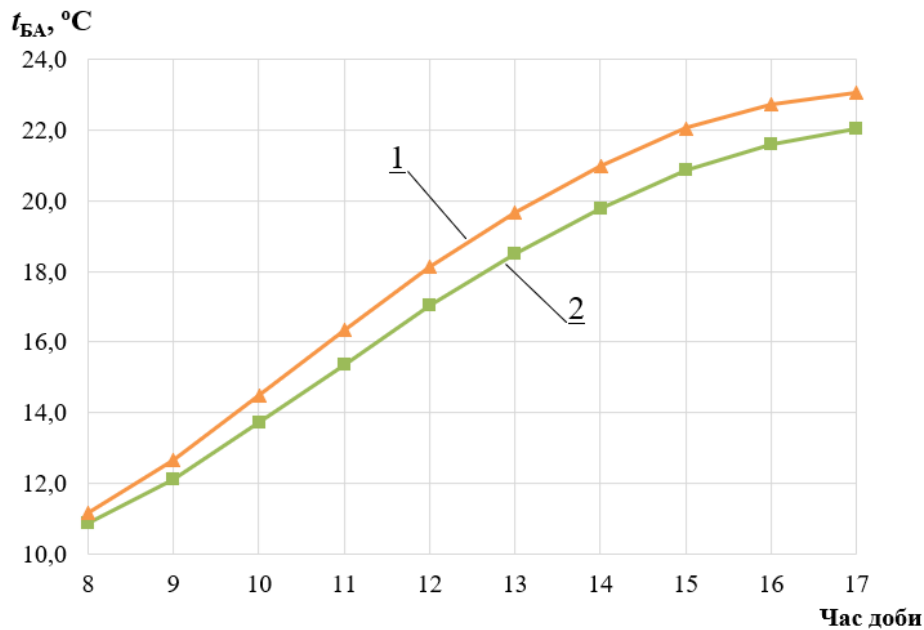


Рисунок 4.1 – Прогнозована температура теплоносія в БА для літнього періоду в місті Львів за ітераційним методом за  $\zeta = 90^\circ$ :

1 – ТФГСК із селективним покриттям;

2 – ТФГСК із склом звичайного типу

Також, здійснено порівняння усередненої температури в баку для акумулювання теплової енергії впродовж дня, зафіксованої під час натурних досліджень, із теоретично розрахованою температурою за ітераційним методом.

Показано, що розрахована температура теплоносія є найнижчою, ніж отримана під час натурних досліджень. Така розбіжність пояснюється тим, що інтенсивність сонячного випромінювання в серпні 2019 року, що надходила на поверхню теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора за розташування ФСК від поверхні ТСК на відстані 0 м та 0,2 м була підвищена в 1,4-1,6 раза (рис. 4.2). На основі цих даних можна стверджувати, що досягнута температура є контрольним параметром для інженера під час розрахунку та проектування ССЕР із ТФГСК. Розрахунок прогнозованої температури

в БА виконано на основі коефіцієнта теплопередачі теплової енергії  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  та кута нахилу ТФГСК до горизонту на  $90^\circ$  (рис. 4.2).

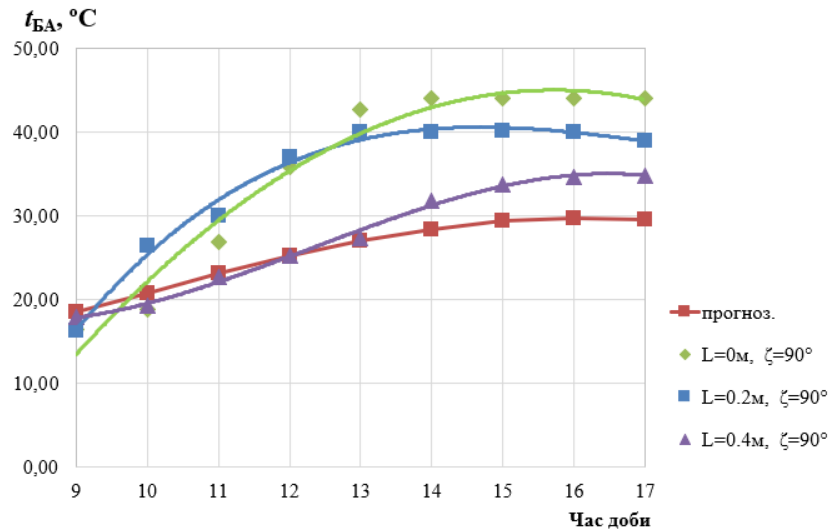


Рисунок 4.2 – Прогнозована ТТ в БА за ітераційним методом та усереднена температура в БА під час натурних експериментальних досліджень за різного розташування ФСК від ТСК для серпня місяця у місті Львові

Проаналізовано приведену продуктивність за годину в ССЕРП через ТФГСК без дублера теплової енергії  $g_i^{\text{ТФГСК}}$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  в режимі примусової циркуляції теплоносія, яка працює в режимі нагрівання до сталої температури (рис. 4.3).

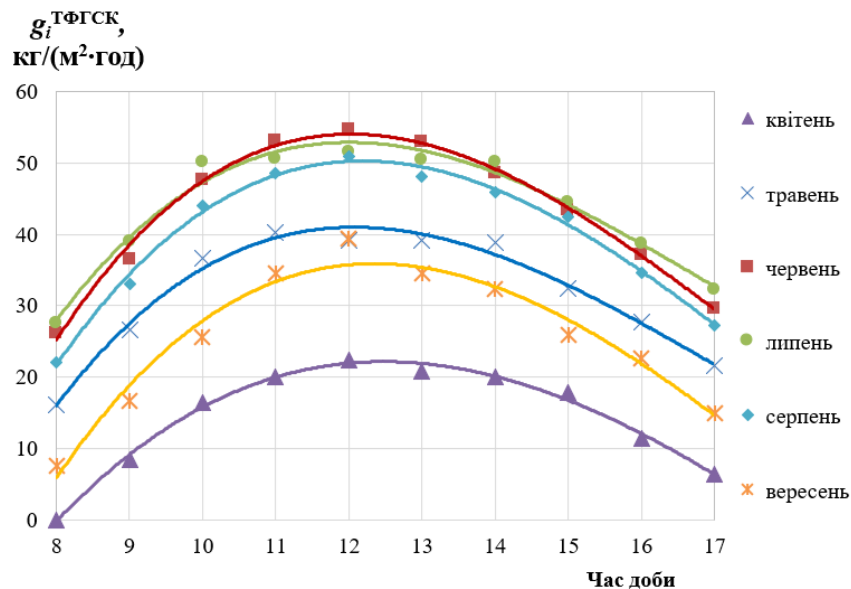


Рисунок 4.3 – Приведена продуктивність ССЕРП через ТФГСК без дублера теплової енергії у місті Львові

Приведена продуктивність ССЕР через ТФГСК розрахована за певних умов (коефіцієнта теплопередачі теплової енергії  $U_{\text{пов}}^{\text{ТФГСК}} - 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  та кута нахилу ТФГСК до горизонту –  $90^\circ$ ), однак моделювання таких результатів можна також здійснювати за інших рівнів цих показників. Також, отримано щогодинні дані рівноважної температури теплоносія для міста Львова за встановлення ТФГСК за  $90^\circ$  до горизонту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Рівноважна ТТ у ТФГСК щогодини для міста Львова за  $\zeta = 90^\circ$

місяць року \ час доби	Рівноважна температура теплоносія кожної години $t_{\text{макс}_i}^{\text{ТФГСК}}$									
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
січень	-	-2,72	-1,02	0,70	1,90	2,22	2,15	1,11	0,09	-0,80
лютий	-2,24	-0,46	1,73	3,80	5,29	6,11	5,52	4,44	2,52	0,78
березень	3,28	6,72	9,51	12,19	14,00	14,98	14,45	12,04	9,59	6,98
квітень	12,23	17,23	21,69	23,76	25,11	24,26	23,76	22,54	18,87	16,11
травень	21,49	27,59	33,41	35,42	34,85	34,87	34,62	30,93	28,24	24,64
червень	27,32	33,31	39,77	42,90	43,80	42,82	40,27	37,24	33,64	29,32
липень	28,10	34,76	41,15	41,48	42,01	41,38	41,20	37,95	34,58	30,87
серпень	24,98	31,29	37,60	40,32	41,64	40,03	38,73	36,69	32,21	27,93
вересень	16,72	21,85	27,00	32,14	34,97	32,18	30,89	27,12	25,26	20,90
жовтень	9,27	12,25	15,11	18,55	20,57	21,00	19,80	17,88	15,31	13,01
листопад	2,74	4,15	5,87	6,83	7,85	8,14	8,08	7,17	6,21	5,26
грудень	-	-1,26	0,26	1,68	2,83	2,69	2,27	1,81	0,88	-

На основі вищенаведених формул та встановлених експериментальних даних, розроблено алгоритм розрахунку параметрів системи сонячного енергопостачання з ТФГСК (рис. 4.4).

Також, для врахування всіх необхідних умов експлуатації ССЕР в алгоритмі додатково враховано моменти, що можуть бути безпосередньою вимогою споживача. Запропонований алгоритм є узагальненим, однак виконання системи запропонованих правил дискретного процесу дозволить інженеру та споживачеві визначити конструктивні особливості ТФГСК, що є основним елементом системи сонячного енергопостачання.

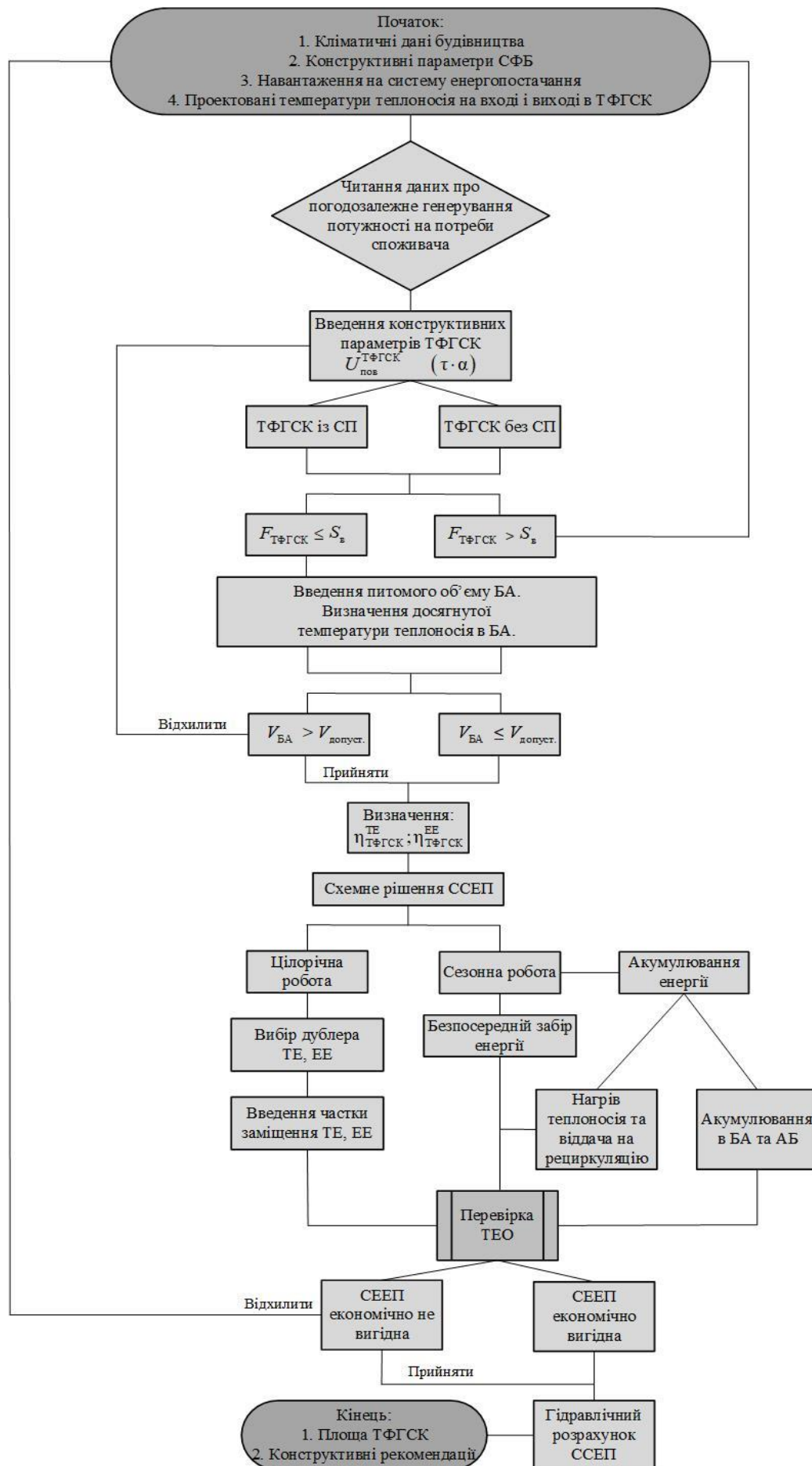


Рисунок 4.4 – Алгоритм розрахунку параметрів ССЕР з ТФГСК

Запропонована ССЕП, що містить ТФГСК із селективним покриттям має практичну значущість, оскільки зменшує навантаження на енергопостачання будівель та споруд. Окрім цього, вдосконалена методика інженерного розрахунку ССЕП комплексно враховує умови експлуатації ТФГСК.

#### **4.2 Обґрунтування концепції застосування геліосистеми, в основі якої є конструкція ТФГСК в енергетичному менеджменті для споживача**

З метою доповнення та широкомасштабного впровадження на практиці конструкції ТФГСК в ССЕП, було обґрунтовано доцільність її використання. Економічний аналіз конструкції ТФГСК проводився з урахуванням того, що колектор площею  $1 \text{ м}^2$  прийнято як монопродукт. Таке рішення дозволило застосувати більшу кількість економічних критеріїв до конструкції, ніж оцінка конструкції на основі методу «перевитрати». Метод «перевитрати» базується на основі порівняння традиційної конструкції із запропонованою конструкцією. Недоліком цього методу є те, що елементи установок можуть бути не завжди об'єктивно оцінені, через можливість використання різних матеріалів, необхідної кількісної площі тощо. Тому, доведення економічної ефективності здійснювалось на основі критеріїв, що додатково враховують фактор часу.

Суть економічної ефективності полягає в здатності демонструвати ефект та результативність процесу, тоді таку ефективність гіпотетично обґрунтовують як відношення отриманого результату до витрат, що забезпечив би цей результат [78].

Економічний розрахунок конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора проведено у порівнянні до рекомендованого співвідношення ціни на органічне паливо та електроенергію. У дослідженні використано наступні показники економічної ефективності: гіпотетична оцінка економії різноманітних енергоресурсів та коштів для їхньої купівлі в якості індексу прибутковості, співвідношення площі ТФГСК до площі забудови цієї ж будівлі, узагальненого коефіцієнта заміщення, інтегральний ефект (чистий прибуток) та термін окупності капіталовкладень.

Для доведення економічної ефективності прийнято:

1. Конструкцію теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора, що містить селективне покриття.
2. Загальний ККД конструкції – 24%, а співвідносний коефіцієнт ККД – 11.
3. Термін експлуатації конструкції ТФГСК в СФБ без капітального ремонту прийнято не менше 15 років.
4. Ставка дисконту 20%. Такий відсоток вибрано через ряд суттєвих причин станом на 2020 рік, а саме: нестабільне економічне становище, пандемію вірусу в 2020-2022 роках, а також нестабільне надходження сонячної енергії в помірному кліматі на конструкцію колектора.
5. Визначено: вартість моноконструкції 1 м<sup>2</sup> ТФГСК – 3500 грн/м<sup>2</sup>, заробітна плата – 19250 грн/м<sup>2</sup>, трудомісткість – 875 грн/м<sup>2</sup>, вартість проектної документації (включаючи кошторисну вартість) – 3200 грн/м<sup>2</sup>.
6. В розрахунках прийнято доларову систему оцінювання станом на 2020 рік за курсом 1 долар (\$) = 27,20 гривень (UAH).
7. Ціну енергоносіїв для населення станом на 2020 рік прийняту в розрахунках наведено в таблиці 4.2.

Відомо, що доведення економії в паливно-енергетичній галузі проводиться на основі порівняння кількості використання енергоресурсів за однакового споживання [106]. Порівняння різних типів енергоресурсів здійснювалось на основі визначення їхньої кількості на забезпечення певного рівня встановленого енергоспоживання. З цією метою було здійснено порівняння кількості згенерованої енергії від різних типів енергоресурсів та кількості генерованої енергії від конструкції ТФГСК.

Під час розрахунку було прийнято площу СФБ – 300 м<sup>2</sup>, а площу плями забудови 200 м<sup>2</sup>. Для прийнятих параметрів цивільної споруди встановлено споживання обсягів гарячого водопостачання  $Q(\text{СГВП})$ , Вт, електроенергії  $Q(\text{СЕВ})$ , Вт та навантаження на систему опалення  $Q(\text{СО})$ , Вт в загальній ССЕР, співвідношення яких наведено на круговій діаграмі (рис. 4.5).



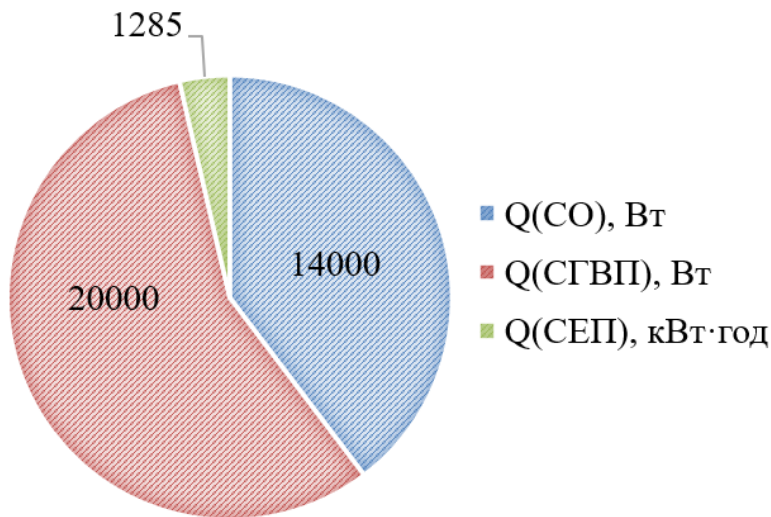


Рисунок 4.5 – Прийняте навантаження на споруду цивільного будинку

Теплопродуктивність теплогенеруючої установки (МВт) з водогрійним котлом визначено за формулою (4.19):

$$Q_{\text{ТГУ}} = A \cdot Q_{\text{CO}} + B \cdot Q_{\text{СГВП}}, \quad (4.19)$$

де коефіцієнти А і В залежать від схеми системи тепlopостачання і типу палива.

Для розрахунків прийнято закриту систему тепlopостачання і твердого палива  $A = 1,0180$  та  $B = 1,0180$ , а для рідкого палива (мазуту)  $A = 1,0526$  та  $B = 1,0526$ , відповідно.

Розрахункову витрату палива  $B_p$  (кг/год) водогрійного котла можна визначити за формулою (4.20):

$$B_p = \frac{Q_{\text{ТГУ}}}{Q_{\text{H}}^p \cdot \eta} \cdot 3600. \quad (4.20)$$

На основі даних сформовано таблицю 4.2, де показано кількість органічного палива відповідно до енергоресурсу за заданого споживання в будівлі. Зниження ціни на електроенергію можливе за умов експлуатації не дороговартісного устаткування, цю умову виконує ТФГСК, оскільки вже на початковому етапі це елемент конструкції фасаду, а тому окремого обладнання не потребує. Встановлення додаткового обладнання (БА, ємнісних акумуляторів тощо) є необхідним і під час застосування органічного палива, тому на даному етапі розрахунки виконано у порівнянні з витраченими коштами споживачем на органічне паливо.

Таблиця 4.2 – Оцінка енергоресурсів необхідних за обраного навантаження на споруду

Назва енергоресурсу		Од. вимір.	Тариф, УАН з ПДВ	Тариф, \$ з ПДВ	Необхід. обсяг ресурсу за заданого навантаж. на споруду $V_p$	Ціна ресурсу за необхідного навантаж., \$ з ПДВ
Електроенергія		кВт·год	1,68	0,060	1285,000	77,100
Природний газ	транспортування природного газу	м <sup>3</sup> /год	1,188+ +4,107= =5,295	0,189	3,849	0,728
	вартість природного газу (середнє значення у період з січня по червень)					
Кам'яне вугілля марки Д		кг/год	3	0,107	8,339	0,893
Паливна палета		кг/год	4	0,143	9,754	1,393
Мазут		кг/год	0,254	0,009	4,943	0,045
Дизельне паливо		кг/год	0,0055	0,000	4,511	0,001

Підраховано, що система сонячного енергопостачання за використання ТФГСК є економічно вигідною не тільки в грошовому еквіваленті, але й в плані збереження різних видів енергоресурсів (рис. 4.6). Враховуючи те, що сонячна енергія є безкоштовним ресурсом, то відповідно до заданого навантаження економія становить  $\approx 20,05$  грн/год відносно використання природного газу або 38,31 грн/год відносно паливної палети.

У липні 2020 р. Президентом України підписано Закон № 810-ІХ, який є першим кроком на шляху вирішення проблемних питань енергоринку, зокрема в частині узгодження розрахунків із виробниками «зеленої» електроенергії. Також, НКРЕКП внесла зміни до Правил ринку Постановою від 04.11.2020 р. № 1998 та Постановою від 11.11.2020 р. № 2084. Незважаючи на це, у грудні 2020 р. ліквідність ринку електроенергії продовжувала бути на критично низькому рівні, оскільки даній ситуації сприяють цінові маніпуляції.

Керуючись розробленим алгоритмом розрахунку параметрів ССЕР із ТФГСК (п. 4.1) відзначено, що така система не претендує на повне заміщення генерованої енергії енергозберігаючим будинком. Однак, таке рішення є раціональним для її сезонної роботи або із дублером теплової та/або електричної енергії для її цілорічної експлуатації.

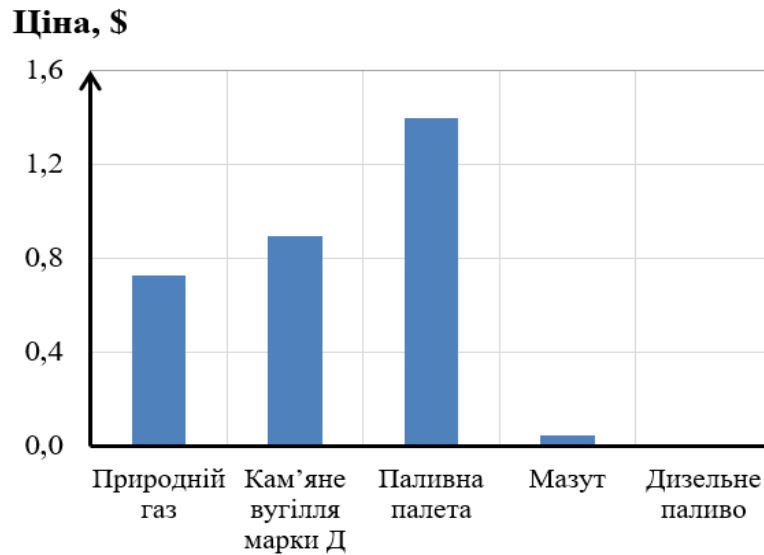


Рисунок 4.6 – Економія коштів та енергоресурсів за використання ТФГСК

Необхідно розуміти, що більшість альтернативних джерел енергії в системах сонячного енергопостачання потребують додаткових традиційних енергоносіїв для генерування енергії відповідно до вимог споживача [84]. Тому, одним із основних показників ССЕР є частка альтернативної енергії у загальній ССЕР із традиційним джерелом енергії. Відомо, що низькотемпературні сонячні колектори із водяним теплоносієм вважаються доцільними, якщо їхня частка заміщення енергії в загальній ССЕР становить від 0,2 до 0,6 (від 20 % до 60 %). Для більш технологічно вдосконалених СК ця частка заміщення може перевищувати значення 0,6 [91, 98].

В даних розрахунках взято до уваги нове будівництво житлового будинку в м. Львові з прямою забудовою площею – 100 м<sup>2</sup>, а площу світлопрозорого фасаду збільшували відповідно до поверховості будівлі. Крім цього, враховано те, що споживання гарячої води однією людиною становить 2,64 ГДж/рік [85]. Графік залежності коефіцієнта заміщення сонячної енергії  $f$  в покритті теплового навантаження для однорідинного сімейного будинку, в якому проживають четверо

людей наведено на рисунку 4.7. Графічну залежність побудовано залежно від співвідношення активної площі ТФГСК  $F_{\text{ТФГСК}}$ , м<sup>2</sup> до площі забудови  $F_{\text{ПЛЯМИ}}$ , м<sup>2</sup> (рис. 4.7).

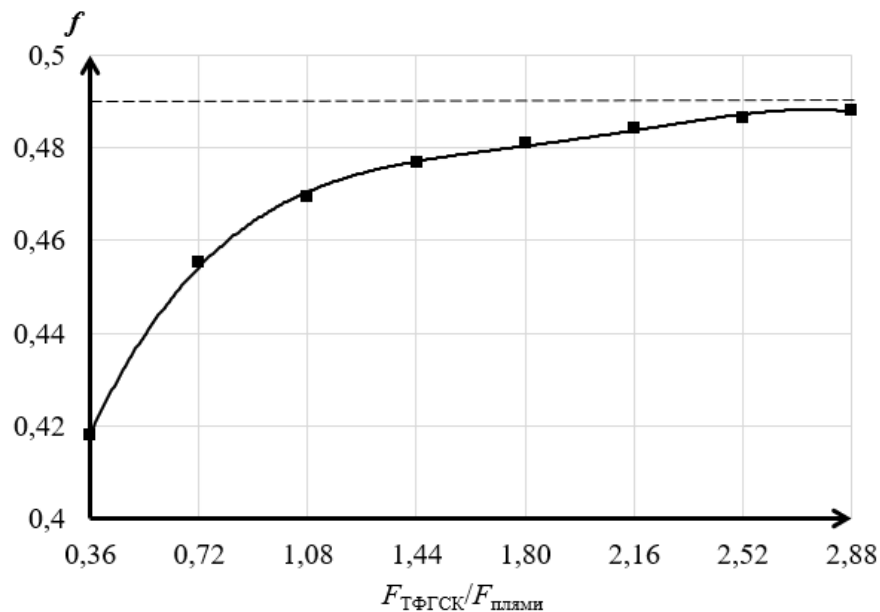


Рисунок 4.7 – Коефіцієнт заміщення сонячної енергії в покритті теплового навантаження для однородинного сімейного будинку залежно від співвідношення активної площі ТФГСК до площі забудови

Зі зростанням співвідношення активної площі ТФГСК до площі забудови спостерігається зростання коефіцієнта заміщення сонячної енергії в покритті теплового навантаження. Найсуттєвіше зростання відбувається за зміни співвідношення  $F_{\text{ТФГСК}}/F_{\text{ПЛЯМИ}}$  від 0,36 до 1,08. Графік коефіцієнта заміщення сонячної енергії має зростаючий характер, але із зростанням значення  $F_{\text{ТФГСК}}/F_{\text{ПЛЯМИ}}$  набуває тенденції плато (рис. 4.7).

Для попереднього наближеного розрахунку ССЕР із ТФГСК обрано графічний метод розрахунку залежності коефіцієнта заміщення сонячної енергії в покритті теплового навантаження від безрозмірного коефіцієнта  $\theta$ , що визначається за формулою (4.21) [111]:

$$\theta = \frac{Q_{\text{в}} \cdot F_{\text{ТФГСК}}}{Q_{\text{СГВП}}}, \quad (4.21)$$

де  $Q_b$  – кількість СВ, що надходить на поверхню ТФГСК, ГДж/(рік·м<sup>2</sup>);  
 $F_{\text{ТФГСК}}$  – СПП ТФГСК, м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{СГВП}}$  – теплове навантаження на СГВП, ГДж/рік.

Для побудови графіка залежності коефіцієнта  $f$  в покритті теплового навантаження від безрозмірного коефіцієнта  $\theta$ , запропонованого літературою [111], додатково було введено вісь для проценту засклення сонцесприймаючої площі ТФГСК  $F_{\text{ТФГСК}}, \%$  та вісь співвідношення сонцесприймаючої площі ТФГСК  $F_{\text{ТФГСК}}, \text{м}^2$  до площі забудови  $F_{\text{плями}}, \text{м}^2$  (рис. 4.8).

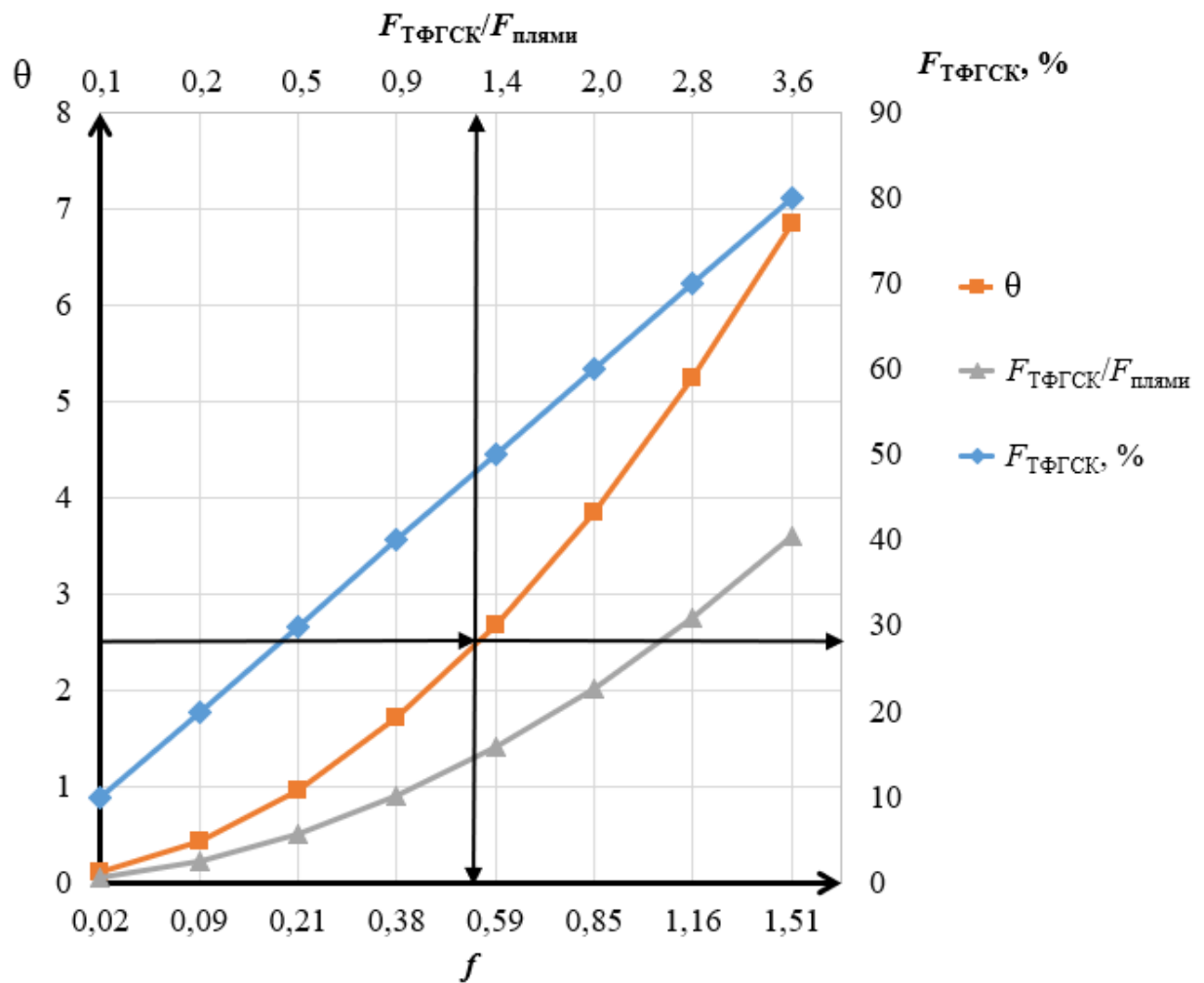


Рисунок 4.8 – Номограма встановлення коефіцієнта заміщення сонячної енергії  $f$  в заміщенні на СГВП в ССЕР із ТФГСК для багатоповерхової громадської будівлі ( $\leq 10$  поверхів)

Номограму (рис. 4.8) було розроблено для громадської багатоповерхової будівлі із кількістю поверхів не більше 10. В розрахунок прийнято умови: пляма

забудови – 800 м<sup>2</sup>; навантаження на СГВП для однієї людини – 3,75 Гд/рік; норма площі на людину – 21 м<sup>2</sup>.

Аналіз даних (рис. 4.8) свідчить про те, що найефективніше застосовувати коефіцієнт заміщення сонячної енергії в покритті на СГВП для мало- та середньоповерхових будівель.

Обчислено термін окупності ССЕР із ТФГСК за допомогою літератури [37]. Розрахунки проводилися враховуючи різні варіанти ССЕР: I – для однородинного сімейного будинку, ССЕР, що працює в режимі ПЦТ; II – для однородинного сімейного будинку, ССЕР, що працює в режимі ВЦТ; III – для багатоповерхового будинку ( $\leq 10$  поверхів) ССЕР, що працює в режимі ПЦТ (рис. 4.9).

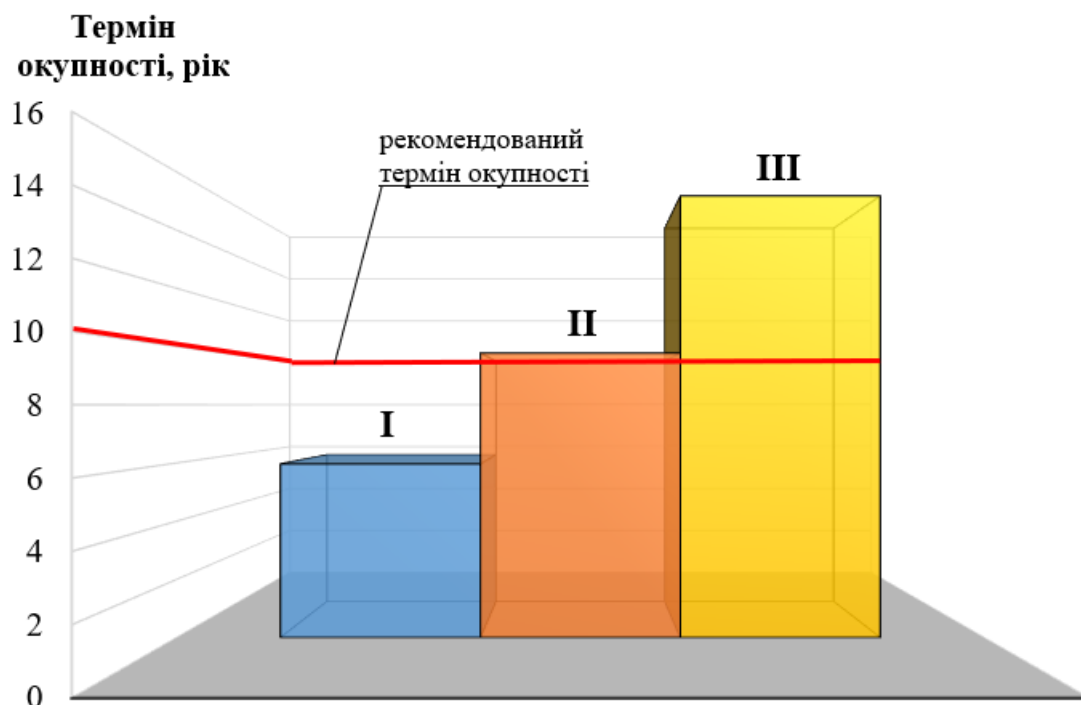


Рисунок 4.9 – Термін окупності конструкції ТФГСК в ССЕР:

I, II – для однородинного сімейного будинку, що працює в режимі ПЦТ та ВЦТ відповідно; III – для багатоповерхового будинку ( $\leq 10$  поверхів), що працює в режимі ПЦТ

Підтверджено, що ССЕР в режимі ВЦТ та ПЦТ для однородинного сімейного будинку мають термін окупності не більше 10 років, що узгоджується з рекомендаціями на ринку серед виробників різних марок СК.

### **4.3 Економічна ефективність конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання**

ССЕП, як правило, характеризуються високими початковими капіталовкладеннями та низькими експлуатаційними витратами. Як наслідок, основною економічною проблемою ССЕП є порівняння початкової відомої інвестиції з передбачуваними майбутніми експлуатаційними витратами [188]. Більшість процесів перетворення і використання сонячної енергії потребує дублера теплової/електричної енергії як допоміжного джерела, щоб система поєднувала нетрадиційне і звичайне обладнання, а річні навантаження були забезпечені взаємодопоміжними комбінаціями джерел. Інвестиція в обладнання для сонячної енергії дозволить в перспективі зменшити рахунок за використане традиційне джерело енергії.

Важливо зазначити, що при розрахунку вартості будь-якого процесу генерування та доставки енергії, необхідно врахувати вартість всіх елементів обладнання, операційні витрати та години роботи працівників, які беруть участь в монтажі обладнання. Економічні фактори, які доведеться врахувати включають відсотки за позичені гроші, податки на майно та прибуток, перепродаж обладнання, обслуговування, страхування, паливо та інші операційні витрати. Для доведення економічної доцільності встановленої конструкції необхідно використати метод визначення найменших витрат для задоволення енергетичних потреб, з урахуванням як альтернативної (сонячної енергії), так і традиційної енергії. Позитивний економічний показник ефективності ССЕП комбінованого із традиційними видами енергії визначають для установок з найнижчим ступенем кореляції сонячної та допоміжної енергії. З літературних даних відомо, що економічно вигіднішими є сонячні системи на територіях з більш високим надходженням сонячної радіації [145].

Для розрахунку економічної ефективності ТФГСК в ССЕП використовують метод економії життєвого циклу. Цей метод враховує часову цінність грошей і дозволяє врахувати повний спектр витрат. Також, метод ґрунтується на розрахунку

витрат із врахуванням економічних показників якості виробу (критерії проектування) та примітками до проектних змінних, які є важливими для визначення економічної ефективності системи [6, 32].

Інвестиції вкладені у придбання та встановлення обладнання для перетворення сонячної енергії є важливим фактором при розрахунку вигоди геліопроектів. По-перше, в цих інвестиціях враховується вартість доставки допоміжного обладнання ССЕС (колектори, БА та АБ, насоси та автоматичні повітровідвідники, регулятори, трубопроводи, ТО тощо). По-друге, варто врахувати витрати на встановлення обладнання, оскільки співвідношення ціни на встановлення та придбання є не однаковим. По-третє, рекомендовано враховувати витрати на металеві конструкції для монтажу СК та на інші види робіт необхідні для встановлення додаткового обладнання. Зазвичай, інвестиції отримані від держави, меценатів, міжнародних програм для встановлення ССЕС в будівлі можуть бути отримані, якщо будуть надані переконливі факти та докази зменшення витрат на традиційне енергопостачання. Наприклад, якщо СК буде частиною огороження будівлі захищеного від атмосферних явищ, усуваючи таким чином необхідність використання звичайного сайдингу або покрівлі, та є передумови для зменшення обсягу використання традиційного органічного палива, тоді існує ймовірність на отримання таких інвестицій.

Встановлені витрати на сонячне обладнання можна відобразити як суму двох показників, один з яких пропорційний площі ТФГСК, а інший від нього незалежний (4.22):

$$C_{\text{обл.ССЕС}} = C_{\text{ТФГСК}} \cdot F_{\text{ТФГСК}} + C_{\text{дод}}, \quad (4.22)$$

де  $C_{\text{обл.ССЕС}}$  – загальна вартість встановленого обладнання для перетворення СВ, \$;  
 $C_{\text{ТФГСК}}$  – приведені загальні витрати, що залежать від площі ТФГСК, \$/м<sup>2</sup>;  
 $F_{\text{ТФГСК}}$  – СПП ТФГСК, м<sup>2</sup>;  $C_{\text{дод}}$  – загальна вартість обладнання, яке не залежить від площі колектора, \$.

На основі даних відповідно до рівняння (4.22) для досліджуваного ТФГСК було побудовано графічну залежність загальної вартості встановленого



обладнання для перетворення СВ  $C_{\text{обл.ССЕП}}$ , \$ від сонцепоглинаючої поверхні конструкції ТФГСК  $F_{\text{ТФГСК}}$ , м<sup>2</sup> (рис. 4.10).

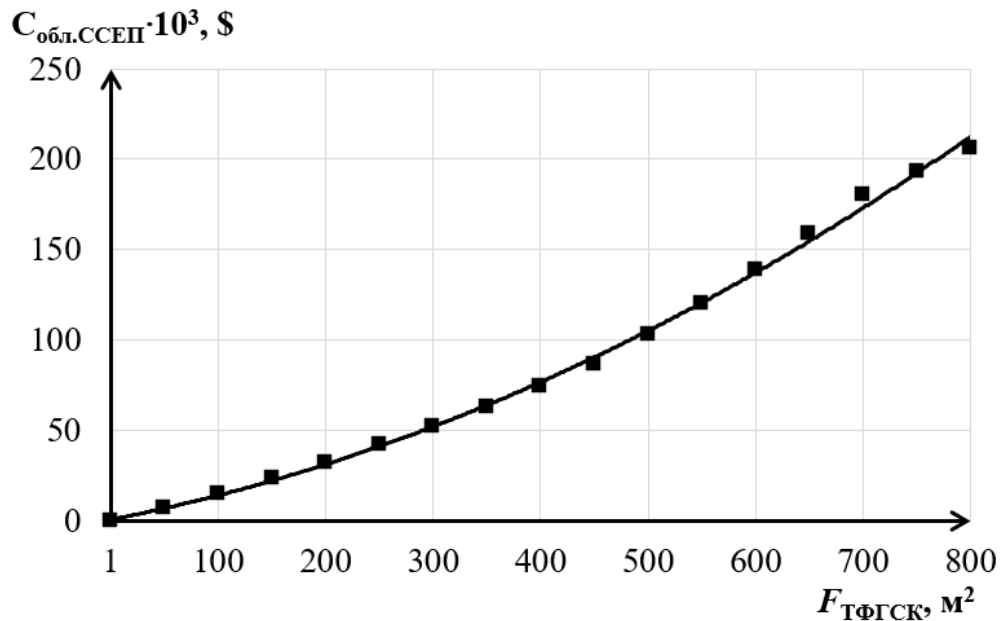


Рисунок 4.10 – Вартість ТФГСК із допоміжним обладнанням залежно від площі світлопрозорого фасаду будівлі

Розрахунок вартості проекту ССЕП із ТФГСК залежить від фази проекту: передінвестиційної, інвестиційної та експлуатаційної.

Отже, для продукції (конструкції) притаманні життєві цикли, які відрізняються різними факторами чи схемними рішеннями. Тому, в розрахунках було прийнято, що сумарна вигода в грошовому еквіваленті від експлуатації запропонованої конструкції спостерігатиметься один раз в кінці періоду, тобто року.

Досліджувану конструкцію ТФГСК оцінено за параметром чистих грошових надходжень (NPV (Net Present Value), тис. грн). Такий параметр дозволяє розрахувати абсолютну величину ефекту від реалізації СФБ (рис. 4.11).

Розраховуючи прямолінійним методом амортизаційні відрахування  $A$ , грн, залежно від вартості конструкції визначено, що вони становлять 700 грн/м<sup>2</sup> за 5 років. Для малого споживача порівняно з компанією укрупнений показник NPV інвестиції є змінним та багатofакторним. Тому, в короткостроковому плані,

інвестування в цей проект буде мати змінний характер і залежатиме від можливостей споживача. Залежність прибутку від інвестицій і затрат доцільно відобразити в тривимірній графічній залежності (рис. 4.11).

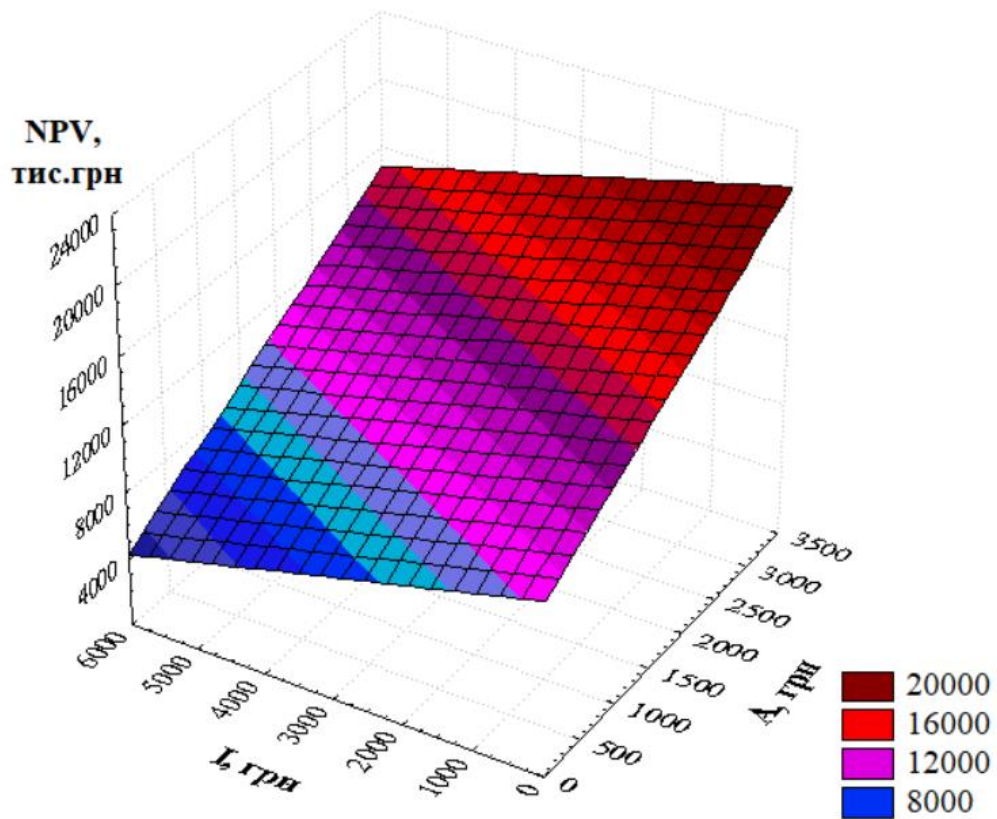


Рисунок 4.11 – Залежність чистих грошових надходжень ТФГСК від варіювання інвестицій та затрат на амортизацію

Згідно даних наведених Державною службою статистики України, середньостатистично протягом 2017-2020 років в експлуатацію прийнято 10 млн м<sup>2</sup> житлової площі, що відповідає 1700 типовим будинкам. Площа зовнішніх огорожень цих будинків, орієнтованих на південь становить в середньому: 1 400 000 м<sup>2</sup> стін, 531 600 м<sup>2</sup> вікон, 709 375 м<sup>2</sup> покриття. Зважаючи на ці дані можна стверджувати, що інвестиції в будівельну галузь є значними, зокрема і в фасади будівель. На рисунку 4.11 наведено показники NPV, яка демонструє позитивну динаміку руху коштів, що підтверджує економічну ефективність конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора в системі сонячного енергопостачання.

## Висновки до Розділу 4

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень систем енергопостачання запропоновано покращену методику та алгоритм розрахунку ССЕП із конструкцією ТФГСК.

2. За допомогою ітераційного методу розроблено теоретичний розрахунок прогнозованої температури в баку для акумулювання теплової енергії в різний період року. За умов відомого об'єму баку для акумулювання теплової енергії та встановлених в ході теоретичних, експериментальних досліджень параметрів коефіцієнтів відведення теплової енергії та теплопередачі теплових втрат конструкції ТФГСК, було, визначено його теплопродуктивність в режимі ВЦТ, ПЦТ, залежно від площі ТФГСК. Досліджено, що температура теплоносія для конструкції ТФГСК із селективним покриттям в середньому на 6 % більша, ніж із звичайним склом.

3. Отримано результати приведеної продуктивності ССЕП через ТФГСК без дублера теплової енергії для міста Львова на основі запропонованого алгоритму розрахунку ТФГСК в ССЕП.

4. Побудовано графічні залежності коефіцієнта заміщення сонячної енергії в покритті теплового навантаження для однородинного сімейного будинку від співвідношення активної площі ТФГСК до площі забудови. Отримано номограму встановлення коефіцієнта заміщення сонячної енергії для СГВП в ССЕП із ТФГСК для багатоповерхової громадської будівлі ( $\leq 10$  поверхів).

5. Запропоновано графічну залежність вартості сумісної конструкції ТФГСК із селективним покриттям та з встановленим обладнанням залежно від площі світлопрозорого фасаду будівлі.

6. Проаналізовано вартість встановлення конструкції ТФГСК в ССЕП за різних співвідношень ціни на органічне паливо та електроенергію. Доведено можливість економії коштів та енергоресурсів за використання в ССЕП конструкції ТФГСК із селективним покриттям.

7. Обґрунтовано економічну доцільність використання ССЕР в основі якої прийнято ТФГСК як монопродукт з врахування впливу фактору часу і без нього на кінцеву економічну вигоду.

8. Використання конструкції ТФГСК було оцінено за допомогою параметра чистих грошових надходжень, що дозволило розрахувати абсолютну величину економічного ефекту від реалізації світлопрозорого фасаду. Також, доведено, що динаміка такого інтегрального показника економічної вигоди позитивна для конструкції ТФГСК, тому ССЕР, що працюють в режимі ВЦТ та ПЦТ для однородинного сімейного будинку мають термін окупності не більше 10 років.

## **РОЗДІЛ 5**

### **ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛООВОГО ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГІБРИДНОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА В СИСТЕМІ СОНЯЧНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ**

В даному розділі описано практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора. Наведено принцип роботи комбінованої енергоефективної системи сонячного енергопостачання, що містить тепловий та фотоелектричний сонячний колектор в будівлі із світлопрозорим фасадом. Наведено порівняльну характеристику величини викидів в атмосферу за використання органічного палива на противагу генерованої енергії конструкцією теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.

#### **5.1 Практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Узагальнюючи дані отримані в результаті аналітичних та експериментальних досліджень, можна підтвердити практичну доцільність застосування ТФГСК. Запропоновані моделі теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора можуть бути застосовані для галузі будівництва та архітектури, сонячної енергетики та альтернативних технологій в сфері енергетики і належать до енергозберігаючих та енергоефективних технологій. Також, такі конструкції можуть бути використані для підігріву теплоносія на потреби теплопостачання та генерування електроенергії завдяки перетворенню сонячної енергії.

Більшість моделей гібридних сонячних колекторів, які існують на ринку, не передбачені для теплопостачання за допомогою рідинного теплоносія. Окрім цього, такі конструкції не використовують додаткові переваги склопакетів, зокрема, їхню функцію енергозбереження, тому запропонована конструкція ТФГСК враховує дані недоліки.

Отже, розроблений сонячний колектор, комбінований із світлопрозорою конструкцією зовнішнього огороження (рис. 5.1), додатково містить ролюетний фотоелектричний сонячний колектор розташований перед зовнішнім склопакетом звичайного типу. Зовнішній склопакет звичайного типу та внутрішній склопакет енергозберігаючого типу з селективним покриттям формують міжсклопакетний простір, в якому встановлене скло з метою утворення каналів для повітряного теплоносія та нагріву ТО рідинним теплоносієм, що вбудований у верхню частину віконної рами [121].

Розміщення склопакетів в конструкції ТФГСК є важливим моментом енергозбереження. Зокрема, рекомендується розташувати склопакет звичайного типу зі сторони зовнішнього середовища, а зі сторони внутрішнього простору – із шибою енергозберігаючого типу, що містить селективне покриття. Таке рішення дозволяє створити кращі мікрокліматичні умови в приміщенні завдяки врегулюванню теплової енергії за дії інфрачервоного спектру випромінювання [190]. Крім цього, утворення повітряного прошарку в міжсклопакетному просторі за допомогою скла допомагає розшарувати повітряний теплоносій для стабільнішої теплової ефективності.

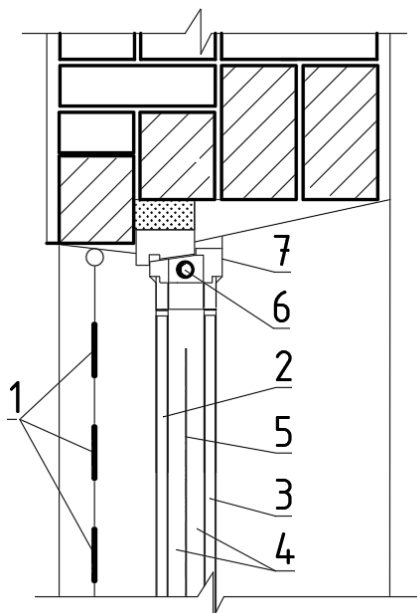


Рисунок 5.1 – Тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор комбінований із світлопрозорою конструкцією зовнішнього огороження: 1 – фотоелектричний сонячний колектор суміщений із ролюетами; 2 – зовнішній склопакет звичайного типу; 3 – внутрішній склопакет енергозберігаючого типу з селективним покриттям; 4 – міжсклопакетний простір; 5 – скло; 6 – ТО; 7 – верхня частина віконної рами

На рисунку 5.1 схематично зображено фотоелектричний сонячний колектор 1 суміщений із ролюетами, розташований перед зовнішнім склопакетом

звичайного типу 2 та внутрішнім склопакетом енергозберігаючого типу з селективним покриттям 3, які формують міжсклопакетний простір 4, в якому встановлене скло 5 з метою утворення каналів для повітряного теплоносія та для нагрівання теплообмінника 6 з рідинним теплоносієм, що вбудований у верхню частину віконної рами 7.

Вбудований ТО у верхній частині віконної рами рекомендовано виконувати із спіраленавивним нагрівальним елементом, з метою кращого сприйняття ним тепловіддачі від повітряного теплоносія. Як варіант, можливе його виконання у формі пластинчастого нагрівального елемента, який розміщений навколо трубопроводу. Для компенсації електричного навантаження для споживача, було передбачено фотоелектричний сонячний колектор ролетного виконання, що може, окрім генерування електричної енергії, використовуватись одночасно як сонцезахисний пристрій. Фотоелектричний колектор модифікований з ролетним пристосуванням дає можливість споживачеві використовувати його динамічно, тобто залежно від наявності сонячної енергії та споживчих потреб.

ТФГСК суміщений із СФБ працює наступним чином. В періоди високого сонцестояння сонячна енергія надходить на ролетний ФСК 1, який використовується, як сонцезахисний пристрій для підтримки комфортних оптичних та мікрокліматичних умов в приміщенні. Окрім цього, СЕ, водночас, надходить на ТО 6, який розташований у верхній частині віконної рами 7, де циркулює рідинний теплоносій. У випадку, коли ролетний ФСК згорнутий, то СЕ надходить на СП звичайного типу 2, скло 5 та СП енергозберігаючого типу з селективним покриттям 3. Повітряний теплоносій, що циркулює в міжсклопакетному просторі 4, завдяки різниці густин нагрітого та охолодженого повітряного теплоносія в утворених каналах за допомогою скла 5, нагріває рідинний теплоносій.

Для практичного впровадження було розглянуто варіативність розташування ФЕ в запропонованій конструкції ТФГСК. Крім зазначеного, в нижній та верхній частині конструкції СП було розміщено отвори для руху ролетів. З метою

охолодження поверхні ФЕ в конструкції передбачено можливість розмістити вентиляційний пристрій (рис. 5.2).

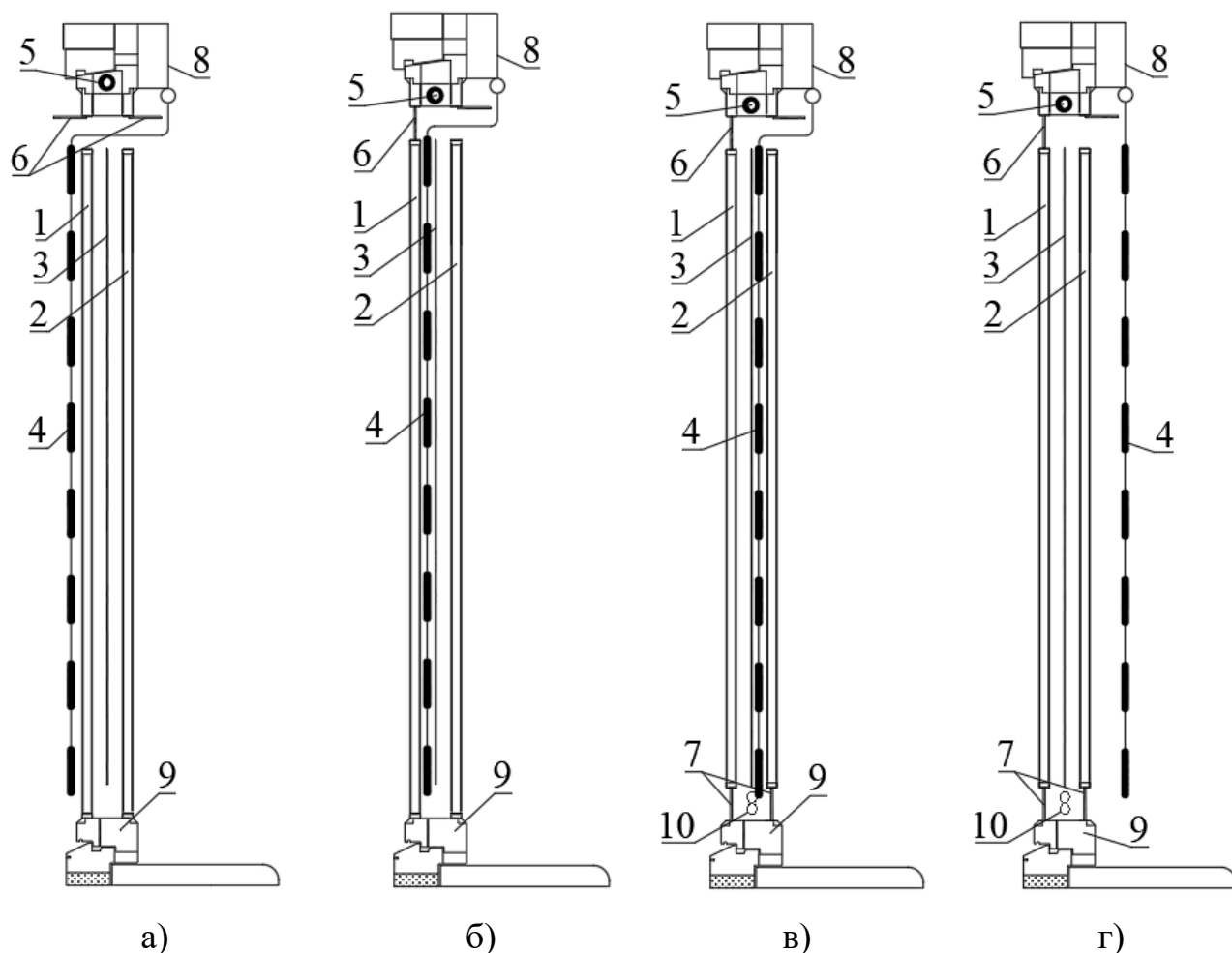


Рисунок 5.2 – Варіативність розташування ФСК в розробленій конструкції ТФГСК з рухомими ролетами та вентиляційним пристроєм:

а) ФСК із зовнішньої поверхні СФБ; б) ФСК в міжклопакетному просторі ТФГСК; в) ФСК із вентиляційним пристроєм у міжклопакетному просторі ТФГСК; г) ФСК з внутрішньої поверхні СФБ;

1 – зовнішній СП звичайного типу; 2 – внутрішній СП енергозберігаючого типу з селективним покриттям; 3 – скло; 4 – ролетний ФСК; 5 – ТО; 6 – верхній отвір віконної рами; 7 – нижній отвір віконної рами; 8 – верхня частина віконної рами; 9 – нижня частина віконної рами; 10 – вентиляційний пристрій

Розроблений ТФГСК, також може містити конструкцію із фотоелектричними модулями, що розташовані на ламелях [18]. Така модифікація гібридного



сонячного колектора містить корпус з встановленими ламелями та поворотний механізм. Ламелі є суміщеними з корпусом скляного фасаду споруди, який виконаний з енергозберігаючими СП, а також мають можливість повороту навколо своєї осі на кут  $\alpha \leq 90^\circ$  та додатково містять на своїй поверхні фотоелектричні модулі. В корпусі розташовано трубопровід з теплоносієм (рис. 5.3).

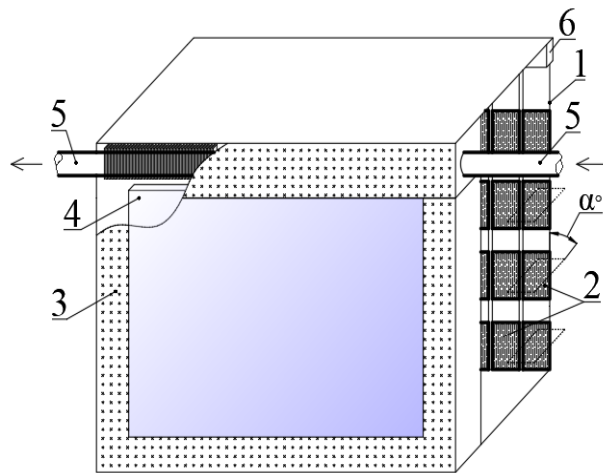


Рисунок 5.3 – Тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор із поворотними ламелями:  
 1 – ламелі; 2 – фотоелектричні модулі;  
 3 – корпус скляного фасаду споруди;  
 4 – енергозберігаючі СП;  
 5 – трубопровід з теплоносієм;  $\alpha$  – кут повороту ламелі навколо своєї осі

В конструкції ТФГСК розташування фотоелектричних модулів з внутрішньої сторони приміщення передбачено з метою їхнього захисту від несприятливих метеорологічних умов. Конструкція ТФГСК для СФБ має містити необхідну кількість енергозберігаючих СП, відповідно до кліматичних умов ззовні, що дозволить людині перебувати всередині приміщення в оптимально комфортних мікрокліматичних умовах [35].

У верхній частині корпусу запропонованого ТФГСК встановлено ТО, що може містити додаткові спіраленавивні чи з пластинчасті нагрівальні елементи [190]. За умов необхідності підвищеного теплового навантаження для споживача можливо додатково передбачити вбудований ТО в систему теплопостачання у бокові та нижню частини корпусу. Система теплопостачання з ТО, яка вбудована в корпус, може використовуватись для попереднього підігріву теплоносія в системах стійких до високих температур. Більше того, циркуляція теплоносія в ТО, який вбудований в корпус забезпечуватиме значущість конструкції за масового перспективного виробництва заводом-виробником, оскільки витримує більший тиск та швидкість руху теплоносія.

Розроблена конструкція ТФГСК із поворотними ламелями працює наступним чином. Сонячне випромінювання проходить крізь енергозберігаючі СП 4 та потрапляє на ламелі 1, що мають можливість повороту навколо своєї осі на кут  $\alpha \leq 90^\circ$ . На поверхні ламелей розміщені фотоелектричні модулі 2, які в подальшому генерують електричну енергію для споживчих потреб. Одночасно СВ нагріває корпус скляного фасаду будівлі 3, в якому розміщено трубопровід з теплоносієм 5. У випадку збільшення споживчих потреб на теплопостачання, конструкція ТФГСК дозволяє встановити додаткові ТО з теплоносієм 5 в бокові та нижню частини корпусу. Окрім цього, для забезпечення комфортних оптичних та мікрокліматичних умов у приміщенні або за потреби, споживач має змогу повернути ламелі 1 на кут  $\alpha$ , з метою кращого сприйняття сонячного випромінювання в різні пори року. Поворотний механізм 6 в ТФГСК призначений для обертання фотоелектричних модулів 2 навколо своєї осі на ламелях 1, забезпечуючи таким чином надходження СВ безпосередньо в приміщення.

На основі запропонованих схематичних рішень (рис. 5.1-5.3), було отримано моделі теплових та фотоелектричних сонячних колекторів як елемента геліосистеми, що суміщена із СФБ для однородинного сімейного будинку площею 200 м<sup>2</sup>. На рисунку 5.4 наведено комплексні варіації фотоелементів в конструкції СФБ. Для прийнятої будівлі було виділено окрему теплогенераторну, в якій розташували необхідне обладнання для генерації теплової та електричної енергії з подальшим її акумулюванням. ТО було вбудовано в енергозберігаючий склопакет із селективним покриттям, теплоносій в якому працював в режимі вимушеної циркуляції теплоносія. Ефективність роботи ССЕР в такому випадку досягає 30 %. Для будівлі передбачено розташування фотоелементів на вертикальних та горизонтальних ролетах як сонцезахисного пристрою, із можливостями повороту навколо своєї осі і формування потрібного проценту затінення приміщення. Також, для конструкції ТФГСК передбачено різні варіанти розміщення ФЕ: ззовні фасаду, у внутрішньому міжсклопакетному просторі, всередині приміщення.



Рисунок 5.4 – ТФГСК елементи якого інтегровані в світлопрозорий фасад будівлі як компонента ССЕРП для інноваційного енергозберігаючого однорідного сімейного будинку: 1 – ролети розташовані перед склом конструкції ТФГСК; 2 – ролети розташовані в конструкції ТФГСК; 3 – ролети розташовані в приміщенні; 4 – ТО ТФГСК

Варіативність розташування ФЕ та поворот ролетів навколо своєї осі залежить не тільки від потреб споживача, але й від призначення приміщення, в якому вони розташовані. На рисунку 5.5 наведено візуалізацію розташування ФЕ в теплогенераторній із СФБ. Зокрема на рисунку 5.5а зображено розташування ролета у внутрішньому приміщенні з поворотом на  $45^\circ$  навколо своєї осі. На рисунку 5.5б наведено розташування ролета в міжсклопакетному просторі. Такий тип приміщення підлягає підвищеному теплонадходженню від трубопроводів та обладнання, тому запропоноване потенційне розташування ролетів дозволить уникнути в літній період року збільшення температури в приміщенні, що підтримуватиме оптимальні умови для роботи автоматики обладнання.



а)



б)

Рисунок 5.5 – Розташування ФЕ в СФБ для приміщення із значними теплонадходженнями: а) – ролети розташовані у внутрішньому приміщенні; б) – ролети розташовані в середині конструкції ТФГСК

На рисунку 5.6 наведено розташування ТО в ТФГСК суміщеного із конструкцією світлопрозорого фасаду будівлі. Для ТО обрано поліпропіленові трубопроводи типу «Stabi» (PN20). Для врахування температурних розширень трубопроводів передбачено кути повороту та компенсаційні кільця. Труби в місцях перетину внутрішніх стін прокладено в гільзах з негорючих матеріалів, крім цього передбачено вогнетривкі ущільнення. Трубопроводи прокладаються з ухилом 0,002 в бік спускних кранів системи.

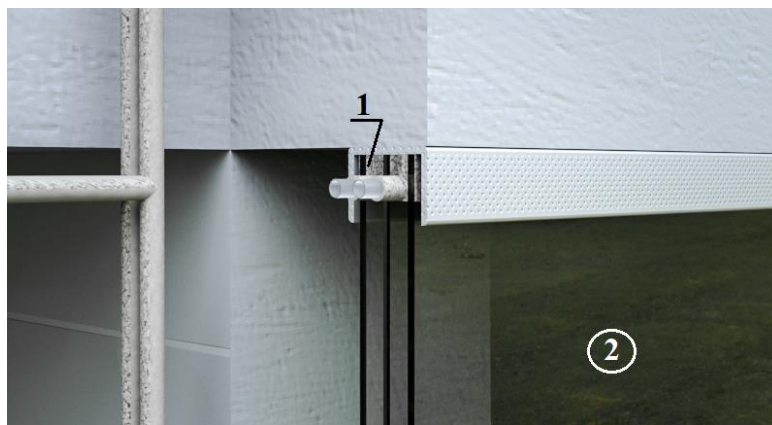


Рисунок 5.6 – Конструкція ТФГСК із вбудованим ТО: 1 – ТО; 2 – ТФГСК

Варіант СФБ із перевищеним коефіцієнтом скління та поверховістю більше 1 поверху наведено рисунку 5.7, який враховує збільшення температури у внутрішньому приміщенні із зростанням висоти.



Рисунок 5.7 – Варіювання розташування фотоелементів в конструкції ТФГСК в будівлі із перевищеним коефіцієнтом скління

В ході досліджень розглянуто також іншу модифікацію розташування фотоелементів у конструкції фасаду будівлі, що не містить збільшеного коефіцієнта скління. Для таких будівель передбачено розташування ФЕ на поверхні фасадів, що не належать до світлопрозорих. У такому випадку рекомендується комбінація світлопрозорого і звичайного фасаду із прогресивною площею ФСК в ТФГСК (рис. 5.8).

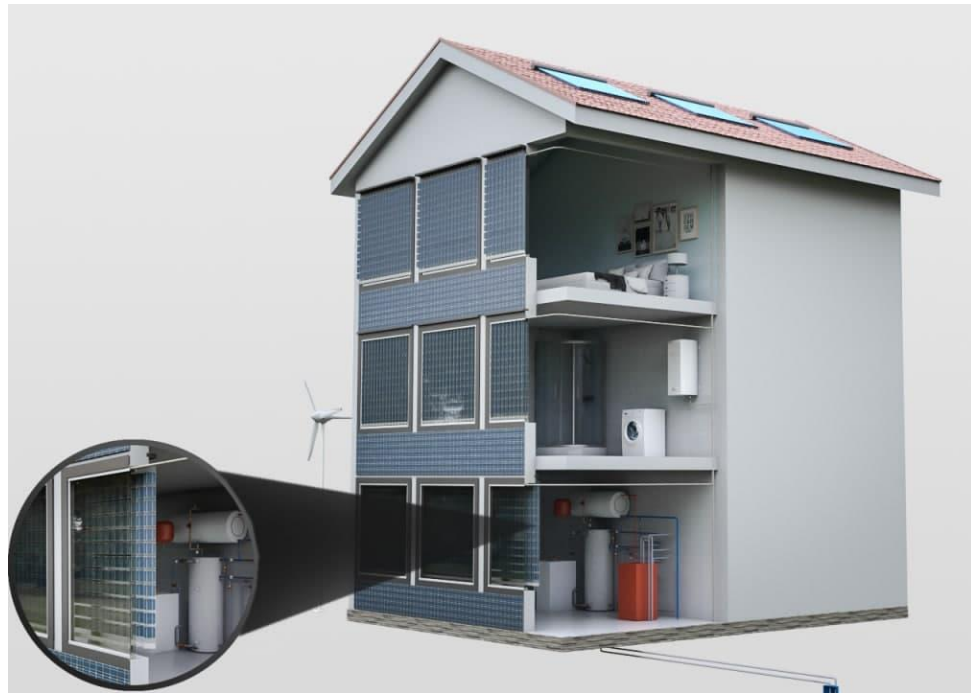


Рисунок 5.8 – Комбінація світлопрозорого і звичайного фасаду будівлі з можливістю збільшення площі ФСК в ТФГСК

Крім цього, було запропоновано варіант комбінування ТФГСК в ССЕР, що містить інші альтернативні джерела енергії (рис. 5.9). За такого схемного рішення, генерування електричної енергії відбувається за використання вітрової потужності, а теплової енергії – від теплових насосів (повітряних і ґрунтових, або ґрунтових теплових колекторів із рідинним теплоносієм). Для аналізу цього виду ССЕР необхідний повний комплексний розрахунок в залежності від обраного типу джерела енергії та умов його експлуатації. Таким чином при правильному енергетичному менеджменті можна ефективно генерувати електричну та теплову енергію в ССЕР з метою її акумулювання чи безпосереднього використання.



Рисунок 5.9 – ССЕСП, що містить конструкцію ТФГСК та інші альтернативні джерела енергії: 1 –ТФГСК; 2 – вітрогенератор; 3 – ґрунтовий тепловий колектор

Підсумовуючи вищеописане, розташування ТФГСК суміщеного із СФБ залежить від потреб споживача та умов експлуатації цієї конструкції. На противагу альтернативним джерелам енергії використання традиційного виду палива призводить до руйнування атмосфери та біосфери, оскільки потребує величезних затрат на транспортування із віддалених куточків планети Земля, зберігання, очищення. Тому будівля, що використовує ТФГСК для енергопостачання на початковому етапі та в ході його експлуатації стає енергоефективною [168].

## **5.2 Принцип роботи комбінованої енергоефективної системи енергопостачання в основі якої є конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Принцип роботи ССЕСП із ТФГСК визначається під час вирішення проектних рішень. ТФГСК за капітального ремонту цивільної будівлі можна вбудувати в існуючий фасад споруди за умови необхідності заміни вікон на енергозберігаючі з метою зменшення капіталовкладень в ССЕСП з ТФГСК [52]. В межах

дисертаційного дослідження розглянуто проект капітального ремонту цивільного будинку з можливістю встановлення ТФГСК під час заміни вікон на енергозберігаючі та утеплення фасаду (рис. 5.10). Таке схемне рішення було орієнтовано на лікарняну споруду. З цією метою було розроблено типовий індивідуальний тепловий пункт (ІТП) на цокольному поверсі будівлі при реконструкції існуючої системи гарячого водопостачання.

ССЕП запроектована для забезпечення теплоносієм на потреби гарячого водопостачання та електропостачання. Як теплоносій для СГВП прийнято воду з температурними параметрами  $70/30^{\circ}\text{C}$ . В проекті ССЕП з ТФГСК прийнято розрахунковий тиск на ввіді  $P_{\text{под}} = 0,275 \text{ МПа}$ ,  $P_{\text{звор}} = 0,223 \text{ МПа}$ .

Вузол обліку теплової енергії передбачено з тепловим лічильником фірми DIENL Metering (Німеччина). Після ІТП теплоносій подається в СГВП будівлі з прийнятими температурними параметрами  $60/5^{\circ}\text{C}$ . ІТП запроектовано за незалежною схемою для потреб СГВП з пластинчастим розбірним ТО, позиція К1.

У цілях забезпечення енергозбереження додатковим джерелом теплопостачання СГВП запроектовано встановлення на кожному поверсі ряду теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів (К2) загальною ефективністю 24 % (рис. 5.10). В схемному рішенні прийнято розрахунковий температурний режим контуру ТФГСК за їхньої безперервної роботи -  $10/30^{\circ}\text{C}$ . Теплоносієм контуру із ТФГСК є вода, за необхідності допускається використання гліколю з концентрацією не більше 50 %.

Також, в приміщенні ІТП запроектовано два водонагрівачі (буферні ємності) (К3) по 1000 л кожен, що мають по два виходи для підключення електричних ТЕНів (К4). Об'єм водонагрівачів вибрано з міркувань постачання СГВП, обсягом 12 л/год. Водонагрівач (К3) було вибрано із сталльної ємності з мідним антикорозійним покриттям, що оснащений двома мідними змійовиками з оребренням або нижнім змійовиком із збільшеною площею. Поліуретанову ізоляцію водонагрівача К3 та його зовнішню пластикову оболонку рекомендовано вибирати знімними. Для уникнення зупинки циркуляції в контурі ТФГСК передбачено встановлення ємнісного баку (К5) з можливістю



підключення ТЕНу (K6) для забезпечення мінімально необхідної температури подачі теплоносія до ТФГСК, але не нижче 10 °С (з метою уникнення замерзання в ТФГСК). Циркуляція в контурі з ТФГСК (від п. K5 до п. K2 і навпаки) ТН здійснюється двома насосами (K8). Циркуляцію між буферною ємністю (K5) та змійовиками (K3) здійснює магістральний насос (K8).

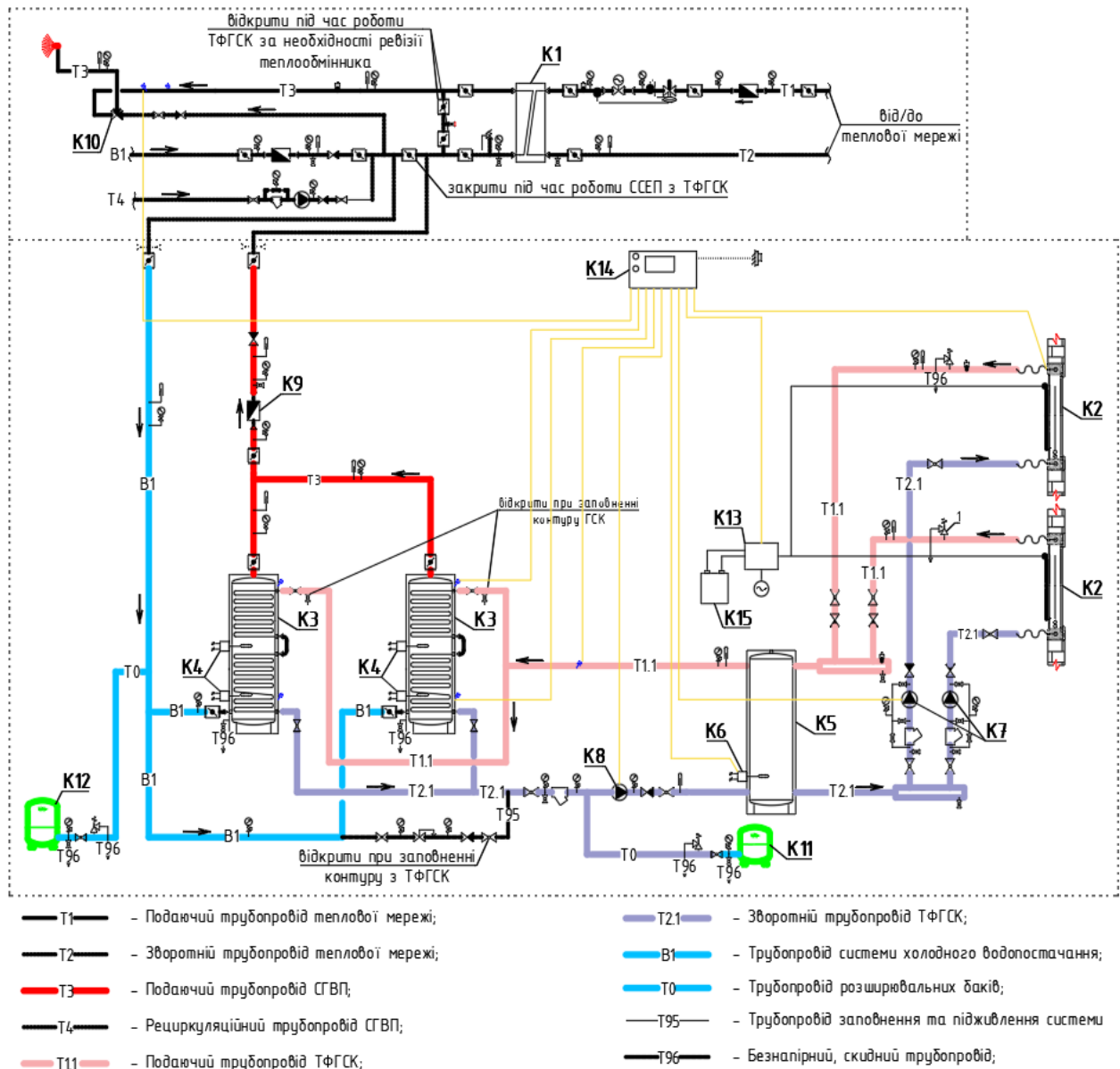


Рисунок 5.10 – Схема системи сонячного енергопостачання, що містить конструкції теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів під час реконструкції цивільної споруди

Згенеровану теплову енергію для внутрішнього контуру ТФГСК передбачено обліковувати за допомогою вимірювального комплексу (K9). Для

контролю роботи ТФГСК та додаткового обладнання рекомендовано встановити модуль управління (K14). Згідно техніки безпеки, для запобігання опіків від СГВП, проектом передбачено встановлення термостатичного підмішуючого клапана (K10).

Для забезпечення компенсації при збільшенні об'єму під час нагрівання в системі СГВП, проектом передбачено встановлення розширювальних баків на тиск 3 бар (K11) та 6 бар (K12).

У випадку, коли температура подачі є недостатньою для споживача, то догрівання теплоносія відбувається через ТО K1. В зимовий період, щоб уникнути випадків замерзання у ТФГСК встановлено ТЕН (K6), що дозволяє забезпечити теплонадходження у приміщення цивільної споруди від ТФГСК. Такий режим не призводить до значних втрат енергії ТФГСК. Крім цього, нагрівання ТЕНом (K6) може здійснюватися від електроенергії згенерованої ТФГСК (наприклад, в зимовий період). Однак, дане схемне рішення потребує дублера електричної енергії.

В електричному контурі з ТФГСК, запроектовано контролер (K13), що дозволяє передавати згенеровану енергію на модуль управління (K14). Якщо використання згенерованої електроенергії є надто великим, то в цьому випадку передбачено акумуляторну батарею (K15).

Запропоновано, також схемне рішення, що дозволяє використати енергію згенеровану ССЕР із ТФГСК під час нового будівництва цивільної споруди (басейну) (рис. 5.11). За такої стратегії згенеровану енергію можна використати для СГВП та для обігріву системою підлогового опалення. Особливістю цієї розробленої схеми є те, що в разі дефіциту теплової енергії від ТФГСК є можливість підтримки роботи двох систем, а саме: СГВП та підлогового СО, від дублюючого джерела енергії.

Параметри для розроблення схеми наведеної на рисунку 5.11 були аналогічними, як і до попереднього схемного рішення. Однак, особливістю схеми є те, що для системи підлогового опалення подача теплоносія здійснюється за того ж температурного графіку, що для параметрів СГВП. Для запропонованого схемного рішення облік теплової енергії контуру з ТФГСК є зайвим, оскільки схема

розроблена для нового будівництва зі статусом енергозберігаючої споруди. Тому, позицію K9, що була зазначена в попередньому схемному рішенні (рис. 5.10) замінено на триходові клапани (п.К9, п.К9') для регулювання ТТ у внутрішніх контурах. Також, запроєктовано насос рециркуляції теплоносія, позиція K16.

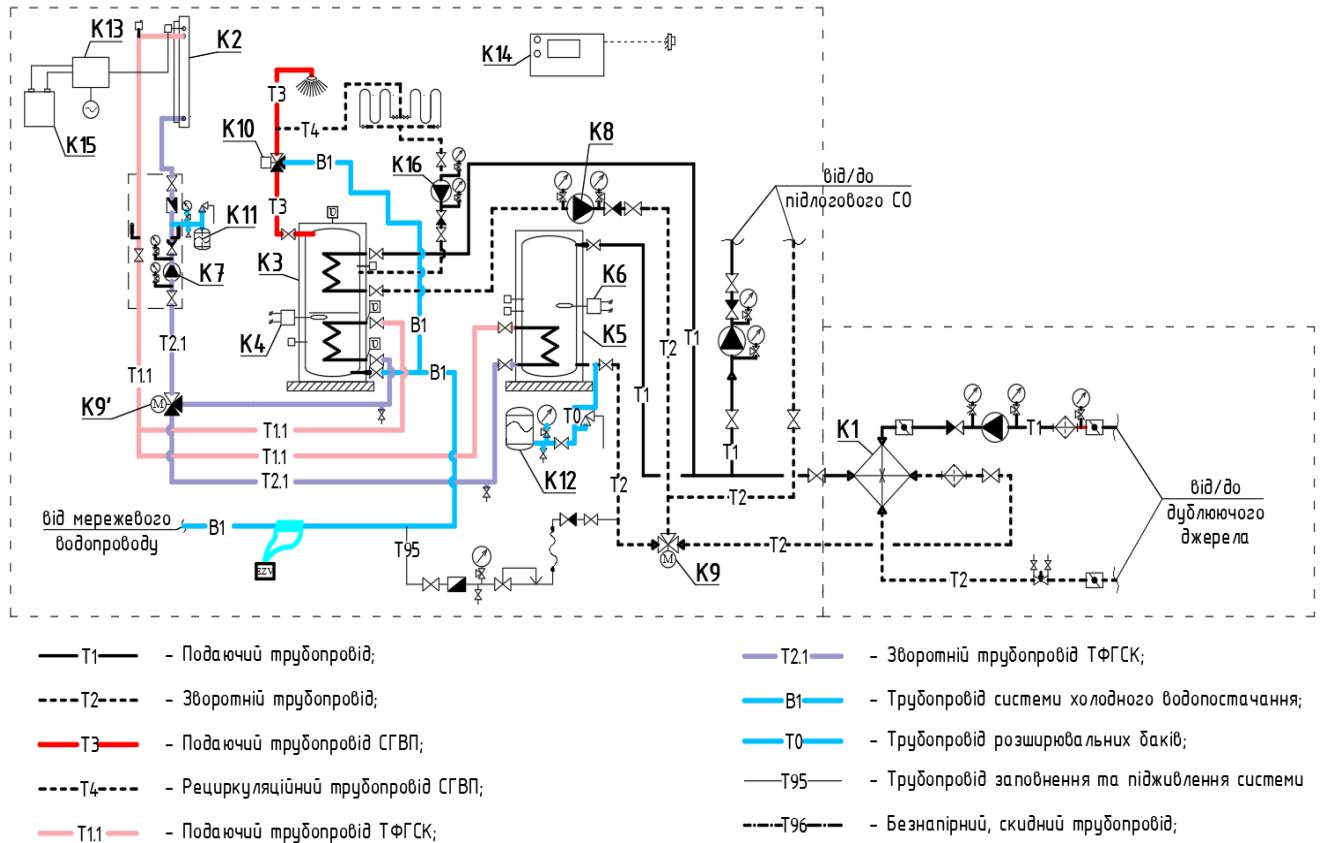


Рисунок 5.11 – Схема системи сонячного енергопостачання, що містить конструкції теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів під час нового будівництва цивільної споруди

Схемні рішення, які наведені на рисунках 5.10 та 5.11, описані з метою узагальнення принципової роботи ССЕР суміщеного з ТФГСК.

Відмічено, що для забезпечення роботи теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів і за їхнього впровадження в практичне використання виникає необхідність уникнення замерзання в зимовий період, що було вирішено в даних схемних рішеннях. Доцільно для таких систем використовувати ролетні ФСК, що дозволить регулювати коефіцієнт природного освітлення в приміщеннях.

### **5.3 Визначення величини викидів в атмосферу за використання органічного палива на противагу генерованої енергії від конструкції теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора**

Міністерство екології та природних ресурсів України здійснює державний контроль викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, забезпечує нормативно-правове регулювання у сфері охорони атмосферного повітря, розробляє методики розрахунку частки антропогенного впливу на забруднення повітря, відповідно до положення затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №32 від 21 січня 2015 року.

З метою аналізу даних, щодо концентрації забруднюючих речовин та об'єму парникових газів, застосовують два методи: вимірювання вмісту шкідливих речовин у димових газах енергетичних установок; розрахунковий метод, що базується на даних втрат та зміни якісного складу використаного палива з врахуванням характеристик енергетичних та газоочисних установок. Коефіцієнти викидів визначають згідно нормативно-правових документів затверджених Міністерством екології та природних ресурсів. Показники емісії забруднюючих речовин визначають згідно з чинним в Україні документом [28].

Чинне законодавство України «Про охорону атмосферного повітря» (стаття 10) передбачає, що суб'єкти підприємницької діяльності (підприємства, установи, організації, громадяни), які забруднюють атмосферне повітря викидами, зобов'язані постійно обліковувати й контролювати обсяг, склад і рівень викиду шкідливих речовин. Однак, листи центральних органів виконавчої влади, зокрема Держстату, не є нормативно-правовими актами, не корегують і не встановлюють нові правові норми, мають суто рекомендаційний і пояснювальний характер.

Для кількісної характеристики забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами, органами державної статистики було розроблено спеціальну форму річної звітності № 2-тп, зокрема, «Звіт про охорону атмосферного повітря». Для підрахунку викидів шкідливих і небезпечних речовин в атмосферу за звітний рік долучилися респонденти, які не отримали дозволу на їхній викид, або не перебувають на державному обліку за обсягами потенційних

загроз від викидів забруднюючих речовин та парникових газів у атмосферу, або використовують непромислові установки для спалювання органічного палива.

З метою обігріву приміщень застосовують показники емісії забруднюючих речовин та нижчу робочу теплоту згоряння палива й використовують наступну формулу розрахунку валового викиду  $j$ -ї забруднюючої речовини  $ВВ_j$  (т), що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки (5.1):

$$ВВ_j = 10^{-6} k_j B_i Q_{зг_i}^H, \quad (5.1)$$

де  $ВВ_j$  – валовий викид  $j$ -ї забруднювальної речовини під час спалювання  $i$ -го палива за звітний рік, т;  $k_j$  – показник емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини для  $i$ -го палива, г/ГДж;  $B_i$  – витрата  $i$ -го палива за звітний рік, т;  $Q_{зг_i}^H$  – нижча робоча теплота згоряння  $i$ -го палива, МДж/кг.

Застосовують показники емісії забруднюючих речовин та нижчу робочу теплоту згоряння палива. На основі нормативно правових даних, описаних вище, було виконано розрахунок викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу під час спалювання природного газу за таким алгоритмом:

Витрату природного газу за рік можна розрахувати за формулою (5.2) [152]:

$$B = X \cdot \rho, \quad (5.2)$$

де  $X$  – об'єм спожитого газу, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – густина газу за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

Для порівняння за вихідні дані було прийнято:

- витрата палива на рік,  $B$  (т);
- густина природного газу,  $\rho = 0,723$  кг/м<sup>3</sup>;
- нижча робоча теплота згоряння палива,  $Q_{зг_i}^H = 45,75$  МДж/кг;
- показники емісії забруднюючих речовин:  $k_{NOx} = 64,311$  г/ГДж;  $k_{CO} = 248,75$  г/ГДж;  $k_{CO_2} = 58748,13$  г/ГДж;  $k_{N_2O} = 0,1$  г/ГДж;  $k_{CH_4} = 1,0$  г/ГДж.

Згідно проведених розрахунків, за використання природного газу 4,7 м<sup>3</sup>/годину, його масова витрата становить:

$$B = 4,7 \text{ м}^3 \cdot 0,723 \text{ кг/м}^3 = 3,3981 \text{ кг/год.}$$

Тоді, валовий викид оксидів:

$$E_{\text{NOx}} = 10^{-6} k_{\text{NOx}} Q_{3\Gamma_i}^{\text{H}} B = 10^{-6} \cdot 64,311 \cdot 45,75 \cdot 3,3981 \text{ кг/год} = 9,99 \text{ г/год};$$

- валовий викид карбону (II) оксиду:

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} k_{\text{CO}} Q_{3\Gamma_i}^{\text{H}} B = 10^{-6} \cdot 248,75 \cdot 45,75 \cdot 3,3981 \text{ кг/год} = 38,67 \text{ г/год};$$

- валовий викид карбону (IV) оксиду:

$$E_{\text{CO}_2} = 10^{-6} k_{\text{CO}_2} Q_{3\Gamma_i}^{\text{H}} B = 10^{-6} \cdot 58748,13 \cdot 45,75 \cdot 3,3981 \text{ кг/год} = 9133,16 \text{ г/год};$$

- валовий викид нітрогену (I) оксиду:

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 10^{-6} k_{\text{N}_2\text{O}} Q_{3\Gamma_i}^{\text{H}} B = 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 45,75 \cdot 3,3981 \text{ кг/год} = 1,55 \text{ г/год};$$

- валовий викид метану:

$$E_{\text{CH}_4} = 10^{-6} k_{\text{CH}_4} Q_{3\Gamma_i}^{\text{H}} B = 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 45,75 \cdot 3,3981 \text{ кг/год} = 0,00046 \text{ г/год}.$$

На основі цих даних отримано зведену таблицю викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу під час спалювання різних типів органічного палива (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Розрахунок викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу під час спалювання органічного палива

Вид палива	Природний газ, г/год	Мазут, г/год	Кам'яне або буре вугілля, г/год
Вид забруднюючої речовини			
$E_{\text{NOx}}$	9,99	14,96	20,86
$E_{\text{CO}}$	38,67	74,09	386,93
$E_{\text{CO}_2}$	9133,16	17837,86	19380,46
$E_{\text{N}_2\text{O}}$	1,55	0,14	0,29
$E_{\text{CH}_4}$	0,00046	0,70	0,21
$E_{\text{SO}_2}$	-	116,40	518,11
$E_{\text{сажі}}$	-	94,42	476,74
$E_{\text{нмлос}}$	-	2,33	124,05

Також, було побудовано графічні залежності викидів різних речовин в атмосферу. На противагу традиційному паливу використання ТФГСК не має викидів в атмосферу (рис. 5.12) [117].

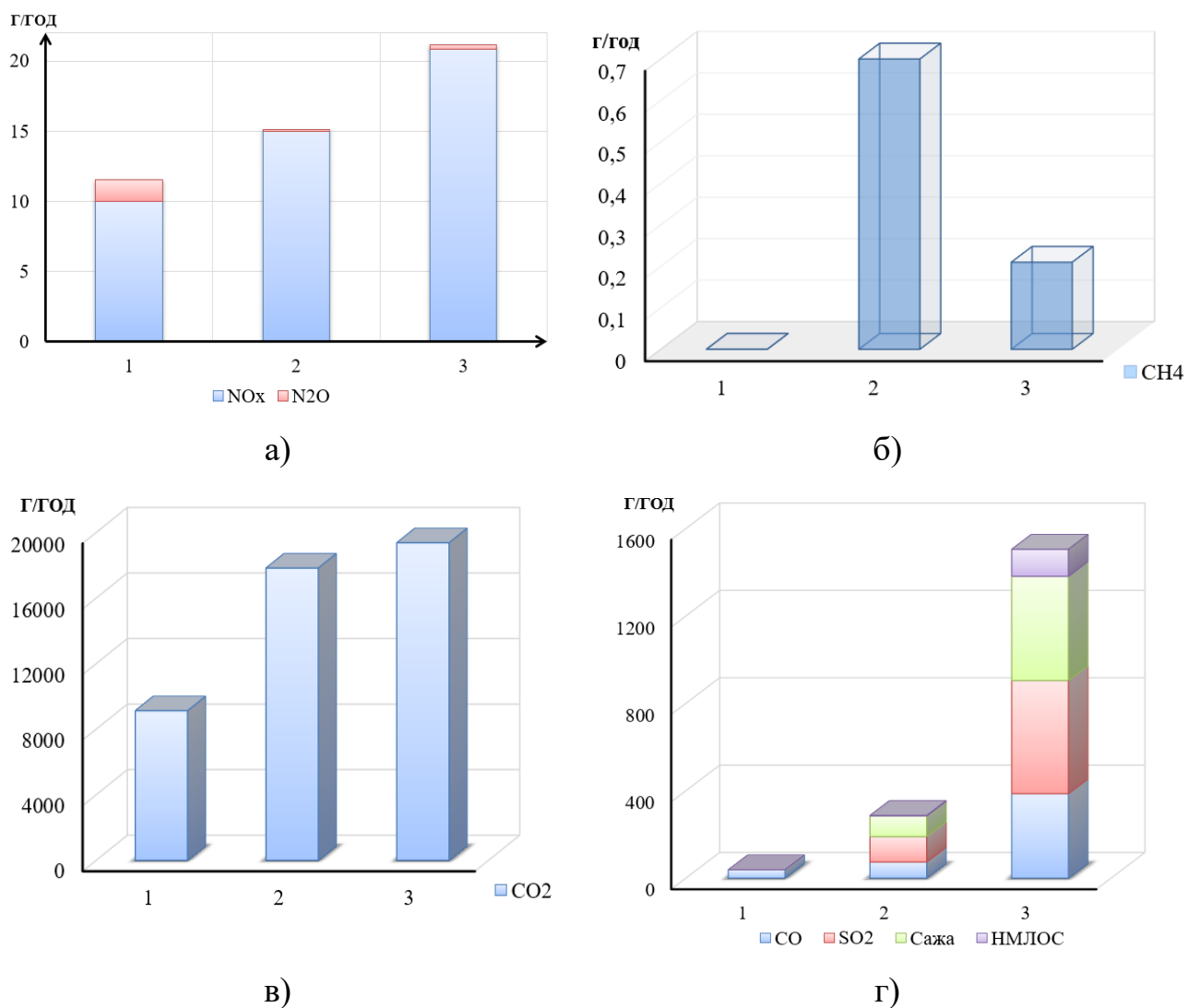


Рисунок 5.12 – Вміст забруднюючих речовин та парникових газів в атмосфері під час спалювання органічного палива, г/год:

- а) викиди Нітрогену оксидів; б) викиди метану; в) вуглекислого газу; г) чадного газу, Сульфуру (II) оксиду, сажі, неметанових летких органічних сполук;  
 1 – природній газ; 2 – мазут; 3 – кам'яне вугілля; 4 – буре вугілля

## Висновки до Розділу 5

1. Запропоновані конструкції ТФГСК, що є частиною світлопрозорого фасаду будівлі захищені патентами України на корисну модель та розроблено варіанти розміщення ФЕ у конструкції ТФГСК зовні фасаду, у внутрішньому міжклопакетному просторі, всередині приміщення.

2. Наведено практичні рекомендації щодо використання результатів досліджень отриманих на основі аналітичних та експериментальних даних для геліосистеми інтегрованої в світлопрозорий фасад будівлі в основі якої є конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора. Розроблено схемні рішення ТФГСК з рухомими ролетами, ламелями, вентиляційним пристроєм.

3. Побудовано моделі споруд для однородинного сімейного типу, в світлопрозорий фасад яких інтегровано конструкцію ТФГСК та наведено комплексне варіювання розташування ФЕ для такої будівлі. Максимальна ефективність роботи ССЕР для запропонованого типу будівлі у місті Львові становить 30 %. Враховано розташування фотоелементів на вертикальних та горизонтальних ролетах в якості сонцезахисного пристрою із можливістю повороту навколо своєї осі, регулювання проценту затінення приміщення.

4. Розроблено практичні схемні рішення комбінованої енергоефективної системи сонячного енергопостачання в будівлі із світлопрозорим фасадом, а також описано принцип їхньої роботи в основі яких є конструкція ТФГСК. Наведено схемне рішення ССЕР із ТФГСК під час реконструкції та під час нового будівництва цивільної споруди.

5. Запропоновані конструкції теплових та фотоелектричних гібридних сонячних колекторів було використано під час науково-дослідної роботи кафедри за темами: «Розроблення енергоощадних заходів АЗС с. Солонка» (№ держреєстрації 0115U000448, 11.2014-07.2015 рр.); «Комбіновані системи сонячного теплопостачання для енергоефективних будинків» (№ держреєстрації 0116U008628, 09.2016-12.2016 р.); «Розрахунок ефективності та окупності системи сонячного теплопостачання, елементи якої інтегровані в архітектурні конструкції будівлі» (№ 345, 04.2020). Матеріали завершених наукових досліджень впроваджено компаніями ТОВ «Техноклас» та ТОВ «Оазис Комфорт» (Додаток Г).



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу теоретичних даних та методів розрахунку систем енергопостачання із застосуванням гібридних сонячних колекторів виявлено, що існуючі системи неефективні для суміщення із світлопрозорим фасадом будівлі, а також не враховують мікрокліматичні умови в приміщенні для комфортного перебування людей. Тому, встановлено можливість та показано необхідність застосування геліосистем інтегрованих в світлопрозорі захищення будівель в основі яких є розроблена конструкція теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора.

2. Удосконалено математичну модель та здійснено моделювання тепло- та електротехнічних процесів, що проходять в теплому та фотоелектричному гібридному сонячному колекторі в системі енергопостачання, зокрема, енергетичної ефективності, а також коефіцієнта відведення теплової енергії та теплопередачі теплових втрат, що надало можливість встановити його оптичні характеристики, а саме:

- усереднений коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання для системи з 3-х прозорих шиб без селективного покриття досягає 0,654;
- усереднений коефіцієнт пропускання неполяризованого випромінювання із селективним покриттям в системі із 5-ти шиб становить 0,341;
- усереднена поглинальна здатність ТФГСК з селективним покриттям в системі з 5-ти шиб знаходилось в межах від 0,204 до 0,082.

3. На основі опрацювання статистичних даних, отримано графічні та аналітичні залежності для розрахунку сумарної річної сонячної радіації, що надходить на вертикальні фасади будівель і споруд, залежно від географічної широти та орієнтації фасаду відносно сторін світу, а також, запропоновано рівняння коефіцієнта перерахунку для  $i$ -ої години доби, що входять в основу теоретичного розрахунку температури довкілля ( $i$ -тої години  $j$ -місяця) та енергопродуктивності ТФГСК.

4. На підставі результатів експериментальних досліджень отримано рівняння для визначення теплової та електричної ефективності розробленої конструкції

ТФГСК в залежності від: відстані на якій розташовується ФСК відносно площини тильної сторони теплопоглинача ТСК в конструкції ТФГСК; інтенсивності імітованого потоку, що випромінює джерело; кута між сприймаючою поверхнею ТФГСК та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині ТФГСК; швидкості вітру; кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку вітрового потоку у вертикальній площині ТФГСК (кут надходження вітрового потоку); кута між сприймаючою поверхнею та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині ТФГСК, що дало змогу розрахувати теплову та електричну ефективність від зазначених факторів.

5. Експериментально встановлено, що за швидкості вітру від 2 м/с до 4,5 м/с включно, енергетична ефективність ТФГСК без селективного покриття в частині генерування теплової енергії зменшується в середньому на 7 %, а за швидкостей більше 4,5 м/с – на 6 %, тоді як за наявності селективного покриття – на 3,5 % та 6 % відповідно, що дало змогу стверджувати про кращу стійкість конструкції ТФГСК із селективним покриттям до малих швидкостей вітру.

6. Експериментально визначено, що: коефіцієнт повної теплопередачі теплових втрат ТФГСК без селективного покриття становить  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , а за наявності селективного покриття –  $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ; усереднений коефіцієнт відведення теплової енергії для ТФГСК без селективного покриття на 20 % менший, ніж для колектора з селективним покриттям.

7. Показано, що вплив освітленості в приміщенні під час застосування ТФГСК з селективним покриттям інтегрованого в світлопрозорий фасад будівлі залежить від проценту затінення площі ТФГСК з тильної сторони площею ФСК та кута повороту вертикального ролета ТФГСК і відповідає нормованому коефіцієнту природнього освітлення.

8. Розроблено методику та алгоритм розрахунку системи сонячного енергопостачання із тепловим та фотоелектричним гібридним сонячним колектором як частини світлопрозорого фасаду будівлі, що дає змогу розрахувати необхідну площу світлопрозорого фасаду відповідно до споживчого навантаження, а також врахувати коефіцієнт природнього освітлення для забезпечення

мікрокліматичних умов в приміщенні. Вдосконалена методика розрахунку дає можливість визначити необхідний об'єм баку-акумулятора для системи сонячного енергопостачання з тепловим та фотоелектричним гібридним сонячним колектором, залежно від повного коефіцієнта теплопередачі теплових втрат та оптичних характеристик гібридного сонячного колектора.

9. Обґрунтовано енергетичну ефективність запропонованої конструкції ТФГСК в геліосистемі за допомогою отриманих графічних залежностей коефіцієнта заміщення сонячної енергії в покритті теплового навантаження для однородинного сімейного будинку залежно від співвідношення площі абсорбера ТФГСК до площі забудови. Також, розроблено номограму визначення коефіцієнта заміщення сонячної енергії для СГВП в ССЕП із конструкцією ТФГСК для багатоповерхової громадської будівлі.

10. Описано практичні рекомендації застосування запропонованої геліосистеми інтегрованої в світлопрозорі фасади будівель із описом принципу її роботи та розроблено схемне рішення ССЕП із ТФГСК під час нового будівництва або реконструкції цивільної споруди. Крім цього, отримані результати дисертаційних досліджень впроваджено під час виконання науково-дослідних робіт кафедри, а також на підприємствах компаніями ТОВ «Техноклас» та ТОВ «Оазис Комфорт».

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Авезов, Р. Р., Авезова, Н. Р., Рахимов, Э. Ю. (2016). Тепловая модель плоского солнечного водонагревательного коллектора. *Альтернативная энергетика и экология*, 23-24(211-212), 12-20.  
doi: 10.15518/isjaee.2016.23-24.012-020
2. Авезов, Р. Р., Барский-Зорин, М. А., Васильева, И. М. (1990). *Системы солнечного тепло- и хладоснабжения*. Москва: Стройиздат.
3. Адлер, Ю. П., Маркова Е. В., Грановский, Ю. В. (1976). *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва: Наука.
4. Батунер, Л. М., Позин, М. Е. (1963). *Математические методы в химической технике*. Ленинград: Гос.науч.-техн. изд. химической литературы.
5. Батухтин, С. Г. (2018). *Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения за счет использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии*. (Дис. канд. техн. наук). Забайкальский государственный университет, Чита.
6. Бекман, У., Клейн, С., Даффи, Дж. (1982). *Расчет системы солнечного теплоснабжения*. М.: Энергоиздат.
7. Беспалова, Ж. И., Клушин, В. А., Кудрявцев, Ю. Д. (2010). Наноструктурированные материалы как селективные покрытия. *Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки*, 6, 114-116. ISSN 0321-2653
8. Божко, І. К. (2017). *Комбінована теплонасосна система теплопостачання на основі ґрунтових теплообмінників*. (Дис. канд. техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.
9. Божко, К. М. (2016). *Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Технічний Університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

10. Бродач, М., Шилкин, Н. (2015). Стекланные двойные фасады. *Здание высоких технологий*, 32-46. Retrieved from <https://issuu.com/>
11. Буджак, Я. С., Єрохов, В. Ю., Мельник, І. І. (2011). Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 4/8(52), 24-29.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2011\\_4%288%29\\_\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2011_4%288%29__8)
12. Будько, В. І. (2015). *Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії*. Київ: ЮНІДО.
13. Василюха, Х. В. (2017). *Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Університет «Львівська політехніка», Львів.
14. Венгрин, І. (2019). Дослідження сонячних колекторів, інтегрованих в конструкцію скляного фасаду будівлі/споруди: необхідність та особливості. *Theory and Building Practice*, 1(1), 38-46.  
doi: 10.23939/jtbp2019.01.038
15. Венгрин, І. І. (2014). *Перспективи використання систем сонячного теплопостачання на території України*, 72-а студентська науково-технічна конференція. Львів.
16. Венгрин, І. І. (2015). *Ефективність використання комбінованих систем сонячного теплопостачання для будівель на території України*, 73-тя студентська науково-технічна конференція. Львів.
17. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Сонячний потенціал в Україні*, Міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів «Інновації в будівництві». Луцьк.
18. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Возняк, О. Т., Касинець, М. Є., Фурдас, Ю. В. (2020). Патент України 143415. Київ: Державне патентне відомство України.

19. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Желих, В. М., Шепітчак, В. Б. (2020). *Дослідження енергетичних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектору*, Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія». Київ.
20. Венгрин, І., Шаповал, С. (2019). Інтенсивність сонячної радіації у місті Львові. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, 12, 77-84.  
doi: 10.32347/2310-0516.2019.12.77-84
21. Винарский, М. С., Лурье М. В. (1975). *Планирование эксперимента в технологических исследованиях*. К.: Техніка.
22. Вілінський, О. О., Цибульський, Л. Ю. (2017). *Термоелектричний перетворювач сонячного випромінювання в електроенергію*, Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: ФЕЛ.
23. Возняк, О. Т., Шаповал, С. П., Пона, О. М., Венгрин, І. І. (2014). Влияние направления и скорости воздушного потока на работу солнечного коллектора без прозрачного покрытия. *Строительство и техногенная безопасность*, 50, 49-52.
24. Возняк, О. Т., Желих, В. М. (2003). *Основи наукових досліджень у будівництві*. Львів: НУ «Львівська політехніка».
25. Воронов, Г. К., Саввова, О. В., Смирнова, Ю. О., Фесенко, О. І. (2020). *Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Технології виробництва скломатеріалів»*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.  
<http://eprints.kname.edu.ua/55722/1/2020%20печ.%20110M.pdf>
26. Воскресенська, С. М. (2012). *Моделювання потоків відбитих і заломлених сонячних променів при рівномірному розподілі енергії стосовно створення фотоелектричних систем*. (Дис. канд. техн. наук). Національна Академія природоохоронного та курортного будівництва, Сімферополь.

27. Габа, К. О. (2016). *Підвищення ефективності систем теплопостачання модифікацією теплоносія*. (Дис. канд. техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.
28. ГКД 34.02.305-2002. (2002). *Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення*. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ».
29. ГОСТ 28310-89. (1990). *Коллекторы солнечные*. Москва: Издательство стандартов.
30. ГОСТ 28976-91. (2004). *Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния*. Москва: Издательство стандартов.
31. Гусев, А. А., Винников, Д. В., Велигорский, А. А. (2016). Сравнительный анализ повышающих преобразователей для интеграции фотоэлектрических панелей в сеть. *Энергосбережение. Энергетика. энергоаудит*, 5(148), 22-28.
32. Даффи, Дж., Бекман, У. (1977). *Тепловые процессы с использованием солнечной энергии*. М.: Мир.
33. ДБН В.2.5-28:2018. (2018). *Природне і штучне освітлення*. Київ: Мінрегіон України.
34. ДБН В.2.5-64-2012. (2013). *Внутрішній водопровід та каналізація*. Київ: Мінрегіон України.
35. ДБН В.2.6-31:2016. (2017). *Теплова ізоляція будівель*. Київ: Мінрегіон України.
36. ДБН В.2.6-33:2008. (2009). *Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації*. Київ: Мінрегіонбуд України.
37. ДБН Д.2.3-99. (2011). *Ресурсні елементні кошторисні норми на монтаж устаткування*. Київ: Мінрегіон України.
38. Детлаф, А. А., Яворский, Б. М., Милковская, М. Б. (1979). *Курс физики. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика*. М.: Высшая школа.

39. ДСТУ 3440-96. (1997). *Системи енергетичні. Терміни та визначення*. Київ: Держстандарт України.
40. ДСТУ 4034-2001. (2001). *Енергозбереження. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Колектори сонячні плоскі. методи випробовування*. Київ: Держстандарт України.
41. ДСТУ Б В.2.6-100:2010. (2010). *Конструкції будинків і споруд. Методи визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій*. Мінрегіонбуд України, Київ.
42. ДСТУ Б В.2.7-115-2002. (2002). *Скло з низькоемісійним твердим покриттям. Технічні умови*. Київ: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України.
43. ДСТУ Б В.2.7-122:2009. (2010). *Скло листове. Технічні умови*. Київ: Мінрегіонбуд України.
44. ДСТУ Б EN 1279-5:2013. (2014). *Скло для будівництва. Склопакети. Частина 5: Оцінка відповідності*. Мінрегіон України, Київ.
45. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. (2011). *Будівельна кліматологія*. Київ: Мінрегіонбуд України.
46. ДСТУ-Н Б В.2.2-27:2010. (2010). *Будинки і споруди. Настанова з розрахунку інсоляції об'єктів цивільного призначення*. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, Київ.
47. ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010. (2010). *Інженерне обладнання будинків і споруд. Настанова з улаштування систем сонячного теплопостачання в будинках житлового і громадського призначення*. Мінрегіонбуд України, Київ.
48. ДСТУ-Н Б В.2.6.-83:2009. (2009). *Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування світлопрозорих елементів огорожувальних конструкцій*. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, Київ.
49. ДСТУ ISO 9806-1:2005. (2008). *Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини*. Держспоживстандарт, Київ.



50. ДСТУ ISO 9806-2:2005. (2008). *Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 2. Кваліфікаційні випробування*. Держспоживстандарт, Київ.
51. ДСТУ ISO 9806-3:2005. (2008). *Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскленних сонячних колекторів для нагрівання рідини*. Держспоживстандарт, Київ.
52. Желих, В. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Касинець, М. Є., Козак, Х. Р., Пашкевич, В. З. (2018). Системи сонячного теплопостачання інтегровані в світлопрозорі фасади будівель. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 26, 62-68.  
[doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26.62-68](https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26.62-68)
53. Желих, В. М., Омельчук, О. В., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 823, 117-121.
54. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал променистої енергії в Україні та її використання для низькотемпературних сонячних колекторів*, 3-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». Львів.
55. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). *Вплив термічного опору зовнішнього захищення на кількість тепла від сонячної радіації, що надходить в приміщення*, Збірник наукових праць 8-ої МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.
56. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Патент України 98778. Київ: Державне патентне відомство України.
57. Запривода, В. І. (2002). *Геометричне моделювання надходження сонячної радіації на поверхні просторових покриттів архітектурних об'єктів*. (Дис. канд. техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.

58. Зіміна, О. С. (2013). Нові технології в дизайні індустріальних фасадів. *Архітектурний вісник КНУБА*, 1, 315-322.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/avk\\_2013\\_1\\_46](http://nbuv.gov.ua/UJRN/avk_2013_1_46)
59. Золотько, К. Є. (1998). *Розробка методик розрахунку та вибір раціональних параметрів систем теплопостачання з плоскими сонячними колекторами*. (Дис. канд. техн. наук). Державна Металургійна Академія України, Дніпропетровськ.
60. Каплун, В. В., Кравченко, О. П., Манойлов, Е. Г. (2016). Оцінювання рівнів генерації електричної енергії сонячною батареєю на основі статистичних даних. *Вісник КНУТД. Технічні науки*, 6(104), 26-33.
61. Климко, В. І. (2016). *Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Університет «Львівська політехніка», Львів.
62. Кожем'яко, В. П., Домбровський, О. Г., Жердецький, В. Ф., Маліновський, В. І., Пригуляк, Г. В. (2011). Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 2, 142-157.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet\\_2011\\_2\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_20)
63. Кожем'яко, В. П., Маліновський, В. І., Ярославський, Я. І. (2013). Застосування технологій фотоелектричних перетворювачів в моделі інформаційних мереж із розподіленими джерелами енергії. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 2, 96-108.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet\\_2013\\_2\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2013_2_20)
64. Козак, Д. В. (2018). *Теплотехнічні характеристики комбінованого сонячного колектора на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Технічний Університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.
65. Козак, Х. Р. (2017). *Забезпечення теплового стану в приміщеннях системами сонячного повітряного опалення*. (Дис. канд.техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.

66. Козюков, Д. А., Ціганков Б. К. (2015). Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MATLAB/SIMULINK. *Научный журнал КубГАУ*, 112(08), 1577-1593.
67. Колесник, Є. С. (2011). Забезпечення енергоефективності цивільних будинків зі світлопрозорими фасадними конструкціями. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 10(1), 148-154.
68. Коробка, С. В. (2016). *Обґрунтування параметрів та режимів роботи геліосушарки фруктів*. (Дис. канд. техн. наук). Львівський Національний Аграрний Університет, Львів.
69. Коробка, С. В., Сиротюк, С. В., Журавель, Д. П., Болтянский, Б. В., Болтянская, Л. А. (2021). Гелиосушилка с интегрированным энергетическим блоком. *Проблемы региональной энергетики*, 2(50), 60-75. doi:10.52254/1857-0070.2021.2-50
70. Кувшинов, В. В. (2013). Методи розрахунку і підвищення ефективності використання теплофотоелектричних установок. *Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості*, 3, 166-171.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu\\_2013\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu_2013_3_25)
71. Лабай, В. Й. (2004). *Тепломасообмін: підручник для ВНЗ*. Львів: Тріада Плюс.
72. Ландсберг, Г. (Ред.). (2001). *Элементарный учебник физики*. (Т. III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика) (12-те вид.). М.: Физматлит.
73. Левченко, С. А. (2009). *Засоби підвищення ефективності комбінованої геліосистеми гарячого водопостачання*. (Дис. канд. техн. наук). Інститут Відновлюваної Енергетики НАН України, Київ.
74. Лосик, М. В., Звір, О. М. (2018). *Технологічні та фізико-хімічні властивості скла*. Львів: ЛНАМ.  
<https://lnam.edu.ua/files/Academy/faculty/dpm/glass/pdf/Alumni/Технологічні-та-фізико-хімічні-властивості-скла.pdf>

75. Мартыненко, О. Г. (Ред.). (1987). *Справочник по теплообменникам*. Том 1-2. М.: Энергоатомиздат.
76. Мартинов, В. Л. (2015). *Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми*. (Дис. канд.техн. наук). Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.
77. Меляков, И. Н., Пантелеев, В. П. (2012). *Введение в солнечные установки*. Б.: «Алтын Принт».
78. Мочерний, С. В. (2005). *Основи підприємницької діяльності*. Київ: Академія.
79. Накашидзе, Л. В., Шевченко, М. В. (2017). Геліоколектор-енергоактивне огороження як елемент системи кліматизації споруд. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*, 99, 127-135.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek\\_2017\\_99\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2017_99_19)
80. Недбайло, О. М. (2018). *Теплофізичні аспекти підвищення ефективності будівлі при використанні низькотемпературних систем її теплозабезпечення та термомодернізації огорожувальних конструкцій*. (Дис. канд. техн. наук). Інститут Технічної Теплофізики НАН України, Київ.
81. Новаківський, Є. В. (2004). *Підвищення ефективності використання сонячної енергії в комбінованих системах промислового теплопостачання*. (Дис. канд. техн. наук). Одеський Національний Політехнічний Університет, Одеса.
82. Новаковский, Е. В., Денисова, А. Е., Мазуренко, А. С. (2003). Анализ эффективности солнечных коллекторов типа «дельта-система» для альтернативных систем теплоснабжения. *Экотехнологии и ресурсосбережение : научно-технический журнал*, 6, 14-17.
83. Одунламі, Т. А. О. (2007). *Удосконалення систем опалення шляхом використання пасивного сонячного теплонадходження*. (Дис. канд. техн. наук). Харківський Державний Технічний Університет будівництва та архітектури, Харків.

84. Пасічник, П. О. (2016). *Система теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем*. (Дис. канд. техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.
85. Пешехонов, Н. И. (1982). *Проектирование теплоснабжения*. Київ: Вища школа.
86. Племянніков, М. М., Яценко, А. П., Пилипенко, І. В., Корнілович, Б. Ю. (2018). *Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.  
Retrieved from <https://htks.kpi.ua/files/Books/Glass.pdf>
87. Погорелов, А. І. (2004). *Тепломасообмін. Основи теорії і розрахунку*. Л.: Новий світ.
88. Пона, О. М. (2018). *Підвищення ефективності комбінованої системи теплопостачання з геліопокрівлею*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Університет «Львівська політехніка», Львів.
89. Пона, О. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Підвищення енергоефективності покриття будівель*, Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва». Полтава.
90. Приймак, А. В. (1990). *Гелиосистема теплоснабжения с воздушным коллектором солнечной энергии матричного типа*. (Дис. канд. техн. наук). Киевский Инженерно-Строительный Институт, Киев.
91. Приймак, О. В., Пасічник, П. О. (2016). Дослідження тепловіддачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна. *Вісник Київського Національного Університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*, 1, 85-91.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd_2016_1_12)
92. Пуховий, І. І. (2009). *Тепло- та холодопостачання будівель з використанням енергії сонця і довкілля*. (Дис. докт. техн. наук). Одеський національний політехнічний університет, Одеса.

93. Редько, А. О., Безродний, М. Н., Загорученко, М. В., Редько, О. Ф., Ратушняк, Г. С., Хмельнюк, М. І. (2016). *Низькопотенціальна енергетика*. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».
94. Редько, А. О., Компан, А. І., Павловський, С. В., Редько, О. Ф., Поволочко, В. Б. (2013). Підвищення ефективності теплоутилізаційних енергетичних установок. *Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 755, 350-356.
95. *Рекомендации по расчёту светопрозрачных конструкций зданий с учётом светотехнических, теплотехнических, звукоизоляционных качеств и технико-экономических показателей*. (1986). Москва: Стройиздат.
96. Сабірзянов, Т. Г., Кубкін, М. В., Солдатенко, В. П., Козловський, О. А. (2012). Математична модель фотобатарей як джерела електричної енергії. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 25 (I), 331-335.
97. Сапожник, Г.В. (2017). *Опорний конспект лекцій з дисципліни «Основи охорони праці» для студентів за 7 освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр»*. Тернопіль: ТНЕУ.
98. Сарнацкий, Э. В., Чистович, С. А. (Ред.). (1990). *Системы солнечного тепло- и хладоснабжения*. М.: Стройиздат.
99. Сергейчук, О. В. (2008). *Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків*. (Дис. канд. техн. наук). Київський Національний Університет будівництва і архітектури, Київ.
100. Склянюк А., Кучер А. (2011). *Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії*, Матеріали IV Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання. Електротехніка, електроніка та світлотехніка. Т.: ТНТУ, 1, 275.  
Retrieved from <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/9975>
101. Столярчук, П., Микійчук, Б., Яцук, В., Шпак, О. (2014). Оптимізація методики контролю якості сонячних колекторів. *Вимірвальна*

*техніка та метрологія*, 75, 119-124.

Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog\\_2014\\_75\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2014_75_26)

102. Суржик, О. М. (2016). *Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами*. (Дис. канд. техн. наук). Національна Академія Наук України Інститут Відновлюваної Енергетики, Київ.
103. Тугов, Н. М., Глебов, Б. А., Чарыков, Н. А. (1990). *Полупроводниковые приборы*. М.: Энергоатомиздат.
104. Фаренбрух, А., Бьюб, Р., Колтун, М. М. (Ред.). (1987). *Солнечные элементы. Теория и эксперимент*. Москва: Энергоатомиздат.
105. Фаренюк, Є. Г. (2015). *Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатопверхових будівель*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Університет водного господарства та природокористування, Рівне.
106. Филенко, В. В. (2015). До питання визначення дійсних геліоенергетичних ресурсів. *Проблемы машиностроения*, 18(1), 67-72.  
Retrieved from <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/81042>
107. Фреїк, Д. М., Чобанюк, В. М., Галушак, М. О., Криницький, О. С., Матеїк, Г. Д. (2012). Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку. *Фізика і хімія твердого тіла*, 13(1), 7-20.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT\\_2012\\_13\\_1\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2012_13_1_3)
108. Фрид, С. Е. (1988). *Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов*. Москва: ИВТАН АН СССР.
109. Хавкун, Г. М. (2013). Застосування сонцезахисних пристроїв в будинках з прямим сонячним обігрівом. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*, 32, 550-558.
110. Харченко, В. В., Никитин, Б. А., Беленов, А. Т., Тихонов, П. В. (2014). Повышение эффективности энергетических установок на базе тепловых фотоэлектрических модулей. *Науковий вісник Національного*

*університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, 194(3), 45-51.

Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu\\_tech\\_2014\\_194%283%29\\_\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_tech_2014_194%283%29__9)

111. Харченко, Н. В. (1991). *Индивидуальные солнечные установки*. М.: Энергоатомиздат.
112. Хотін, С. Ю. (2001). *Розробка і дослідження концентруючого колектора з вакуумованими теплоприймачами*. (Дис. канд. техн. наук). Інституту Електродинаміки НАН України, Київ.
113. Черваков, О. В., Андріянова, М. В. (2016). *Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічної технології. 6.051301-Хімічна технологія*. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ.
114. Шаповал, С. П. (2010). Патент України 53370. Київ: ДП «Український інститут промислової власності».
115. Шаповал, С. П. (2011). *Комбінована система теплопостачання із потрійно-орієнтованими сонячними колекторами та термоаккумуляцією*. (Дис. канд. техн. наук). Національний Університет «Львівська політехніка», Львів.
116. Шаповал, С. П. (2019). *Системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову*. (Дис. докт. техн. наук). Національний Університет «Львівська політехніка», Львів.
117. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Аспекти використання традиційних та нетрадиційних джерел енергії на території України. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 2, 155-160.
118. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Перспективи використання сонячної енергії на території України. *Молодий вчений*, 7(10), 21-24.
119. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал вітрової енергії на території України*, Матеріали XI міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасність. Наука. Час. Взаємодія та взаємовплив». Київ.
120. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Венгрин, І. І. (2017). *Застосування*



геліовікна для сонячного теплопостачання, 9-та МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.

121. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Юркевич, Ю. С., Венгрин, І. І., Козак, Х. Р. (2020). Патент України 143997. Київ: Державне патентне відомство України.
122. Яковчук, П. Є., Цяпа, В. Б., Комаров, В. І. (2006). Сонячна енергетика. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 563, 211-218.
123. Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M., Sachit, F. I. A. (2019). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107-141.  
Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/287241394.pdf>
124. Agrawal, Sh., Jain, A. (2018). Sustainable deployment of solar irrigation pumps: Key determinants and strategies. *WIREs Energy Environ*, 8(2), 325.  
doi: 10.1002/wene.325  
<https://www.ceew.in/sites/default/files/Agrawal-Jain-2018-Sustainable-solar-irrigation.pdf>
125. Akhatov, J. S., Yuldashev, I. A., Halimov, A. S. (2015). Study of thermal-technical parameters and experimental investigations on PV-Thermal collector. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology (IJEART)*, 1(1), 71-75. Retrieved from [www.ijeart.com](http://www.ijeart.com)
126. Andrews, J.W. (1981). Evaluation of flat-plate photovoltaic/thermal hybrid systems for solar energy utilization. *Heating and Cooling-Research and Development*. The Solar Technology Group at Brookhaven National Laboratory.
127. Assoa, Y. B., Menezo, C., Yezou, R., Fraisse, G., Lefebvre, T. (2005). *Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector*, International Conference «Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment». Santorini, Greece.

128. Beckman, W. A., Duffie J. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: Hoboken. doi: 10.1002/9781118671603
129. Bondarchuk, A. (2019). Study into predicted efficiency of the application of hybrid solar collectors to supply energy to multiapartment buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8(100), 69-77. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174502
130. Bonnaud, O. (2021). Skills in Physics and Semiconductor Devices: A Global Challenge for Digital Society. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 9, 2936-2946. doi: 10.4236/jamp.2021.911187
131. Buker, M. S., Riffat, S. (2015). Building integrated solar thermal collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 327-346. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.009
132. Bülow-Hübe, H. (2001). *Energy-efficient window systems. Effects on energy use and daylight in buildings*. (Doctoral dissertation). Lund University, Lund Institute of Technology, Division of Energy and Building Design, Sweden.
133. Cachafeiroa, H., Arevaloa, L. F., Vinuesaa, R., Goikoetxeab, J., Barrigab, J. (2015). *Impact of solar selective coating ageing on energy cost*, *International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. Solar PACES, Energy Procedia. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.034
134. Calise, F., Figaj, R. D., Vanoli, L. (2017). Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector. *Energies*, 10(4), 1-21. doi: 10.3390/en10040491
135. Chan, D.S.H., Phang, J.C.H. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. *IEEE Trans on Electron Devices*, 34, 286-293. doi: 10.1109/T-ED.1987.22920
136. Chegaar, M., Hamzaoui, A., Namoda, A., Petit, P., Aillerie, M., Herguth, A. (2013). Effect of illumination intensity on solar cells parameters. *Energy Procedia*, 36, 722-729. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.084
137. Dean, J., McNutt, P., Lisell, L., Burch, J., Jones, D., Heinicke, D. (2015). *Photovoltaic-thermal new technology demonstration*. U.S. General Services

- Administration: National Renewable Energy Laboratory. doi: 10.2172/1170335.
138. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., Singh, S. (2020). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 33-54.  
Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s40095-019-00327-y>
139. Fosdick, J. (2016). Passive Solar Heating. *Whole Building Design Guide*. Retrieved from [www.wbdg.org/resources/passive-solar-heating](http://www.wbdg.org/resources/passive-solar-heating).
140. Gomes, J. S. L. C. (2021). *Development of Concentrating Photovoltaic-Thermal Solar Collectors*. (Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy). Gävle: Gävle University Press.
141. ISO 9060:1990. (1990). *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. New Zealand: ISO Standard.
142. ISO 9459-1:1993. (1993). *Solar heating – Domestic water heating systems – Part 1: Performance rating procedure using indoor test methods*. American National Standards Institute.
143. ISO 9806-2:1995. (1995). *Test methods for solar collectors – Part 2 : Qualification test procedures*. International Standard published.
144. ISO 9806-3:1995. (1995). *Test methods for solar collectors – Part 3 : Thermal performance of unglazed liquid heating collectors (sensible heat transfer only) including pressure drop*. International Standard published.
145. Kalogirou, S.A., Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1259-1270. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.11.003
146. Katalog produktów. Hydronic solution. (2016). Caleffi S.P.A. Italy: Fontaneto d'Agogna (NO).
147. Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, B., Tabet, H., Cheikh, B., Hocine, E., Haloui, H. (2015). Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal (PVT). *Energy proceeding*, 74, 835-843. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.819

148. Korobka, S., Tolstushko, N., Zaharchuk, V., Tolstushko, M. (2018). Exergy analysis of the operation of a solar dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/8(92), 4-11. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126290
149. Lamnatou, Chr., Notton, G., Chemisana, D., Cristofari, C. (2020). Storage systems for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: Environmental profile and other aspects. *Science of The Total Environment*, 699.  
doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134269
150. Luque, A., Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (2<sup>nd</sup> edition). England: John Wiley & Sons Ltd.
151. Marken, C., Woodruff, V. (2012). *Solar heating installer resource guide*. NABCEP. Retrieved from [www.nabcep.org](http://www.nabcep.org)
152. Martynyak-Andrushko, M., Kuznetsova, M. (2017). Method of determination the efficiency of work centralized heating system. *Journal of New Technology in Environmental Science*, 1(2), 68-73.
153. Maruchchak, U., Poznyak, O., Soltysik, R., Prots, Y. (2019). Optimization of parameters of window structures. *Theory and Building Practice*, 1(2), 30-36. doi: 10.23939/jtbp2019.02.030
154. Mortezapour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., Minaeii S. (2012). Performance analysis of a two-way hybrid photovoltaic/thermal solar collector. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 767-780.
155. Murdoch, J. B., Goldsbury, C J, Harrold, R. M. (1996). *IESNA lighting ready reference: a compendium of vision & optical control, light source tables, illuminance recommendations, calculation data, energy management considerations, cost analysis methods, selection procedures, definitions*. New York: Illuminating Engineering Society of North America.  
Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/iesna-lighting-education-fundamental-level/oclc/30088507>
156. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., Kovalenko, T. (2017). Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and

- experimental research. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 3/8(87), 26-32. doi: 10.15587/1729-4061.2017.103853
157. Nguyen, K.-B., Yoon, S.-H., Choi, J. H. (2012). Effect of working-fluid filling ratio and cooling-water flow rate on the performance of solar collector with closed-loop oscillating heat pipe. *Journal of mechanical science and technology*, 26(1), 251-258. doi: 10.1007/s12206-011-1005-8
158. Nikolić, D., Skerlić, J., Cvetković, D., Radulović, J., Jovanović, S. (2018). *Basic principles of passive solar heating, 3<sup>rd</sup> International conference on Quality of Life, November 2018*. University of Kragujevac: Center for Quality. Retrieved from [http://cqm.rs/2018/cd1/pdf/papers/focus\\_1/32.pdf](http://cqm.rs/2018/cd1/pdf/papers/focus_1/32.pdf)
159. *Passive Solar Heating & Cooling Manual*. (1980). Western SUN Arizona and Western Solar Utilization Network: Rodale Press, Inc. Retrieved from <https://www.solaripedia.com/files/862.pdf>
160. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N. (2017). Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. *Briefing paper*, 22. doi: 10.13140/RG.2.2.10473.29280
161. Ramos, F., Cardoso, A., Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477-484. doi: 10.1007/978-3-642-11628-5\_53
162. Said, Z., Alshehhi, A. A., Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779-789. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.075
163. Salvi, S. S., Bhalla, V., Taylor, R. A., Khullar, V., Otanicar, T. P., Phelan, P. E. (2018). Technological advances to maximize solar collector energy output: A Review. *Journal of Electronic Packaging*, 140 (4), 040802-1-21. doi: 10.1115/1.4041219
164. Savić, J., Durić-Mijović, D., Bogdanović, V. (2013). Architectural glass: types, performance and legislation. *Architecture and Civil Engineering*, 11(1), 35-45. doi: 10.2298/FUACE1301035S

165. Selvakumar, N., Barshilia, H., Rajam, K. S. (2010). *Review of sputter deposited mid- to high- temperature solar selective coatings for flat plate/evacuated tube collectors and solar thermal power generation applications*. NAL Project Document SE.
166. Shapoval, S., Venhryn, I., Kozak, K., Klymenko, H. (2021). Clarification of thermal characteristics of the solar collector integrated into transparent facade. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 100, 402-408.  
doi:10.1007/978-3-030-57340-9\_49
167. Shapoval, S., Zhelykh, V., Gulai, B., Venhryn, I., Shepitchak, V. (2018). Energy efficiency of heating systems using solar windows. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 7, 65-70.  
doi: 10.17512/bozpe.2018.2.08
168. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K. (2020). Simulation of thermal processes in the solar collector which is combined with external fence of an energy efficient house. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, 510-517.  
doi:10.1007/978-3-030-27011-7\_65
169. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, Kh., Krygul, R. (2019). Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy efficient house. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/8(98), 38-46. doi:10.15587/1729-4061.2019.160882
170. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Myroniuk, K., Gensetskyi, M. (2020). Examination of the thermal efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Theory and Building Practice*, 2(1), 30-37.  
doi:10.23939/jtbp2020.01.030
171. Shek, R., Said, Z., Issa, S. (2020). Performance evaluation and life cycle analysis of new solar thermal absorption air conditioning system. *Energy Reports*, 6, 673-679.  
doi: 10.1016/j.egy.2019.11.136
172. Siegel, R., Howell, J.R. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer* (7th edn). New York, USA: Taylor and Francis.

173. Smith, C. C., Wiess, T. A. (1977). Design application of the Hottel-Whillier-Bliss-Equation. *Solar Energy*, 19, 109-113.
174. Sobolewski G. (2007). USA Patent № 7616014. Cleveland, OH: Keithley Instruments, Inc.
175. Tabor, H. Z. (1959). Patent №US2917817A. Jerusalem, Israel: United States Patent. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US2917817A/en>
176. Tabor, H. Z. (1964). Patent №US3129703A. Jerusalem, Israel: Attorney United States Patent Office. <https://patents.google.com/patent/US3129703A/en>
177. Tanvi, P., Taylor, H. (2015). *Performance evaluation of a solar collector design developed for low temperature water heating systems*. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management.
178. Trinkl, C., Zörner, W., Alt, C., Stadler, Ch. (2005). *Performance of vacuum tube and flat plate collectors concerning domestic hot water preparation and room heating, 2<sup>nd</sup> European Solar Thermal Energy Conference 2005*. Freiburg, Germany.  
<http://www.sintsolar.com.ua/info/theory-ua/coatings-absorbing-panels-ua.html>
179. Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, 81(9), 1117-1131.  
doi: 10.1016/j.solener.2007.04.002
180. Ulewicz, M., Zhelyh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 844, 352-355.  
Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB\\_2016\\_844\\_55](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2016_844_55)
181. Ulewicz, M., Zhelykh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). *Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation*, Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «ЕкоКомфорт». Львів: НУ «Львівська політехніка».
182. Vengryn, I., Shapoval, S., Furdas, Y., Kasynets, M., Piznak, B. (2020). Thermal

- efficiency analysis of solar heat supply unit combined with glass facade of building. *Energy engineering and control systems*, 6(1), 1-6. doi:10.23939/jeeecs2020.01.001
183. Venhryn, I., Zhelykh, V., Shapoval, S. (2020). *Thermal efficiency of the solar collector integrated into translucent facade*, VI Międzynarodowa Konferencja «Innowacyjne pomysły młodych naukowców. Przemysł: Nauka-Startup».
184. Voznyak, O., Shapoval, S., Pona, O., Vengryn, I. Combined solar collector (2014). *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 781, 212-215.
185. Waldor, J. (1961). U.S. Patent No. 3012294. Washington, DC: U.S. Patent Office.
186. Wright, R. T., Boorse, D. F. (2011). *Environmental science. Toward a sustainable future*. 11th (16). Boston: Benjamin Cummings.
187. Zhang, X., Shen, J., Tang, L., Yang, T., Xia, L., Hong, Z., Wang, L., Wu, Y., Shi, Y., Xu, P., Liu, S. (2015). Building integrated solar thermal (BIST) technologies and their applications: A review of structural design and architectural integration. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 5 (5). doi:10.4172/20904541.1000182.
188. Zhelykh, V., Kapalo, P., Shapoval, S., Venhryn, I., Kozak, K. (2019). Experimental determination of the efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Journal of Civil Engineering*, 14(2), 31-38. doi:10.1515/sspjce-2019-0015
189. Zhelykh, V., Kasynets, M., Myroniuk, K., Marushchak, U., Gulai, B. (2021). Energy efficient solar heat supply systems for buildings and structures. *Theory and Building Practice*, 3(1), 137-142. doi: 10.23939/jtbp2021.01.137
190. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Shapoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84-87. doi:10.30657/pea.2020.26.17



## ДОДАТКИ

## Додаток А

**Прилади, що було використано в експериментальних дослідженнях  
та їх похибки**

<b>№ п/п</b>	<b>Назва вимірюваної величини</b>	<b>Назва приладу</b>	<b>Абсолютна похибка</b>
1	Інтенсивність теплового випромінювання	Актинометр SM206 Digital Solar Power Meter	$\pm 10 \text{ Вт/м}^2$
2	Температура повітря біля експериментальної установки	Датчики опору ТМ-2А	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
3	Температура теплоносія	Датчики опору ТМ-2А	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
4	Температура на поверхні ФСК	UNI-T UT300C	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
5	Швидкість вітру	TESTO 405 – V1	$\pm 0,5 \text{ м/с}$
6	Сила струму	UNI-T M830B	$\pm 0,05 \text{ А}$
7	Напруга	UNI-T M830B	$\pm 0,1 \text{ В}$
8	Освітленість, що надходила на поверхню ФСК	DER EE DE-3350	$\pm 5 \text{ лк}$
9	Оптична щільність інфрачервоного випромінювання	LS122A IR Power Meter	$\pm 4\%$

### Статистичне опрацювання результатів експериментальних досліджень

Під час проведення експериментів кожен дослід проводився тричі, при однакових умовах, для того, щоб можна було оцінити похибки. Під час кожного досліді отримувались значення функції відгуку, які усереднювались [3, 4, 24].

Перевірку рівності усереднених значень було здійснено за допомогою критерію Стюдента за формулою (А.1):

$$\frac{\overline{y_i} - \overline{y_{\text{cp}}}}{s} \leq t_{\text{табл}} \quad (\text{А.1})$$

де  $t_{\text{табл}}$  – табличне (довідкове) значення критерію Стюдента;  $y_{\text{cp}}$  – середнє арифметичне значення результатів паралельних дослідів;  $y_i$  – результат окремого досліді;  $s$  – середня квадратична похибка.

Середнє арифметичне значення результатів паралельних дослідів можна визначити за формулою (А.2):

$$y_{\text{cp}} = \frac{\sum_1^n y_i}{n} \quad (\text{А.2})$$

де  $n$  – кількість паралельних дослідів.

Відхилення результату окремого досліді від середньоарифметичного представляють як різницю  $\overline{y_i} - \overline{y_{\text{cp}}}$ . Наявність відхилення свідчить про мінливість варіації значень паралельних дослідів. Для виміру цієї мінливості запропоновано застосувати дисперсію, що визначається як середнє значення квадрату відхилень величини від її середнього значення (А.3):

$$s^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - y_{\text{cp}})^2}{n - 1} \quad (\text{А.3})$$

де  $(n - 1)$  – число степенів вільності, рівне кількості дослідів мінус 1.

Середнє квадратичне відхилення (похибка) або стандарт визначається за формулою (А.4):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - y_{cp})^2}{n-1}} \quad (\text{A.4})$$

Однорідність дисперсій перевіряється за даними статистичних критеріїв, найпростіший з яких є критерій Фішера  $F$ , який визначається відношенням більшої дисперсії  $s_{\max}^2$  до меншої  $s_{\min}^2$  (A.5):

$$F = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2} \quad (\text{A.5})$$

Отримана величина  $F$  порівнюється із табличним значенням критерію Фішера  $F_{\text{табл}}$ . Якщо табличне значення буде меншим від значення отриманого з експерименту, то така дисперсія є неоднорідною і якась з них значно перевищує інші, що вимагає додаткової перевірки результатів вимірювань.

Для неоднорідних дисперсій, а також для певності однорідності дисперсії, використовувався критерій Кохрена  $G$ , який визначається як відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій (A.6):

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} \quad (\text{A.6})$$

Дисперсія відтворюваності визначається за формулою A.7:

$$s^2(y) = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - y_{cp})^2}{N(n-1)} \quad (\text{A.7})$$

До прикладу, наведено дані похибок щодо результатів теплової ефективності конструкції ТФГСК (Матриця М1) (табл. 1). Усереднені значення результатів відносно похибки досліду були менші за табличне значення критерію Стюдента.

Критерій Фішера становить:  $F = \frac{0,0019}{0,0001} = 19$ , для рівня значимості 0,05  $F_{\text{табл}} = 19,38$ .

Довідкове значення критерію  $F$  є більшим, ніж експериментальне ( $19 < 19,38$ ).

Критерій Кохрена:  $G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,0019}{0,0043} = 0,4419$ , а  $G_{\text{табл}} = 0,48$  для рівня

значимості 0,05. Довідкова величина критерію Кохрена більша за дослідне його значення:  $0,4419 < 0,48$ , що підтверджує гіпотезу про однорідність дисперсії, після чого її усереднювали та отримували точність експериментів:

$$s^2(y) = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - y_{cp})^2}{N(n-1)} = \frac{0,0086}{9(3-1)} = 0,0005.$$

Таблиця А.1 – Встановлення відхилень результатів теплової ефективності  $\eta_{\text{ТФГСК}}^{\text{ТЕ}}$  конструкції ТФГСК без наявності селективного покриття та ФЕ

№	$x_2$	$x_3$	Номер паралельних досліджень			$y_{cp}$	$s^2$
			№1	№2	№3		
			$y'_1$	$y''_1$	$y'''_1$		
1	900	30	0,16	0,16	0,19	0,17	0,0003
2	900	60	0,19	0,18	0,23	0,2	0,0007
3	900	90	0,21	0,2	0,25	0,22	0,0007
4	600	30	0,17	0,16	0,15	0,16	0,0001
5	600	60	0,16	0,15	0,23	0,18	0,0019
6	600	90	0,19	0,18	0,20	0,19	0,0001
7	300	30	0,12	0,11	0,10	0,11	0,0001
8	300	60	0,11	0,13	0,12	0,12	0,0001
9	300	90	0,12	0,12	0,15	0,13	0,0003

### Список публікацій здобувача опублікованих за темою дисертації

- I. Список публікацій в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
1. Sharoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, Kh., Krygul, R. (2019). Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy efficient house. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/8 (98), 38-45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160882>  
(НМБД Scopus, фахове видання України в галузі технічні науки)
  2. Sharoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K. (2020). Simulation of thermal processes in the solar collector which is combined with external fence of an energy efficient house. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, 510-517. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_65)  
(НМБД Scopus, ISSN: 2366-2557 (Швейцарія))
  3. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Sharoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26 (3), 84-87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>  
(НМБД Scopus, ISSN: 2353-5156 (Польща))
  4. Sharoval, S., Venhryn, I., Kozak, K., Klymenko, H. (2021). Clarification of thermal characteristics of the solar collector integrated into transparent facade. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 100, 402-408. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_49)  
(НМБД Scopus, ISSN: 2366-2557 (Швейцарія))
  5. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Перспективи використання сонячної енергії на території України. *Молодий вчений*, 7(10), 21-24.  
(НМБД Index Copernicus)
  6. Sharoval, S., Zhelykh, V., Gulai, B., Venhryn, I., Shepitchak, V. (2018). Energy efficiency of heating systems using solar windows. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 7, 65-70. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2018.2.08> (ISSN: 2299-8535 (Польща))

7. Zhelykh, V., Kapalo, P., Shapoval, S., Vengryn, I., Kozak, K. (2019). Experimental determination of the efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Journal of Civil Engineering*, 14(2), 31–38. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0015>  
(ISSN: 1336-9024 (Словаччина))
8. Возняк, О. Т., Шаповал, С. П., Пона, О. М., Венгрин, И. И. (2014). Влияние направления и скорости воздушного потока на работу солнечного коллектора без прозрачного покрытия. *Строительство и техногенная безопасность*, 50, 49-52.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
9. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Аспекти використання традиційних та нетрадиційних джерел енергії на території України. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 2, 155-160.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
10. Voznyak, O., Shapoval, S., Pona, O., Vengryn, I. Combined solar collector (2014). Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва, 781, 212-215.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
11. Желих, В. М., Омельчук, О. В., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 823, 117-121.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
12. Ulewicz, M., Zhelyh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 844, 352-355.  
(фахове видання України в галузі технічні науки)

13. Желих, В. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Касинець, М. Є., Козак, Х. Р., Пашкевич, В. З. (2018). Системи сонячного теплопостачання інтегровані в світлопрозорі фасади будівель. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 26, 62-68.  
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26.62-68>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
14. Венгрин І., Шаповал С. Інтенсивність сонячної радіації у місті Львові. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2019. № 12. Р. 77–84.  
<https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.12.77-84>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
15. Венгрин, І. (2019). Дослідження сонячних колекторів, інтегрованих в конструкцію скляного фасаду будівлі/споруди: необхідність та особливості. *Theory and Building Practice*, 1 (1), 38-46.  
<https://doi.org/10.23939/jtbp2019.01.038>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
16. Venhryn, I., Shapoval, S., Furdas, Y., Kasynets, M., Piznak, B. (2020). Thermal efficiency analysis of solar heat supply unit combined with glass facade of building. *Energy engineering and control systems*, 6 (1), 1-6.  
<https://doi.org/10.23939/jeecs2020.01.001>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
17. Shapoval, S., Zhelykh, V., Venhryn, I., Myroniuk, K., Gensetskyi, M. (2020). Examination of the thermal efficiency of the solar collector integrated into the light transparent building facade. *Theory and Building Practice*, 2 (1), 30-37.  
<https://doi.org/10.23939/jtbp2020.01.030>  
(фахове видання України в галузі технічні науки)
18. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). Геліосистема. Патент України 98778. Київ: Державне патентне відомство України.
19. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Возняк, О. Т., Касинець, М. Є., Фурдас, Ю. В. (2020). Патент України 143415. Київ: Державне патентне відомство України.

20. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Юркевич, Ю. С., Венгрин, І. І., Козак, Х. Р. (2020). Патент України 143997. Київ: Державне патентне відомство України.

II. Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

21. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал променевої енергії в Україні та її використання для низькотемпературних сонячних колекторів*, 3-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». Львів.
22. Венгрин, І. І. (2014). *Перспективи використання систем сонячного теплопостачання на території України*, 72-а студентська науково-технічна конференція. Львів.
23. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Сонячний потенціал в Україні*, Міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів «Інновації в будівництві». Луцьк.
24. Пона, О. М., Венгрин, І. І., Шаповал, С. П. (2014). *Підвищення енергоефективності покриття будівель*, Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва». Полтава.
25. Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). *Потенціал вітрової енергії на території України*, Матеріали XI міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасність. Наука. Час. Взаємодія та взаємовплив». Київ.
26. Желих, В. М., Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2015). *Вплив термічного опору зовнішнього захищення на кількість тепла від сонячної радіації, що надходить в приміщення*, Збірник наукових праць 8-ої МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.
27. Венгрин, І. І. (2015). *Ефективність використання комбінованих систем сонячного теплопостачання для будівель на території України*, 73-тя студентська науково-технічна конференція: збірник тез доповідей. Львів.



28. Ulewicz, M., Zhelykh, V., Shapoval, S., Spodyniuk, N., Vengryn, I. (2016). *Comparison of efficient of the combined solar collector for energy-efficient buildings for different modes of operation*, Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «ЕкоКомфорт». Львів: НУ «Львівська політехніка».
29. Шаповал, С. П., Желих, В. М., Венгрин, І. І. (2017). *Застосування геліовікна для сонячного теплопостачання*, 9-та МНПК «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». Львів.
30. Venhryn, I., Zhelykh, V., Shapoval, S. (2020). *Thermal efficiency of the solar collector integrated into translucent facade*, VI Międzynarodowa Konferencja «Innowacyjne pomysły młodych naukowców. Przemysł: Nauka-Startup».
31. Венгрин, І. І., Шаповал, С. П., Желих, В. М., Шепітчак, В. Б. (2020). *Дослідження енергетичних характеристик теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектору*, Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія». Київ.

## Акти, що підтверджують впровадження результатів дисертаційного дослідження

### I. Акт виданий компанією ТОВ «Техноклас»

ТзОВ "Технології клімату та автоматизація систем"



Вентиляція

Адреса: м.Львів, вул.Зелена 1496

Системи кондиціонування

Тел./факс: 8(032) 245-89-09 (багатоканальний)

Системи опалення

E-mail: [office@technoklas.com](mailto:office@technoklas.com), [count@technoklas.com](mailto:count@technoklas.com)

Промисловий холод

<http://technoklas.com/>

Виробництво повітропроводів  
фас.частин

#### Акт про використання в науково-дослідній діяльності результатів дисертаційного дослідження

Даний акт складений компанією про те, що результати та висновки дисертаційного дослідження Венгрин Ірини Іванівни по факту використовуються у виробництві. Енергетично-вигідне забезпечення є складовою фінансової грамотності ефективного управління компанією, оскільки від систем енергопостачання залежить економія коштів. Нами підтверджено, що результати дисертаційного дослідження Венгрин Ірини Іванівни сприяють енергозбереженню в будівництві.

Компанії було надано обґрунтування результатів досліджень ефективності конструкції теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора (ТФГСК) та принципові схемні рішення його проектування.

Проаналізувавши передані матеріали і провівши оцінку раціональності їх використання встановлено наступні переваги даної установки:

- запропонована конструкція ТФГСК дозволяє одночасно генерувати теплову та електричну енергію;
- конструкція ТФГСК містить фотоелектричні сонячні колектори з внутрішньої сторони приміщення, що дозволяє захистити фотоелементи від несприятливих метеорологічних умов та зменшення надходження сонячного випромінювання в будівлях із перевищеним коефіцієнтом скління фасаду;
- схемні рішення системи сонячного енергопостачання з конструкцією ТФГСК з орієнтовані, як на нове будівництво, так і на реконструкцію. Зокрема, передбачають можливість комбінування конструкції ТФГСК з існуючим фасадом споруди під час капітального ремонту будівлі за умови заміни вікон на енергозберігаючі;
- конструкція надійна в обслуговуванні.

Прийнята до впровадження конструкція дозволяє економити кошти на енергетично-залежних витратах компанії.

Директор ТОВ "Техноклас"



Ярема Т.Б.

## II. Акт виданий компанією ТОВ «Оазис Комфорт»

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
«ОАЗИС КОМФОРТ»

OASIS

Вих. №68/21 від 20 вересня 2021 р.

### Акт впровадження методики та алгоритму розрахунку теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора

Даний акт підтверджує те, що компанією по факту використовується методика та алгоритм розрахунку теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора під час енергоефективного будівництва на основі результатів виконаних у дисертаційній роботі Венгрин І.І.

Запропоновані схемні рішення конструкції теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора наведені в дисертаційному дослідженні Венгрин І.І. використовуватимуться в основі сонце захисту споруд із збільшеним коефіцієнтом скління. Схемне рішення інтегрування елементів геліосистеми в світлопрозорі фасади будівель дозволяють зекономити корисну площу необхідну для встановлення звичайних конструкцій сонячних колекторів. Запропонована конструкція теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора за встановлення 1 м<sup>2</sup> дозволить зменшити викиди в атмосферу вуглекислого газу на рівні 97 %, чадного газу – 2 %, метану Сульфур (II) оксиду – 2.6 %, сажі – 2.4 %, неметанових летких органічних сполук – 0.6 % з терміном окупності до 10 років.

Результати дисертаційної роботи Венгрин Ірини Іванівни мають практичне значення, є актуальними та дозволяють підвищити якість проектування енергоефективних будівель.

Директор ТОВ «Оазис Комфорт»



Коцан Ю. Р.

ТОВ «Оазис Комфорт» (42477319) / Oasis Comfort LLC  
79040 Україна, Львів, вул.Городоцька,282 / 79040 Ukraine, Lviv, Gorodotska str, 282