

Національний університет «Львівська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПОНА Остап Миронович

Прим.№ _____

УДК 620.97: 697.329

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ГЕЛІОПОКРІВЛЕЮ

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

144 – теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

О.М. Пона

Науковий керівник:

Мисак Йосиф Степанович, доктор технічних наук,
професор, Заслужений діяч науки і техніки України

Анотація

Пона О.М. Підвищення ефективності комбінованої системи теплопостачання з геліопокрівлею. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів – 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності систем сонячного теплопостачання з геліопокрівлею, яка поєднує її конструктивно-архітектурну функцію з можливістю поглинання нею сонячної енергії та перетворення її в теплову енергію при зниженні матеріальних і трудових затрат.

Представлено аналіз потенціалу сонячної енергетики та існуючих систем сонячного теплопостачання. Проаналізовано переваги та недоліки різних конструкцій сонячних колекторів, методи їх досліджень. Подано аналіз основних напрямків підвищення ефективності сонячних колекторів та систем сонячного теплопостачання в цілому.

На даний час розроблено та використовується значна кількість сонячних колекторів різних конструкцій, що відрізняє їх за техніко-економічними показниками. Переважна більшість геліоколекторів виготовляється у формі плоских конструкцій, істотним недоліком яких є нестабільність ефективності їх роботи впродовж світлового дня (знижується до 60% в ранішні та вечірні години), висока вартість і трудомісткість виготовлення.

Виходячи з цього, широкі перспективи мають розроблення таких інженерно-технологічних рішень, які забезпечують можливість поєднання конструктивних і архітектурних функцій окремих елементів будівель та споруд з одночасним поглинанням ними сонячної енергії і перетворення її в теплову енергію при зниженні матеріальних і трудових затрат.

Із конструктивних елементів будівель особливої уваги на функцію теплопоглинача заслуговують поверхні покрівель з гофрованих металевих листів, що відкриває можливості більш ефективного вловлювання сонячного випромінювання в ранішні та вечірні години. У зв'язку з цим актуальним є розроблення геліопокрівлі, що поєднує функції сонячного колектора та металевої гофрованої частини скатного даху. Така система може бути застосована як в новобудовах, так і на існуючих покрівлях, та інтегруватися в традиційні комбіновані системи сонячного теплопостачання.

На основі аналітичного вивчення сучасного стану розглянутої проблеми, сформульовано основні завдання, що виконані у даній роботі.

Розроблено математичну модель роботи геліопокрівлі у системі теплопостачання. Розв'язуванням системи балансових рівнянь отримано розрахункові значення температури теплоносія в процесі опромінення теплосприймальної металевої поверхні геліопокрівлі при зміні інтенсивності теплового потоку впродовж дня (для липня) при різній швидкості повітряного потоку. Встановлено, що при середній швидкості повітряного потоку 1-2 м/с температура теплоносія в баку-акумуляторі досягає 50-55°C, а при збільшенні швидкості до 4-6 м/с становить 37-42°C. При цьому середнє значення ККД системи теплопостачання з геліопокрівлею, відповідно, досягає рівня 61-51% та 37-27% з показниками закумуляованої питомої теплоти від 10755 до 9313 кДж/м² та від 7367 до 5712 кДж/м².

Вагомий вплив конвективних тепловтрат у тепловому балансі системи теплопостачання з геліопокрівлею підтверджено розрахунком коефіцієнту тепловіддачі. Встановлено, що дія повітряного потоку навіть при швидкості 2 м/с збільшує коефіцієнт тепловіддачі від 1,76 до 3,62 Вт/(м²·К), який зростає до 8,16 Вт/(м²·К) пропорційно збільшенню швидкості обдуву до 6 м/с. Це є підставою необхідності проведення системних експериментальних досліджень щодо впливу вітру на енергетичну ефективність геліопокрівлі.

Чисельним моделюванням достатньо складно встановити вплив усіх факторів та нестационарні процеси що відбуваються як в геліопокрівлі так і в

усій системі в цілому. Тому для визначення енергетичної ефективності геліопокрівлі були проведені експериментальні дослідження.

Основними факторами, які впливають на ефективність геліопокрівлі є: x_1 – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині геліопокрівлі, $\alpha,^\circ$; x_2 – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі, $\beta,^\circ$; x_3 – інтенсивність потоку теплової енергії, від джерела випромінювання, $I_B, \text{Вт/м}^2$; x_4, x_5 – відповідно швидкість ($V, \text{м/с}$) та напрям ($\psi, ^\circ$) вітру. Врахувати одночасну зміну всіх 5 факторів є доволі складною задачею, тому для спрощення експериментальні дослідження були проведені у два етапи.

На першому етапі дослідів змінними були прийняті: x_1 ($\alpha = [30; 90]^\circ$); x_2 ($\beta = [30; 90]^\circ$); x_3 ($I_B = [300; 900] \text{Вт/м}^2$) при відсутності впливу факторів x_4, x_5 .

Для проведення експериментальних досліджень складено матрицю планування трифакторного експерименту із врахуванням взаємодії факторів. Функцією відгуку служить коефіцієнт ефективності K_{ef} геліопокрівлі, який визначається відношенням кількості отриманої теплоти при певних рівнях впливу визначальних факторів до її максимальної кількості при найбільш оптимальному впливі цих факторів.

Для встановлення характеру впливу кутів падіння та інтенсивності теплового потоку на ефективність геліопокрівлі у гравітаційній системі теплопостачання при розташуванні трубок контуру циркуляції під теплопоглиначем було розроблено та змонтовано експериментальну установку, яка складалась з геліопокрівлі, баку-акумулятора, джерела випромінювання та вимірювальних приладів. Отримані результати свідчать, що в гравітаційній геліосистемі ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття зменшується на 65%, а з прозорим покриттям – на 40%.

З метою підвищення ефективності геліопокрівлі розроблено її конструкцію з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції теплоносія. Результати дослідження показали вищу її ефективність порівняно з варіантом

нижнього розташування циркуляційного контуру. Коефіцієнт ефективності такої геліопокрівлі без прозорого покриття, при зміні кутів падіння теплового потоку зменшується на 50%, а геліопокрівлі з прозорим покриттям – на 30%.

Для визначення оптимальної конструкції геліопокрівлі було розраховано ККД роботи системи теплопостачання з геліопокрівлею та встановлено, що ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям є в середньому на 20% вищою, ніж ефективність геліопокрівлі без нього. ККД системи теплопостачання з геліопокрівлею з верхнім розташуванням трубок для теплоносія є на 10% вищим, ніж для варіанту їх нижнього розташування. Найвищий ККД геліосистеми встановлено у геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції теплоносія з прозорим покриттям, який в середньому рівний 67%. Тому подальші дослідження та розрахунки проводилися для геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок циркуляції.

Аналогічні дослідження проведені і для геліопокрівлі у протічній системі теплопостачання. Встановлено, що при зміні кутів α та β від 90° до 30° ефективність роботи геліопокрівлі зменшується на 40%, а середнє значення ККД становить 63%.

В другій серії досліджень відповідно змінювались: x_3 ($I_B = [300; 900]$ Вт/м²); x_4 ($V = [2; 6]$ м/с); x_5 ($\psi = [0; 90]^\circ$), при сталих значеннях x_1 ($\alpha = 90^\circ$) та x_2 ($\beta = 90^\circ$). За результатами встановлено, що збільшення швидкості вітрового потоку від 2 до 6 м/с призводить до зменшення ефективності системи теплопостачання з геліопокрівлею без прозорого покриття на 45%, а з покриттям – на 35%.

Складено рівняння регресії, проаналізувавши коефіцієнти якого встановлено, що найбільш вагомий вплив на ефективність геліопокрівлі має інтенсивність падаючого теплового потоку та швидкість вітру, а вплив напряму останнього є менш значимий.

Для підтвердження результатів лабораторних досліджень було проведено оцінку ефективності роботи розробленої геліопокрівлі з прозорим покриттям при верхньому розташуванні трубок циркуляції в натурних умовах у гравітаційній

геліосистемі. В 19:00 год температура теплоносія в баку-акумуляторі досягла 52°C , а середнє значення ККД геліосистеми становило 52%.

Запропоновано схемні конструктивні рішення будови і використання геліопокрівлі для комбінованих геліосистем.

Для практичного використання отриманих результатів розроблено методику розрахунку параметрів системи теплопостачання з геліопокрівлею, що враховує значення коефіцієнтів ефективності різних конструкцій геліопокрівлі, які визначаються за відповідними емпіричними залежностями, отриманими експериментально.

На основі цього методу складено комп'ютерну програму для розрахунку параметрів системи теплопостачання з геліопокрівлею. За розрахунком встановлено, що питома теплова потужність геліопокрівлі з прозорим покриттям у липні для м. Львова досягає 660 Вт/м^2 . Розрахунковий ККД самої геліопокрівлі становить 72%.

Економічну оцінку доцільності застосування системи теплопостачання з геліопокрівлею здійснено за приведеними та питомими приведеними річними затратами. Встановлено, що питомі приведені затрати системи теплопостачання з геліопокрівлею становлять 1,80 тис.грн/(ГДж·рік), що є в середньому на 18 % меншими, ніж затрати на геліосистему з сонячними колекторами. Термін окупності системи теплопостачання з геліопокрівлею становить 5,9 років.

Практичне значення одержаних результатів. На основі узагальнення експериментальних даних та теоретичних залежностей підтверджено можливість та ефективність застосування геліопокрівлі, суміщеної із гофрованим покриттям будівель, що забезпечує зниження вартості отримуваної теплової енергії в геліосистемі. Такі системи можуть бути використані для вирішення задач впровадження альтернативних джерел енергії як додаткові ефективні джерела тепла при проектуванні дахів як новобудов, так і реконструкції існуючих. Розроблено варіанти конструкцій геліопокрівлі та комбіновану систему теплопостачання, які захищено патентом України на винахід (№111910) та 3 патентами України на корисну модель (№84945,

№92010, №92009).

Результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничому цеху НВ ТзОВ «Кокер» у системі комбінованого теплопостачання в технології виробництва керамічних виробів та у навчальному процесі під час викладання дисциплін: «Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії», «Системи теплопостачання та оптимізація їх режимів», «Джерела та системи генерації енергії» (для підготовки бакалаврів спеціальності 144 "Теплоенергетика", для магістрів за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», а також бакалаврів спеціальності 143 «Атомна енергетика»), та при виконанні кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- за результатами моделювання роботи та експериментальними дослідженнями ССТ з геліопокрівлею отримала подальший розвиток теорія щодо розроблення ефективних способів перетворення сонячної енергії в теплову за рахунок теплопоглиначів, які є конструктивним елементами будівель;

- встановлено взаємозв'язок температури нагрівання теплоносія в процесі опромінення теплосприймальної металевої поверхні геліопокрівлі за зміни інтенсивності теплового потоку та різної швидкості повітряного потоку, що дає змогу визначити середню теплову потужність ССТ з геліопокрівлею впродовж періоду сонячного опромінення;

- вперше отримано графічні та аналітичні залежності оцінки ефективності комбінованої з геліопокрівлею ССТ від кутів падіння та інтенсивності теплового потоку, швидкості та напрямку вітру для інженерного розрахунку термоаккумуляційних властивостей геліосистеми;

- теоретично та експериментально обґрунтовано можливість застосування геліопокрівлі з профільно-гофрованим теплопоглиначем в ССТ, що зменшує капітальні затрат на такі системи.

Ключові слова: сонячна енергетика, геліопокрівля, система сонячного теплопостачання, гофрований теплопоглинач, теплова потужність.

Аннотация

Пона О.М. Повышение эффективности комбинированной системы теплоснабжения с гелиокровлею. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Национальный университет «Львовская политехника», Львов - 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы повышения эффективности систем солнечного теплоснабжения с гелиокровлей, которая объединяет ее конструктивно-архитектурную функцию с возможностью поглощения ею солнечной энергии и преобразования ее в тепловую энергию при снижении материальных и трудовых затрат.

Представлен анализ потенциала солнечной энергетики и существующих систем солнечного теплоснабжения. Проанализированы преимущества и недостатки различных конструкций солнечных коллекторов, методы их исследований. Представлен анализ основных направлений повышения эффективности солнечных коллекторов и систем солнечного теплоснабжения в целом.

В настоящее время разработаны и используется значительное количество солнечных коллекторов различных конструкций которые отличаются по технико-экономическим показателям. Подавляющее большинство гелиоколлекторов производится в форме плоских конструкций, существенным недостатком которых является нестабильность эффективности их работы в течение светового дня (снижается до 60% в утренние и вечерние часы), высокая стоимость и трудоемкость изготовления.

Исходя из этого, широкие перспективы имеют разработки таких инженерно-технологических решений, которые обеспечивают возможность сочетания конструктивных и архитектурных функций отдельных элементов зданий и сооружений с одновременным поглощением ими солнечной энергии и

преобразования ее в тепловую энергию при снижении материальных и трудовых затрат.

Из конструктивных элементов зданий особого внимания на функцию теплопоглотителя заслуживают поверхности кровель из гофрированных металлических листов, что открывает возможность более эффективного улавливания солнечного излучения в утренние и вечерние часы. В связи с этим актуальным является разработка гелиокровли, сочетающей функции солнечного коллектора и металлической гофрированной части скатной крыши. Такая система может быть применена как в новостройках, так и на существующих кровлях, и интегрироваться в традиционные комбинированные системы солнечного теплоснабжения.

На основе аналитического изучения современного состояния рассматриваемой проблемы, сформулированы основные задачи, выполненные в данной работе.

Разработана математическая модель работы гелиокровли в системе теплоснабжения. Развязыванием системы балансовых уравнений получены расчетные значения температуры теплоносителя в процессе облучения теплосприимчивой металлической поверхности гелиопокрывли при изменении интенсивности теплового потока в течение дня (для июля) при разной скорости воздушного потока. Установлено, что при средней скорости воздушного потока 1-2 м/с температура теплоносителя в баке-аккумуляторе достигает 50-55°C, а при увеличении скорости до 4-6 м/с составляет 37-42°C. При этом среднее значение КПД системы теплоснабжения с гелиокровлею, соответственно, достигает уровня 61-51% и 37-27% с показателями аккумулированной удельной теплоты от 10755 до 9313 кДж/м² и от 7367 до 5712 кДж/м².

Существенное влияние конвективных теплопотерь в тепловом балансе системы теплоснабжения с гелиокровлею подтверждено расчетом коэффициента теплоотдачи. Установлено, что действие воздушного потока даже при скорости 2 м/с увеличивает коэффициент теплоотдачи от 1,76 до 3,62 Вт/(м²·К), который растет до 8,16 Вт/(м²·К) пропорционально увеличению

скорости обдува до 6 м/с. Это является основанием необходимости проведения системных экспериментальных исследований влияния ветра на энергетическую эффективность гелиокровли.

Численным моделированием достаточно сложно установить влияние всех факторов и нестационарные процессы происходящие как в гелиокровли так и во всей системе в целом. Поэтому для определения энергетической эффективности гелиокровли были проведены экспериментальные исследования.

Основными факторами, влияющими на эффективность гелиокровли являются: x_1 – угол между поверхностью теплопоглотителя и проекцией направления теплового потока в горизонтальной плоскости гелиокровли, α , °; x_2 – угол между поверхностью теплопоглотителя и проекцией направления теплового потока в вертикальной плоскости гелиокровли, β , °; x_3 – интенсивность потока тепловой энергии, от источника излучения, I_b , Вт/м²; x_4 , x_5 – соответственно скорость (V , м/с) и направление (ψ , °) ветра. Учесть одновременное изменение всех 5 факторов является довольно сложной задачей, поэтому для упрощения экспериментальные исследования были проведены в два этапа.

На первом этапе экспериментов переменными были приняты: x_1 ($\alpha = [30;90]^\circ$); x_2 ($\beta = [30;90]^\circ$); x_3 ($I_b = [300;900]$ Вт/м²) при отсутствии влияния факторов x_4 , x_5 .

Для проведения экспериментальных исследований составлено матрицу планирования трифакторного эксперимента с учетом взаимодействия факторов. Функцией отклика служит коэффициент эффективности $K_{эф}$ гелиокровли, который определяется отношением количества полученной теплоты при определенных уровнях воздействия определяющих факторов в ее максимальном количестве при наиболее оптимальном воздействии этих факторов.

Для установления характера влияния углов падения и интенсивности теплового потока на эффективность гелиокровли в гравитационном системе

теплоснабжения при расположении трубок контура циркуляции под теплопоглотителем была разработана и смонтирована экспериментальная установка, которая состояла из гелиокровли, баке-аккумулятора, источники излучения и измерительных приборов. Полученные результаты свидетельствуют, что в гравитационном гелиосистеме эффективность гелиокровли без прозрачного покрытием уменьшается на 65%, а с прозрачным покрытием - на 40%.

С целью повышения эффективности гелиокровли разработано ее конструкцию с верхним расположением трубок контура циркуляции теплоносителя. Результаты исследования показали высокую ее эффективность по сравнению с вариантом нижнего расположения циркуляционного контура. Коэффициент эффективности такой гелиокровли без прозрачного покрытия, при изменении углов падения теплового потока уменьшается на 50%, а гелиокровли с прозрачным покрытием – на 30%.

Для определения оптимальной конструкции гелиопокривли было рассчитано КПД работы системы теплоснабжения с гелиокровлей и установлено, что эффективность гелиокровли с прозрачным покрытием есть в среднем на 20% выше, чем эффективность гелиокровли без него. КПД системы теплоснабжения с гелиокровлей с верхним расположением трубок для теплоносителя есть на 10% выше, чем для варианта их нижнего расположения. Высокий КПД гелиосистемы установлен в гелиокровли с верхним расположением трубок контура циркуляции теплоносителя с прозрачным покрытием, который в среднем равен 67%. Поэтому дальнейшие исследования и расчеты проводились для гелиокровли с верхним расположением трубок циркуляции.

Аналогичные исследования проведены и для гелиокровли в проточной системе теплоснабжения. Установлено, что при изменении углов α и β от 90° до 30° эффективность работы гелиокровли уменьшается на 40%, а среднее значение КПД составляет 63%.

Во второй серии исследований в соответствии менялись: x_3 ($I_B = [300;900]$)

Вт/м²); x_4 ($V = [2;6]$ м/с); x_5 ($\psi = [0;90]^\circ$), при постоянных значениях x_1 ($\alpha = 90^\circ$) и x_2 ($\beta = 90^\circ$). По результатам установлено, что увеличение скорости ветрового потока от 2 до 6 м/с приводит к уменьшению эффективности системы теплоснабжения с гелиокровлей без прозрачного покрытия на 45%, а с покрытием – на 35%.

Составлено уравнения регрессии, проанализировав коэффициенты которого установлено, что наиболее существенное влияние на эффективность гелиокровли имеет интенсивность падающего теплового потока и скорость ветра, а влияние направления последнего есть менее значимый.

Для подтверждения результатов лабораторных исследований была проведена оценка эффективности работы разработанной гелиокровли с прозрачным покрытием при верхнем расположении трубок циркуляции в натуральных условиях в гравитационном гелиосистеме. В 19:00 температура теплоносителя в баке-аккумуляторе достигла 52°C, а среднее значение КПД гелиосистемы составило 52%.

Предложено схемные конструктивные решения использования гелиокровли для комбинированных гелиосистем.

Для практического использования полученных результатов разработана методика расчета параметров системы теплоснабжения с гелиокровлей, учитывающий значения коэффициентов эффективности различных конструкций гелиокровли, которые определяются по соответствующим эмпирическим зависимостями, полученными экспериментально.

На основе этого метода составлено компьютерную программу для расчета параметров системы теплоснабжения с гелиокровлей. По расчету установлено, что удельная тепловая мощность гелиокровли с прозрачным покрытием в июле для г. Львова достигает 660 Вт/м². Расчетный КПД самой гелиопокривли составляет 72%.

Экономическая оценка целесообразности применения системы теплоснабжения с гелиокровлей осуществлена по приведенным и удельными приведенными годовыми затратами. Установлено, что удельные приведенные

затраты системы теплоснабжения с гелиокровлей составляют 1,80 тыс/(ГДж·год), что в среднем есть на 18% меньше, чем затраты на гелиосистему с солнечными коллекторами. Срок окупаемости системы теплоснабжения с гелиокровлею составляет 5,9 лет.

Практическое значение полученных результатов. На основе обобщения экспериментальных данных и теоретических зависимостей подтверждена возможность и эффективность применения гелиокровли, совмещенной с гофрированным покрытием зданий, обеспечивает снижение стоимости получаемой тепловой энергии в гелиосистеме. Такие системы могут быть использованы для решения задач внедрения альтернативных источников энергии как дополнительные эффективные источники тепла при проектировании крыш как новостроек, так и реконструкции существующих. Разработаны варианты конструкций гелиокровли и комбинированную систему теплоснабжения, защищенные патентом Украины на изобретение (№111910) и 3 патентами Украины на полезную модель (№84945, №92010, №92009).

Результаты диссертационной работы внедрены в производственном цехе НВ ООО «Кокер» в системе комбинированного теплоснабжения в технологии производства керамических изделий и в учебном процессе при преподавании дисциплин: «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Системы теплоснабжения и оптимизация их режимов», «Источники и системы генерации энергии» (для подготовки бакалавров специальности 144 «Теплоэнергетика», для магистров по специальности 144 «Теплоэнергетика», а также бакалавров специальности 143 «Атомная энергетика») и при выполнении квалификационных работ бакалавров и магистров.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- по результатам моделирования работы и экспериментальными исследованиями ССТ с гелиокровлей получила дальнейшее развитие теория по разработке эффективных способов преобразования солнечной энергии в тепловую за счет теплопоглотителей, которые являются конструктивным элементом зданий;

- установлена взаимосвязь температуры нагрева теплоносителя в процессе облучения теплосприимчивой металлической поверхности гелиокровли при изменении интенсивности теплового потока и различной скорости воздушного потока, что позволяет определить среднюю тепловую мощность ССТ с гелиокровлей в течение периода солнечного облучения;

- впервые получены графические и аналитические зависимости оценки эффективности комбинированной с гелиокровлей ССТ от углов падения и интенсивности теплового потока, скорости и направления ветра для инженерного расчета термоаккумуляционных свойств гелиосистемы;

- теоретически и экспериментально обоснована возможность применения гелиокровли с профильно-гофрированным теплопоглотителем в ССТ, что уменьшает капитальные затраты на такие системы.

Ключевые слова: солнечная энергетика, гелиокровля, система солнечного теплоснабжения, гофрированный теплопоглотитель, тепловая мощность.

Abstract

O. Pona Increase in efficiency of the combined heat supply system with solar roof. – Qualifying scientific paper as a manuscript.

Thesis submitted for the Degree of Candidate of Engineering Sciences in specialty 05.14.06 – "Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering". – Lviv Polytechnic National University, Lviv – 2018.

This thesis deals with the solving of the topical issue of increase in efficiency of the solar heat supply systems with solar roof, which combines its constructive and architectural function with the ability to absorb solar energy and transform it into thermal energy with the reduction of the material and labour costs.

The analysis of the potential of solar energy and existing solar heating systems was presented. The advantages and disadvantages of different designs of solar collectors and methods of their researches were analyzed. The general

analysis of basic directions of increase in efficiency of the solar collectors and solar heating systems was presented.

Significant number of solar collectors of different designs and with different technical and economic characteristics was developed and used up to the present. The vast majority of solar collectors are manufactured in the form of flat structures, the significant disadvantage of which is the instability of the efficiency of their operation during the light day (reduced to 60% in the morning and in the evening), high cost and labour intensity.

On this basis, the development of such engineering and technological solutions that ensure the possibility of combining the constructive and architectural functions of certain elements of the buildings and structures involving the simultaneous absorption of solar energy and transforming it into thermal energy with the reduction of material and labour costs are significantly promising.

Out of different construction elements of a building the heat absorber function is essential to the roof surface made of corrugated metal sheets, which enables more efficient solar radiation interception in the morning and in the evening. Thus, the development of solar roof, which combines the functions of the solar collector and metal corrugated part of the slope roof, is a relevant issue. Such system may be applied both in the new buildings and on the existing roofs, and integrated into the traditional combined solar heat supply systems.

According to the analytical study of the current state of the issue under consideration, the main tasks performed in this paper were formulated.

A mathematical model of the solar roof operation in the heat supply system was developed. With the help of balance equation system, we obtained the calculated values of temperature of the heat carrier during the irradiation of heat-receiving metal solar roof surface when changing the intensity of the heat flow within a day (for July) at different speeds of the air flow. It was determined that at an average air flow velocity of 1-2 m/s, the temperature of the heat carrier in the storage tank reaches 50-55°C, while at an increase in velocity to 4-6 m/s it is 37-42°C. Upon that the average value of efficiency of the heat supply system with

solar roof reaches the level of 61-51% and 37-27% with the values of the accumulated specific heat from 10,755 to 9,313 kJ/m² and from 7,367 to 5,712 kJ/m².

The significant influence of convective heat losses in the heat balance of the heat supply system with solar roof was confirmed by the calculation of the heat-transfer coefficient. It was determined that the effect of air flow even at a speed of 2 m/s may increase the heat-transfer coefficient from 1.76 to 3.62 W/(m²·K), which increases to 8.16 W/(m²·K) proportionally to the increase of air flow velocity to 6 m/s. This proves the necessity for systemic experimental studies on the impact of wind on the solar roof energy efficiency.

It is rather difficult to determine the influence of all factors and non-stationary processes occurring both in the solar roof and in the whole system with the help of numerical modelling. Therefore, the experimental studies were conducted to determine the solar roof energy efficiency.

The main factors that influence the solar roof efficiency are: x_1 – the angle between the surface of the heat absorber and projection of the heat flow direction in the horizontal plane of the solar roof, α , °; x_2 – the angle between the surface of the heat absorber and projection of the heat flow direction in the vertical plane of the solar roof, β , °; x_3 – the intensity of the heat energy flow from the source of radiation, I_w , W/m²; x_4 , x_5 – respectively the wind velocity (V, m/s) and direction (ψ , °). It is rather difficult to consider the change of all 5 factors simultaneously, thus, the experimental studies were conducted in two stages to make them less complex.

At the first stage of studies the variables were: x_1 ($\alpha = [30; 90]$ °); x_2 ($\beta = [30; 90]$ °); x_3 ($I_w = [300; 900]$ W/m²), if the factors x_4 , x_5 have no influence.

In order to conduct the experimental studies, the planning matrix for three-factor experiment was created in consideration of the factors interaction. The response function is the efficiency coefficient C_{eff} of the solar roof, which is determined by the ratio of the amount of heat received at certain levels of influence of the determinant factors to its maximum amount involving the most optimal influence of these factors.

In order to determine the nature of influence of the incidence angles and intensity of the heat flow on the solar roof efficiency in the gravitational heat supply system, when the circulation circuit tubes are located under the heat absorbent, the experimental installation consisting of the solar roof, storage tank, radiation source and measuring instruments was developed and mounted. The obtained results show that the efficiency of solar roof without a transparent cover in the gravitational solar system is reduced by 65%, while the efficiency of solar roof with a transparent cover is reduced by 40%.

In order to increase the solar roof efficiency, the solar roof was designed with the upper arrangement of the circulation circuit tubes of the heat carrier. The results of the study showed its higher efficiency in comparison with the lower arrangement of the circulation circuit. When the incidence angles of the heat flow are changed, the efficiency coefficient of such solar roof without a transparent cover is reduced by 50%, while the efficiency of solar roof with a transparent cover is reduced by 30%.

In order to determine the optimal design of the solar roof, we calculated the efficiency of the heat supply system operation with solar roof. It was established that the efficiency of solar roof with a transparent cover is on average 20% higher than the efficiency of solar roof without it. The efficiency factor of the heat supply system with solar roof with the upper arrangement of the heat-carrier tubes is 10% higher than with their lower arrangement. The solar roof with the upper arrangement of the heat-carrier circulation circuit tubes with a transparent cover has the highest efficiency factor of the solar system, which is on average 67%. Thus, further studies and calculations were conducted in relation to solar roof with the upper arrangement of the circulation tubes.

Similar studies were conducted in relation to solar roof in the flow heat supply system. It was established that when the angles α and β are changed from 90° to 30° , the efficiency of solar roof operation is reduced by 40% and the average efficiency is 63%.

At the second stage of studies, the variables have been: x_3 ($I_w = [300; 900]$ W/m²); x_4 ($V = [2; 6]$ m/s); x_5 ($\psi = [0; 90]^\circ$) with constant values x_1 ($\alpha = 90^\circ$) and x_2

($\beta = 90^\circ$). According to the results, the increase in velocity of the wind flow from 2 to 6 m/s leads to the decrease in efficiency of the heat supply system with solar roof, which is not equipped with a transparent cover, by 45%. The decrease in efficiency of the heat supply system with solar roof equipped with a transparent cover is 35%.

The regression equation was formulated. The analysis of its coefficients proves that the intensity of the incident heat flow and wind velocity are the most influential in the context of the efficiency of solar roof, while the wind direction is less influential.

In order to confirm the results of laboratory studies, we estimated the efficiency of operation of developed solar roof with a transparent cover with the upper arrangement of the circulation tubes in natural conditions in the gravitational solar system. At 7 pm, the heat-carrier temperature in storage tank reached 52°C , and the average efficiency of the solar system constituted 52%.

The design solutions concerning the structure and the use of solar roof for combined solar systems were suggested.

For practical application of the obtained results we developed the method of calculating the parameters of the heat supply system with solar roof in consideration of the efficiency coefficients of various structures of solar roof, which are determined according to the relevant empirical dependences obtained experimentally.

On the basis of this method, a computer program for calculating the parameters of the heat supply system with solar roof was developed. According to the calculations, it was established that the specific heat power of solar roof with a transparent cover in July in Lviv reaches 660 W/m^2 . The calculated efficiency factor of solar roof itself is 72%.

The economic assessment of the rationality of using the heat supply system with solar roof was conducted according to the reported and specific reported annual costs. It was established that the specific reported costs of the heat supply system with solar roof constitute 1.80 thousand UAH/(HJ/year), which is on average 18% less than costs for the solar system with solar collectors. The payback period of the heat supply system with solar roof is 5.9 years.

Practical value of the obtained results. In order to generalize the experimental data and theoretical dependences we confirmed the possibility and efficiency of use of solar roof combined with corrugated building cover, which ensures the reduction in the cost of the received heat energy in the solar system. Such systems may be used for solving the problems of introduction of alternative energy sources as additional effective heat sources in the design of roofs of new buildings and in the reconstruction of existing ones. We developed the design options of solar roof and combined heat supply system protected by patent of Ukraine for invention (No. 111910) and 3 patents of Ukraine for utility model (No. 84945, No. 92010, No. 92009).

The results of thesis were introduced in the production shop of Koker Research and Production LLC in the combined heat supply system in the production of ceramic products and in the educational process during the teaching of disciplines: "Alternative and Renewable Energy Sources", "Heat Supply Systems and Optimization of Their Modes", "Energy Generation Sources and Systems" (for preparation of bachelors in specialty 144 "Heat Power Engineering", masters in specialty 144 "Heat Power Engineering", as well as bachelors in specialty 143 "Atomic Energy"), and during the completion of bachelors' and masters' qualifying papers.

The scientific novelty of the paper includes the following:

- according to the results of modelling and experimental studies in relation to solar heat supply system with solar roof, we formulated the theory of developing the effective methods for transforming solar energy into thermal energy due to heat absorbers, which are construction elements of buildings;

- we determined the interrelation of the heat-carrier heating temperature in the process of irradiation of the heat-receiving metal surface of solar roof in case of changing intensity of the heat flow and different air flow velocity, which enables the determination of the average heat power of the solar heat supply system with solar roof during the period of solar radiation;

- for the first time we have obtained the graphical and analytical dependences

of the estimation of efficiency of the combined solar heat supply system with solar roof from the incidence angles and heat flow intensity, wind velocity and direction for engineering calculation of the thermal accumulative properties of the solar system;

– we theoretically and experimentally explained the possibility of using the solar roof with a corrugated heat absorber in the solar heat supply system, which reduces the capital costs for such systems.

Key words: solar energy, solar roof, solar heat supply system, corrugated heat absorber, heat power.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Mysak Y. Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research / Y. Mysak, O. Pona, S. Shapoval, M. Kuznetsova, T. Kovalenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №3/8(87), 2017, p. 26-32. *(Особистий внесок полягає у математичному обробленні результатів дослідження ефективності роботи геліопокрівлі).*

2. Shapoval S. Ecological and energy aspects of using the combined solar collectors for low-energy houses / S. Shapoval, P. Shapoval, V. Zhelykh, O. Pona, N. Spodyniuk, B. Gulai, O. Savchenko, K. Myroniuk // Chemistry and Chemical Technology // Vol 11, № 4, 2017, p. 503-508. *(Особистий внесок полягає у визначенні економічного ефекту застосування геліопокрівлі у ССТ).*

3. Пона О. М. Порівняння ефективності комбінованого сонячного колектора / О. М. Пона, Б. І. Гулай // «Східно-Європейський журнал новітніх технологій», №2/8 (74), 2015, с.53-57. *(Особистий внесок полягає у проведенні експериментальних досліджень різних конструкцій комбінованого сонячного колектора та обробці їх результатів).*

4. Voznyak O. Vplyv prúdenia vzduchu na energetickú účinnosť solárneho kolektora / O. Vožnyak, O. Pona, S. Shapoval, P. Kapalo // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2014. – № 3.– p. 14-15. *(Особистий внесок полягає у визначенні впливу швидкості та напрямку повітряного потоку на ефективність сонячного*

колектора).

5. Voznyak O. Effectiveness of helioroof with the top location of pipes of circulation contour / O. Voznyak, O. Pona, S. Shapoval // Teoretická a experimentálna analýza sústav techniky prostredia v súvislosti s ich mikrobiologickým znečistením pri efektívnom využití obnoviteľných zdrojov. Nekonferenčný zborník vedeckých prác - VEGA 1/0748/11.– Košice, 2014. – p. 339-343. *(Особистий внесок полягає у проведенні експериментальних досліджень геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок для теплоносія та обробці їх результатів).*

6. Voznyak O. Efficiency of Solar roof with transparent cover for heating supply of buildings / O. Voznyak, O. Pona, S. Shapoval, M. Kasynets // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Construction of optimized energy potential. – Częstochowa, 2014. – 2(14), p. 117-124. *(Особистий внесок полягає у дослідженні ефективності геліопокрівлі у ССТ).*

7. Zhelykh V. Perspectives of using heliosystems and their research in solar heating system / V. Zhelykh, O. Pona, A. Eltman, S. Shapoval // XV International Scientific Conference: Current issues of civil and environmental engineering and architecture, Rzeszów – Lviv – Kosice, 9-10 September 2015.- p. 1-8. *(Особистий внесок полягає у обробленні результатів лабораторних досліджень геліосистеми).*

8. Пона О.М. Визначення енергетичних властивостей геліопокрівлі впродовж дня / О.М. Пона, Й.С. Мисак // Вісник інженерної академії України – Випуск 3: Київ, 2016. – с. 257-260. *(Особистий внесок полягає у моделюванні роботи геліопокрівлі в гравітаційній ССТ).*

9. Пона О.М. Ефективність використання сонячного колектора суміщеного з покрівлею будинку в системі сонячного теплопостачання / О.М. Пона, Й.С. Мисак, С.П. Шаповал, О.С. Дацько // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2016. – № 844. – с. 164-168. *(Особистий внесок полягає в отриманні та аналізі графічних залежностей ефективності використання*

геліопокрівлі в ССТ).

10. Voznyak O. Method of determining the efficiency of heliocollector in system with forced circulation of coolant / O. Voznyak, O. Pona, A.Eltman, S. Sharoval, N. Spodyniuk // Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 7-К: КНУБА, 2015. – с. 10-16. *(Особистий внесок полягає в отриманні експериментальних даних при розрахунку термоаккумуляційних властивостей геліопокрівлі).*

11. Возняк О. Т. Combined solar collector / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2014. – № 781. – с. 212-215. *(Особистий внесок полягає у дослідженні способів підвищення ефективності ССТ).*

12. Пона О. М. Вплив прозорого покриття на ефективність геліопокрівлі / О.М. Пона // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, науково-технічний збірник – Вінниця, №2(17), 2014. – с.165-168.

13. Пона О.М. Аналітичне моделювання впливу повітряного потоку на роботу геліоколектора з прозори покриттям / О.М. Пона // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник.- Вип. 18.- К.:КНУБА, 2015.- с. 101-105.

14. Пона О.М. Натурні дослідження геліопокрівлі в гравітаційній системі теплопостачання / О.М. Пона // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2015. – № 823. – с. 265-269.

15. Пона О.М. Оцінка економічного ефекту від використання геліопокрівлі / О. М. Пона, О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, М.Є. Касинець // Вісник національного університету водного господарства та природокористування, збірник наукових праць, вип. 1(69) – Рівне, 2015. – с. 282-287. *(Особистий внесок полягає в розрахунку показників економічної ефективності геліопокрівлі у ССТ).*

16. Пона О.М. Ефективність геліопокрівлі в гравітаційній системі

теплопостачання / О.М. Пона, О.Т. Возняк // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сборник научных трудов. Вып. 76. – ГВУЗ ПГАСА. Днепропетровск: ЧМП «Экономика» 2014. – с. 231-235. *(Особистий внесок полягає у проведенні експериментальних досліджень геліопокрівлі та обробці результатів).*

17. Возняк О. Т. Вплив вітру на роботу сонячного колектора з гофрованим теплопоглиначем / О.Т. Возняк, О.М. Пона, С.П. Шаповал // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №18 (1061). с. 32-38. *(Особистий внесок полягає у встановленні рівня впливу вітру на тепловіддачу сонячного колектора).*

18. Возняк О.Т. Вплив напрямку та швидкості повітряного потоку на роботу сонячного колектора без прозорого покриття / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин // Строительство и техногенная безопасность // Сборник научных трудов. – Симферополь. – 2014 – Выпуск № 50. с. 49-52. *(Особистий внесок полягає у визначенні впливу швидкості та напрямку вітру на ефективність геліоколектора).*

19. Возняк О. Т. Дослідження ефективності комбінованого сонячного колектора / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. праць / гол. ред. Д. Л. Дудюк. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2013. – Вип.23.13. – с. 171-174. *(Особистий внесок полягає у дослідженні комбінованого сонячного колектора у системі сонячного теплопостачання).*

20. Пона О.М. Оцінка економічного ефекту від використання геліопокрівлі / Пона О.М., Возняк О.Т., Шаповал С.П., Касинець М.Є. // Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення. Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2015. – С. 175-176. *(Особистий внесок полягає у проведенні розрахунку приведених річних затрат на систему теплопостачання з геліопокрівлею та традиційними сонячними колекторами).*

21. Пона О.М. Вплив повітряного потоку на роботу сонячного колектора без прозорого покриття / Пона О.М. Возняк О.Т. // 3-й міжнародний конгрес. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів. – Львів, 17-19 вересня 2014. – С. 82. *(Особистий внесок полягає у обробленні результати експериментальних досліджень впливу повітряного потоку на роботу сонячного колектора без прозорого покриття).*

22. Пона О.М. Дослідження роботи геліопокрівлі у механічній системі теплопостачання / Пона О.М., Возняк О.Т., Шаповал С.П. // Міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів. Інновації у будівництві. Збірник тез доповідей. – Луцьк, 20-22 листопада 2014. – С. 162-165. *(Особистий внесок полягає у отриманні залежності ефективності геліопокрівлі від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності).*

23. Возняк О.Т. Дослідження ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям / Возняк О.Т., Шаповал С.П., Пона О.М. // Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры. Материалы Международной научно-практической интернет-конференции. – Харьков, 23 октября-22 ноября 2013. – С. 59-62. *(Особистий внесок полягає у виконанні та обробленні результатів експериментальних досліджень ефективності роботи геліопокрівлі з прозорим покриттям).*

24. Zhelykh V. Perspectives of using heliosystems and their research in solar heating system / V. Zhelykh, O. Pona, A. Eltman, S. Shapoval // XV International Scientific Conference: Current issues of civil and environmental engineering and architecture, Rzeszów – Lviv – Kosice, 9-10 September 2015.- s. 100-101. *(Особистий внесок полягає у обробленні результатів лабораторних досліджень геліосистеми).*

25. Пона О.М. Зміна ефективності геліопокрівлі в активній системі теплопостачання при впливі на неї вітру / Пона О.М., Гулай Б.І. // Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії

в регіоні: Матеріали Восьмої міжнародної науково-практичної конференції. Збірник наук. статей – Львів: ЛВДЦНТІ, 2-3 квітня 2015. – С. 169-172. *(Особистий внесок полягає у проведенні експериментальних досліджень ефективності роботи геліопокрівлі при впливі на неї вітру).*

26. Пона О.М. Підвищення енергоефективності покриття будівель / Пона О.М., Венгрин І.І., Шаповал С.П. // Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених і студентів «Перспективи розвитку будівельної галузі». – Полтава: ПолтНТУ, 27 грудня 2014. – С. 149-151. *(Особистий внесок полягає у отриманні залежностей ефективності геліопокрівлі від кутів падіння теплового потоку).*

27. Патент України на винахід № 111910 UA МПК E04D 13/18 (2014.01), F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/24 (2006.01), F24J 2/46 (2006.01). Система теплопостачання із геліопокрівлею / С.П. Шаповал, О.М. Пона // Промислова власність. – 2016. – № 14; заявл. 10.03.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 14. *(Особистий внесок полягає у розробленні конструкції геліопокрівлі).*

28. Патент України на корисну модель № 84945 UA МПК F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/24 (2006.01). Сонячний колектор / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона // Промислова власність. – 2013. – № 21; заявл. 02.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. *(Особистий внесок полягає у розробленні конструкції сонячного колектора).*

29. Патент України на корисну модель № 92010 UA МПК(2014) F24J 2/00. Гравітаційна геліосистема / В.М. Желих, О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, Б.І Гулай, О.М.Пона // Промислова власність. – 2014. – №14; заявл. 24.02.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. *(Особистий внесок полягає у розробленні конструкції сонячного колектора).*

30. Патент України на корисну модель № 92009 UA МПК F24J 2/34 (2006.01). Комбінована система сонячного теплопостачання / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, О.М. Пона // Промислова власність. – 2014. – №14; заявл. 24.02.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. №14. *(Особистий внесок полягає у розробленні конструкції ССТ).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	34
1.1. Потенціал сонячної енергії для систем теплопостачання.....	34
1.2. Активні системи сонячного теплопостачання.....	38
1.3. Пасивні системи сонячного теплопостачання.....	55
1.4. Комбіновані системи сонячного теплопостачання.....	57
1.5. Методи досліджень сонячних колекторів.....	61
1.6. Аналіз поєднання покрівлі та сонячного колектора.....	63
1.7 . Висновки та постановка завдань досліджень.....	66
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ГЕЛІОПОКРІВЛЕЮ.....	68
2.1. Моделювання акумуляції теплоти системою теплопостачання із геліопокрівлею.....	68
2.2. Вплив вітру на тепловіддачу геліопокрівлі з прозорим покриттям.....	77
2.3. Висновки до розділу 2.....	79
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕЛІОПОКРІВЛІ.....	81
3.1. Ефективність геліопокрівлі в гравітаційній системі сонячного теплопостачання.....	81
3.1.1. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими під теплопоглиначем.....	81
3.1.2. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками контуру циркуляції розташованими під теплопоглиначем	95
3.1.3. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем	100
3.1.4. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками	

контур циркуляції розташованими над теплопоглиначем	107
3.1.5. Зіставлення результатів дослідження ефективності геліопокрівлі в гравітаційній системі теплопостачання.....	112
3.1.6. Вплив вітру на ефективність геліопокрівлі	113
3.2. Ефективність геліопокрівлі у протічній системі сонячного теплопостачання.....	126
3.3. Натурні дослідження ефективності геліопокрівлі	138
3.4. Висновки до розділу 3.....	141
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕЛІОПОКРІВЛІ.....	142
4.1.Опис та принцип роботи геліопокрівлі в якості сонячного колектора.....	142
4.1.1. Геліопокрівля з трубками для теплоносія, розташованими під теплопоглиначем.....	142
4.1.2. Геліопокрівля з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем.....	144
4.2. Використання геліопокрівлі у системах сонячного теплопостачання.....	144
4.3. Метод розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання із геліопокрівлею.....	150
4.4. Техніко-економіні показники геліопокрівлі та сонячних колекторів... ..	156
4.5. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування геліопокрівлі.....	162
4.6. Висновки до розділу 4.....	166
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	167
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	169
Додатки.....	186

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії;
 ПФЕ – повний факторний експеримент;
 СГВ – система гарячого водопостачання;
 ГП – геліопокрівля;
 СК – сонячний колектор;
 СО – система опалення;
 ССТ – система сонячного теплопостачання;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

h – коефіцієнт поглинання;

I_b – інтенсивність потоку енергії, Вт/м²;

K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

m – маса, кг;

R – термічний опір теплопередачі, (м²·К)/Вт;

t – температура, °С;

T – абсолютна температура, К;

α – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині геліопокрівлі, град;

β – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі, град;

δ – кут між напрямком на Сонце та екваторіальною площиною, град.;

θ – кут між напрямком потоку випромінювання та нормаллю до поверхні теплопоглинача, град;

ω – часовий кут Сонця, град;

φ – географічна широта, град.

Вступ

Актуальність теми дослідження. Інтенсивне використання традиційних джерел енергії у світі призвело до появи ряду екологічних проблем, найбільш гострими з яких є збільшення викидів в атмосферу вуглекислого газу та зменшення товщини озонового шару.

Сьогодні, коли зростає вартість традиційних джерел енергії, а запаси їх вичерпуються, першочергово постає питання використання альтернативних або нетрадиційних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, геотермальна, гідроенергія, біоенергія, тощо.

Найбільш потужним джерелом енергії для людства є Сонце, висока активність якого зберігатиметься ще щонайменше 3-4 мільярди років. Кількість сонячної енергії, що потрапляє на Землю, майже в 15 000 разів перевищує потреби населення нашої планети, проте лише незначна її частина використовується на господарські потреби. Найпростішим та ефективним способом використання енергії Сонця, є перетворення її в теплову енергію, для чого використовують сонячні колектори.

На даний час розроблено та використовується значна кількість сонячних колекторів різних конструкцій, що відрізняє їх за техніко-економічними показниками. Переважна більшість геліоколекторів виготовляється у формі плоских конструкцій, площа поверхні яких є визначальним фактором в оцінці кількості як падаючої на неї сонячної енергії так і ефективності перетворення її в теплову енергію. Істотним недоліком всіх плоских колекторів є нестабільність ефективності їх роботи впродовж світлового дня, висока вартість і трудомісткість виготовлення. Крім цього, великорозмірна плоска поверхня прямокутної форми сонячних колекторів призводить до труднощів архітектурної та технологічної прив'язки необхідної кількості такого класу теплоприймачів безпосередньо на спорудах. При цьому створюється додаткове масове навантаження на конструкції споруд, на яких розміщуються сонячні колектори.

Виходячи з цього, широкі перспективи мають розроблення таких інженерно-технологічних рішень, які забезпечують можливість поєднання конструктивних і архітектурних функцій окремих елементів будівель та споруд з одночасним поглинанням ними сонячної енергії і перетворення її в теплову енергію при зниженні матеріальних і трудових затрат.

Із конструктивних елементів будівель особливої уваги на функцію теплопоглинача заслуговують поверхні покрівель з гофрованих металевих листів, що відкриває можливості більш ефективного вловлювання сонячного випромінювання в ранішні та вечірні години. У зв'язку з цим актуальним є розроблення геліопокрівлі, що поєднує функції сонячного колектора та металевої гофрованої частини скатного даху. Така система може бути застосована як в новобудовах, так і на існуючих покрівлях, та інтегруватися в традиційні комбіновані системи сонячного теплопостачання (ССТ).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідних робіт, які виконуються у відповідності з основними напрямками наукової діяльності кафедри «Теплоенергетика, теплові та атомні електричні станції» Національного університету «Львівська політехніка», відповідає Закону України від 1 липня 1994 року №74/94-ВР «Про енергозбереження» і є складовою частиною господарських договорів № 0110U007105, № 0115U004698.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування та розроблення комбінованої системи теплопостачання з геліопокрівлею, створення методу її розрахунку та підвищення ефективності.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати переваги та недоліки існуючих ССТ та конструкцій сонячних колекторів, можливість поєднання покрівлі будинку та сонячного колектора;
- розробити конструкції геліопокрівлі з профільно-гофрованим металевим теплопоглиначем та фізичну модель її роботи у ССТ і на її основі удосконалити математичну модель вловлювання сонячної енергії

геліопокрівлею для визначення термоаккумуляційних властивостей геліосистеми;

- виконати експериментальні дослідження роботи запропонованих конструкцій геліопокрівлі в ССТ з метою визначення їх характеристик;
- на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримати графічні та аналітичні залежності ефективності геліопокрівлі від визначальних факторів;
- розробити методику інженерного розрахунку параметрів ССТ з геліопокрівлею та варіанти її практичного використання;
- обґрунтувати економічну доцільність використання комбінованих ССТ з геліопокрівлею.

Об'єкт досліджень – енерготехнологічний процес отримання сонячної енергії ССТ з геліопокрівлею.

Предмет досліджень – вплив режимних параметрів та конструктивних особливостей енерготехнологічних процесів на ефективність роботи системи теплопостачання з геліопокрівлею.

Методи досліджень. Виконання поставлених завдань здійснювалося сучасними методами фізичного та математичного моделювання. Застосовувались експериментальні та натурні дослідження із подальшим порівнянням отриманих результатів. Достовірність експериментальних досліджень забезпечувалась застосуванням методів планування багатофакторного експерименту з врахуванням ефекту взаємодії факторів та статистичного оброблення їх даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

- за результатами моделювання роботи та експериментальними дослідженнями ССТ з геліопокрівлею отримала подальший розвиток теорія щодо розроблення ефективних способів перетворення сонячної енергії в теплову за рахунок теплопоглиначів, які є конструктивним елементами будівель;

- встановлено взаємозв'язок температури нагрівання теплоносія в процесі

опромінення теплосприймальної металевої поверхні геліопокрівлі за зміни інтенсивності теплового потоку та різної швидкості повітряного потоку, що дає змогу визначити середню теплову потужність ССТ з геліопокрівлею впродовж періоду сонячного опромінення;

- вперше отримано графічні та аналітичні залежності оцінки ефективності комбінованої з геліопокрівлею ССТ від кутів падіння та інтенсивності теплового потоку, швидкості та напрямку вітру для інженерного розрахунку термоаккумуляційних властивостей геліосистеми;

- теоретично та експериментально обґрунтовано можливість застосування геліопокрівлі з профільно-гофрованим теплопоглиначем в ССТ, що зменшує капітальні затрат на такі системи.

Практичне значення одержаних результатів.

На основі узагальнення експериментальних даних та теоретичних залежностей підтверджено можливість та ефективність застосування геліопокрівлі, суміщеної із гофрованим покриттям будівель, що забезпечує зниження вартості отримуваної теплової енергії в ССТ. Такі системи можуть бути використані для вирішення задач впровадження альтернативних джерел енергії як додаткові ефективні джерела тепла при проектуванні дахів як новобудов, так і реконструкції існуючих. Розроблено варіанти конструкцій геліопокрівлі та комбіновану систему теплопостачання, які захищено патентом України на винахід (№ 111910) та 3 патентами України на корисну модель (№ 84945, № 92010, № 92009).

Результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничому цеху НВ ТзОВ «Кокер» у системі комбінованого теплопостачання в технології виробництва керамічних виробів та у навчальному процесі під час викладання дисциплін: «Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії», «Системи теплопостачання та оптимізація їх режимів», «Джерела та системи генерації енергії» (для підготовки бакалаврів спеціальності 144 "Теплоенергетика", для магістрів за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», а також бакалаврів спеціальності 143 «Атомна енергетика»), та при виконанні кваліфікаційних

робіт бакалаврів та магістрів.

Особистий внесок здобувача.

Наукові результати, викладені в дисертації, отримані особисто здобувачем на основі отриманих даних експериментальних досліджень, їх аналізу та математичній обробці. Особистий внесок здобувача полягає у: розробленні конструкцій геліопокрівлі; проведенні теоретичних та експериментальних досліджень роботи геліопокрівлі у ССТ; визначенні впливу кутів падіння та інтенсивності теплового потоку, а також швидкості та напрямку повітряного потоку на ефективність геліопокрівлі та обробленні отриманих результатів; проведенні розрахунків техніко-економічного обґрунтування використання геліопокрівлі в системах тепlopостачання; узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідались і обговорювались на конференціях: VI Міжнародна конференція молодих вчених GAC-2013 "Геодезія, архітектура та будівництво" (Львів, 2013 р.); Международная научно-практическая интернет-конференция "Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства, и муниципальной инфраструктуры" (Харьков, 2013 г.); III міжнародний конгрес "Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування" (Львів, 2014 р.); II Международная научно-практическая интернет-конференция «Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве» (Днепропетровск, 2014 г.); Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів (Київ, 2014 р.); Міжнародна науково-практична виставка-конференція молодих учених та студентів «Інновації у будівництві» (Луцьк, 2014 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» (Вінниця, 2014 р.); I Международная Крымская научно-практическая конференция «Энергоресурсосбережение и экологическая безопасность» (Симферополь, 2014 г.); Всеукраїнська конференція молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (Полтава, 2014 р.); Міжнародна науково-технічна конференція

«Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення» (Рівне, 2015 р.); XV Міжнародна науково-практична конференція «Current issues of civil and environmental engineering and architecture» (Rzeszów, 2015); Міжнародна науково-технічна конференція «ЕкоКомфорт» (Львів, 2016); Міжнародна науково-практична конференція «Енергоінтеграція-2016» (Київ, 2016).

Публікації.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових робіт, зокрема 12 статей у наукових фахових виданнях України (3 одноосібні), 3 статті у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus, Index Copernicus та ін.), 4 у наукових періодичних виданнях інших держав, 7 публікацій у матеріалах вітчизняних та міжнародних конференцій. Отримано патент України на винахід та 3 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 146 найменувань та трьох додатків. Текст наведений на 200 сторінках комп'ютерного набору і містить 63 рисунки, 18 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Актуальним питанням сьогодення є принцип енергоощадливості та раціонального використання енергоресурсів. Перспективним є використання сонячної енергії за допомогою сонячних колекторів. Проаналізовано всі переваги та недоліки сучасних сонячних колекторів та визначено методи підвищення їх ефективності. Вивчено поєднання сонячних колекторів та огорожувальних конструкцій будівлі.

1.1. Потенціал сонячної енергії для систем теплопостачання

З кожним роком усе більше загострюються питання, пов'язані з подальшими шляхами розвитку енергетики. З одного боку, ріст населення та підвищення життєвого рівня людей сприяють нарощення потужностей енергетики швидкими темпами; з іншого боку, екологічні проблеми, що виникають, виснаження природних джерел сировини, у першу чергу нафти та газу, вимагають більш економічного та раціонального використання отриманої енергії.

Розвіданих запасів нафти людству вистачить на 50-100 років видобування, природного газу – на 150-200 років [128]. Запаси вугілля дещо більші, однак, основні його поклади зосереджені на великій глибині (понад 1000 м), що часто призводить до нещасних випадків та збільшує вартість його видобування. Крім того, спалювання викопних палив погіршує екологічну ситуацію на планеті та призводить до виникнення глобального потепління. Паливно-енергетичні ресурси з кожним роком стають дорожчими як для промисловості, так і для населення [117, 118].

Тому виникає необхідність у здійсненні комплексних заходів щодо використання нових нетрадиційних джерел енергії. Вирішення цієї проблеми вимагає істотних змін у світовому енергетичному балансі. Альтернативою у цій сфері є використання нетрадиційних поновлюваних джерел енергії: енергії

Сонця, вітру, надр землі, теплоти промислових та каналізаційних відходів, води тощо [21, 32, 104]. Вони є повністю безкоштовними для людства і даються практично в необмеженій кількості.

Над вдосконаленням та розробленням нетрадиційних джерел енергії працюють багато авторів як за кордоном, так і в Україні [53, 64, 83, 94].

Серед нетрадиційних поновлювальних джерел енергії провідною на даний час є сонячна енергія [18]. Перевагами сонячної енергії є можливості її використання практично на всіх ділянках земної поверхні, безпосереднє перетворення її в теплову чи електричну [42].

Сонячна енергія – це невичерпне відновлюване джерело екологічно чистої енергії. Кількість сонячної енергії, що надходить на земну поверхню, в 10 тисяч разів більша від світового загального споживання енергії [27, 63]. Середньорічна кількість сонячної енергії, яка надходить за 1 день на 1 м² поверхні Землі, коливається від 7,2 МДж/м² на півночі до 21,4 МДж/м² на півдні [64]. Міжнародним енергетичним агентством в 2007 році встановлено, що використання лише 1,5% кількості випромінюваної на нашу планету сонячної енергії забезпечило б всі сьогоденні потреби світової енергетики, а реалізація її до 5% – повністю покрити потреби на перспективу [51].

Клімат України дає потенційну можливість широкого використання сонячної енергії (рис. 1.1). Річний потік сонячного випромінювання на 1 м² горизонтальної поверхні в південних районах України становить 1100-1380 кВт·год, а тривалість сонячного випромінювання – приблизно 2000 год на рік [6].

Кількість сонячної енергії, яка припадає на кожен квадратний метр земної поверхні, залежить від кута нахилу і широти місцевості, пори року, хмарності [148]. Через малу густину падаючої сонячної радіації та зміну її впродовж доби та року її використання утруднене, але цілком перспективне і економічно рентабельне.



Рис. 1.1. Середньорічне надходження сонячної енергії на територію України [6]

Сонячна енергія надходить до Землі у вигляді електромагнітних хвиль, які кількісно характеризуються питомою густиною потоку та вимірюються у Вт/м² [12]. Цю величину також ще називають питомою потужністю, інтенсивністю випромінювання або енергетичною освітленістю. Дані про зміну сонячної енергії протягом дня та року можна отримати з відповідної літератури [5].

Сонце випромінює як тіло, з середньою температурою близько 5762 К електромагнітні хвилі різної довжини, які разом складають сонячний спектр [19]. За довжиною хвилі λ його умовно поділяють на три діапазони: ультрафіолетовий, видимий та інфрачервоний. Перші два діапазони ще називають короткохвильовими, а інфрачервоний – довгохвильовим [12].

На приймач біля поверхні землі сонячна енергія надходить у вигляді трьох потоків: прямого, розсіяного та відбитого від рельєфу та навколишніх поверхонь. Дослідженнями встановлено, що практично вся енергія потоків прямої, розсіяної та відбитої сонячної радіації надходить в область коротких

довжин хвиль, при чому основна частина – на видиму та ближню інфрачервону область спектру [19].

Найбільша щільність потоку сонячного випромінювання, яке надходить на земну поверхню становить 1кВт/м^2 в діапазоні довжини хвиль $0,2 - 3\text{ мкм}$ [19]. Це випромінювання називається короткохвильовим та включає видимий спектр. Довгохвильове випромінювання коливається в діапазоні від 5 до 25 мкм . По спектру короткохвильове і довгохвильове випромінювання знаходяться достатньо далеко один від одного [12]. В прикладних розрахунках найчастіше користуються спектром міжнародного стандарту AM1,5 із загальною інтенсивністю 1000 Вт/м^2 .

Під час проходження сонячного проміння через атмосферу Землі, частина випромінювання розсіюється і поглинається озоном, повітрям та водяною парою, а також частинками пилу, що приводить до послаблення прямого сонячного випромінювання [12, 19]. Частина енергії розсіяної газовими частинками, повертається назад в космічний простір, а основний її потік досягає поверхні Землі у вигляді розсіяного випромінювання. Частка розсіяного випромінювання в загальному потоці сонячної радіації залежить від географічних і кліматичних факторів та змінюється протягом року [136].

Інтенсивність сонячного випромінювання залежить від довжини хвиль, часу доби і напрямку променів [12, 38].

Часто необхідні дані про сонячну енергію відсутні й для цього використовують графічні та аналітичні залежності, які дають змогу вирішувати поставлені завдання. Знаходження та опис таких залежностей описано в багатьох працях [14, 45, 46, 47].

Інтенсивність сонячної радіації I_B , яка надходить на перпендикулярну до напрямку випромінювання поверхню, залежить від широти і може бути знайдена різними методами. При розрахунку I_B для широт $38^\circ - 64^\circ$ придатною є формула [100]:

$$I_B = \frac{Q_0 \cdot \sin h}{\sin h + c} \quad (1.1)$$

де h – висота сонцестояння для даної місцевості в певну годину доби, град; c – емпіричний коефіцієнт, що характеризує прозорість атмосфери; Q_0 – інтенсивність сумарної сонячної радіації за безхмарного неба, Вт/м².

Для широт $0^\circ - 37^\circ$ та $65^\circ - 90^\circ$ ця величина визначається за формулою [100]:

$$I_b = Q_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot \frac{\sin h}{\sin h + c} \quad (1.2)$$

де r_0 – середня відстань від Землі до Сонця, м; r – відстань від Землі до Сонця в певний період року, м.

Середню інтенсивність сонячної радіації I_{cp} , яка падає на розташовану під будь-яким кутом до напрямку випромінювання поверхню, можна знайти за формулою [19]:

$$I_{cp} = I_b \cdot \cos \theta \quad (1.3)$$

де $\cos \theta$ – косинус кута між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні.

Існує багато способів вимірювання сонячної радіації. Вони поділяються на калориметричні, фотоелектричні, фотографічні та візуальні [38]. За калориметричного вимірювання поглинутої сонячної енергії використовується безпосередньо перетворення сонячної енергії в теплову. Явища фотоефекту та фотохімічної взаємодії світла використані для фотоелектричного і фотографічного методів. Для вимірювання сонячної радіації використовують ряд приладів, а саме: радіометр, актинометр Савінова-Янішевського, вакуумний актинометр Калітіна, піранометр Каллендера тощо.

1.2. Активні системи сонячного теплопостачання

Найпростішим способом використання сонячної енергії є перетворення її у теплову [135]. Широко використовують фотоелектричне, фотобіологічне та хімічне перетворення сонячної енергії [63, 102]. Технології для отримання електроенергії із сонячної енергетики постійно вдосконалюються, підвищуються їх оптичні та фотоелектричні властивості [121].

За способом перетворення сонячного випромінювання у теплову енергію, сонячні системи поділяються на активні і пасивні [12].

Системи з активним використанням сонячної енергії – це системи, які базуються на пристроях і механізмах для транспортування теплоносія. Активні системи із механічною циркуляцією ефективні, оскільки для їх застосування використовують існуючі водонагрівні системи, підключаючи до них приймач сонячного випромінювання та насос. Дослідженню та оптимізації таких систем присвячено ряд наукових робіт [4, 15, 20, 33, 62].

Пристрої для ефективного використання сонячної енергії та подальшого її перетворення на тепловий потік називають сонячними колекторами або геліоколекторами [19]. Розроблення та дослідження сонячних установок для потреб теплопостачання проводились достатньо давно [19]. На сьогодні розроблені різні конструкції геліоколекторів, які постійно вдосконалюються [2, 19, 92]. Сонячна енергія використовується не тільки для систем теплопостачання, але і для забезпечення інших технологічних та побутових потреб [129, 140]. Лідером у частці світового використання сонячної енергії для потреб теплопостачання є Китай [139].

За рівнем температури, що досягається, сонячні колектори поділяють на низькотемпературні (до 100°C), середньотемпературні (до 200°C), високотемпературні (понад 200°C). За принципом взаємодії з потоком сонячної енергії їх поділяють на плоскопоглинаючі та фокусуючі. У перших елементи, що поглинають сонячне випромінювання (абсорбери), освітлюються природним потоком, а у других – промені спочатку збирають із великої площі, а лише потім скеровують концентрованим пучком на приймач. Завдяки попередній концентрації випромінювання вдається досягти вищих температур і коефіцієнтів перетворення. Сучасні геліоколектори нерідко поєднують обидва способи нагрівання в одній конструкції [12].

Найбільшого поширення набули колектори плоского типу (рис. 1.2). Вони працюють при прямому і розсіяному випромінюванні та виготовляються у вигляді неглибокого теплоізолюваного корпусу із прозорим покриттям та

поглинаючим елементом на його дні [120]. Сприймаючі елементи колекторів покривають селективно-поглинаючими плівками з високим коефіцієнтом поглинання та малим коефіцієнтом випромінювання. Найкращими з них є покриття з «чорного хрому», «чорного нікелю», закису міді тощо. До переваг плоских сонячних колекторів відносять простоту конструкції та їх відносно невисоку вартість. Недоліками є: відносно невисокий коефіцієнт корисної дії (ККД), порівняно з трубчастими сонячними колекторами, та велика залежність тепла, що виробляється, від періоду світлового дня.

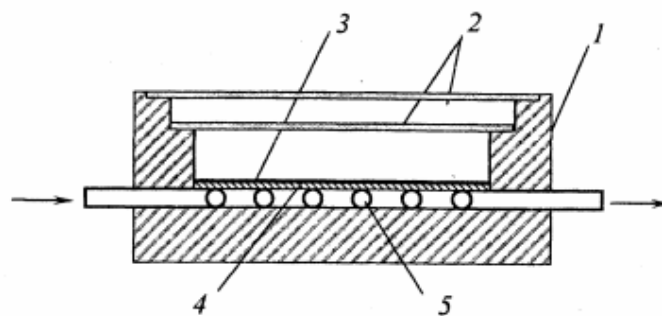


Рис. 1.2. Будова плоского геліоколектора:

1 – теплоізолюючий корпус; 2 – скляне покриття; 3 – селективно-поглинаюче покриття; 4 – мідна теплопровідна пластинка; 5 – трубки для теплоносія

Для отримання максимального ефекту сонячний колектор (СК) розміщують так, щоб сонце освічувало його найдовше [147]. Ухил СК повинен бути на $10-15^\circ$ меншим від географічної широти місцевості [17]. Це дає змогу стабільно нагрівати теплоносії до температури $50-60^\circ\text{C}$ і щорічно економити 120-180 кг умовного палива за використання 1 м^2 поверхні сонячного колектора.

Теплота нагрітої поверхні передається металевій підкладці – теплопоглиначу, коефіцієнт поглинання якого досягає 90% [15, 16], а від неї – теплоносію, що протікає через контактуючі трубки. Найефективнішим металом для теплопоглинача є мідь та алюмінієві сплави [39]. Варіанти конструкцій теплопоглинальних панелей можуть бути різними (рис. 1.3) залежно від умов експлуатації, економічних вимог тощо. Нанесення на поверхню теплопоглинача склоемалевого покриття збільшує термін його служби [98].

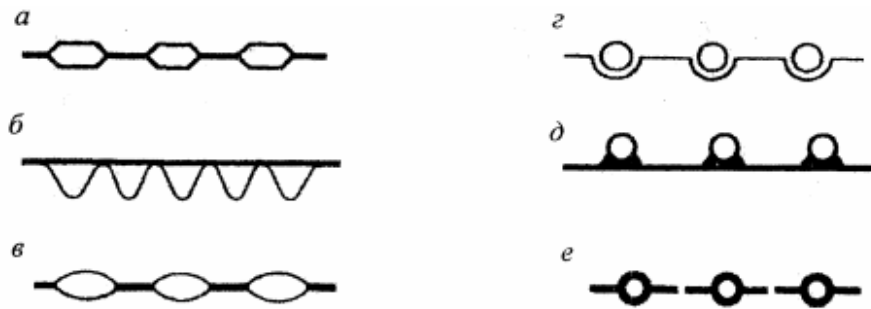


Рис. 1.3. Конструкції теплопоглинальних панелей:

а – стандартний панельний опалювальний радіатор; б – контактно-приварені плоский і гофровані листи; в – прокатно-зварна алюмінієва панель; г – реєстр із труб з об'ємно-контактуючим листом; д – шовно-зварені труби з листом; е – реєстр труб із поздовжніми ребрами

Для підвищення ефективності теплопоглиначів важливим є збільшення його поверхні шляхом збільшення шорсткості та площі поверхні, що дає змогу забезпечити вищу поглинальну здатність, турбулізацію повітряного потоку (у випадку, коли теплоносієм служить повітря) та більшу площу контакту теплоносія з абсорбером. На сьогодні опубліковано багато праць, присвячених дослідженню та вдосконаленню конструкцій сонячних колекторів [50, 68, 69].

Відомий сонячний колектор, в якого абсорбер виконаний у вигляді реєстра, з розміщених поряд, паралельних полімерних трубок [39]. Таке виконання абсорбера дало змогу суттєво знизити вартість сонячного колектора.

Використання прозорого покриття в колекторах зумовлене необхідністю захисту абсорбуючої поверхні від пилу та механічних пошкоджень, а також зменшення тепловтрат шляхом конвекції та випромінювання. Для цих цілей переважно використовують листове скло. Показником якості скла для геліоколекторів є його прозорість, яка визначається коефіцієнтом пропускання τ . Для сонячних колекторів використовують спеціальне скло з малим вмістом заліза та солей і високим коефіцієнтом пропускання ($\tau = 0,90 \dots 0,95$) [16]. Недоліком плоского скляного покриття є залежність пропускну здатності від кута падіння світла [113]. На сьогоднішній день поширеним є скло Centros Solar Glas, Diamat, в яких коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання відповідно становить 96% і 91%.

Сучасні тенденції вибору захисної оболонки колектора у виді світлопрозорого покриття, полягає у більш ефективному зборі сонячного випромінювання без змін кутів установки сонячних колекторів. Наприклад, використовують світлопрозоре покриття, яке крім стандартного плоского скла, являє собою набір фокусуєчих скляних призм, що збільшує кількість прийнятого випромінювання [65]. Недоліком такого рішення є ускладнена технологія виробництва скляних призм, що веде до збільшення вартості колектора. Крім того, зростає маса колектора, а надійність його зменшується.

Ефективність прозорого покриття геліоколектора підвищують нанесенням на них тонких плівок. Розроблені процеси обробки поверхні скла для зниження його відбиваючих властивостей [19]. Відбиваюча здатність однієї поверхні необробленого скла, по відношенню до сонячного випромінювання, становить 0,0434 (показник заломлення 1,526). Обробка поверхні скла шляхом хімічного травлення може вдвічі знизити відбиваючу здатність до меншого значення ($\sim 0,02$). Збільшення пропускнуої можливості скла від 0,92 до 0,96 дохволяє досягнути значного підвищення теплових характеристик плоских сонячних колекторів. Однак вартість обробки великих поверхонь скла є високо затратною операцією, що значно підвищує вартість самого сонячного колектора.

Сонячна енергія ефективно перетворюється у теплову в колекторах з вакуумованими приймачами [6, 12, 97]. При цьому захисну функцію прозорого покриття виконують прозорі скляні трубки, в середині яких знаходяться трубчаті теплопоглиначі з селективним покриттям. Завдяки вакуумному простору між захисними скляними трубками та світлоприймальними елементами забезпечується зниження до мінімуму тепловтрат в навколишнє середовище та у зв'язку з цим та передача теплоносієві практично всієї поглинутої колектором енергії. Завдяки круглій геометрії прозорого покриття знижуються також тепловтрати від конвекції [19]. Для підвищення ефективності таких геліоколекторів систему трубок поміщають у фокусуєчі жолоби (рис. 1.4). Вдосконалюються також конструкції світлопрозорих

елементів. На сьогодні відомі різноманітні конструкції абсорбера сонячного трубного вакуумного колектора та детально описані їх дослідження [100].

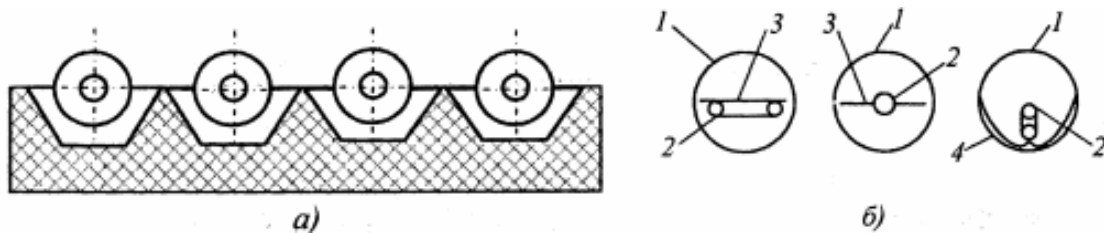


Рис. 1.4. Поперечний переріз трубного геліоколектора (а) та конструктивні рішення їх світлосприймальних елементів (б):

1 – зовнішня скляна оболонка; 2 – трубка з теплоносієм; 3 – світлопоглинальна підтримувальна пластина; 4 – світловідбивальне покриття

Трубкові сонячні колектори мають найвищий коефіцієнт засвоєння сонячної енергії і можуть ефективно працювати навіть за хмарної погоди. Крім того вони характеризуються низькою залежністю їх продуктивності від орієнтації та кута нахилу сонячного випромінювання, проте мають низький оптичний ККД. Основним недоліком трубчастих сонячних колекторів є їх висока вартість, зумовлена складною технологією виготовлення.

Розроблені також конструкції сонячних колекторів з використанням теплових труб [64]. Теплова труба являє собою вакуумний герметичний пристрій у вигляді труби або плоского каналу, частково заповненого робочою рідиною. Під час підведення теплоти рідина в одній частині теплової труби – у випарній зоні – випаровується і утворена пара переноситься в зону відведення теплоти, де вона конденсується, і рідина повертається в зону випаровування. В якості робочих рідин може використовуватись дистильована вода, ацетон і холодоагенти для низьких температур.

На сьогоднішній день найширше розповсюджені трубні сонячні колектори з мідними тепловими трубками. Вони надійні та довговічні в експлуатації. Однак, одним з їх недоліків є неякісне забезпечення контакту оболонки теплової труби з теплопоглинальною поверхнею. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати алюмінієві теплові труби [91]. Технологія виготовлення таких теплових труб дає змогу одночасно отримувати як циліндричну оболонку теплової труби, так і заодно з нею, плоску

теплопоглинальну поверхню. Це дає змогу спростити і здешевити процес виготовлення СК, а також підвищити його гідравлічні та теплотехнічні характеристики.

Як теплоносій в геліоустановках в основному використовують воду або спеціальні розчини, такі як «Тосол», «Осол», «Арктика» [72]. Останні, проте, є причиною інтенсивної корозії. Наприклад, «Тосол» немає інгредієнтів, що попереджують відкладення з води солей твердості у теплообмінних трубах, для очищення яких необхідні спеціальні розчини та допоміжні технологічні операції. Найрозповсюдженішим теплоносієм у геліосистемах є вода, проте вона має деякі негативні властивості, а саме: підсилює корозію; містить різноманітні солі, які відкладаються на поверхні теплообмінних труб. Крім того, у теплій воді активно розмножуються мікроорганізми, що значно погіршує теплообмін. Геліосистеми заповнені водою, замерзають за низьких температур і на їх відновлення необхідні великі кошти.

Відомим є рідкий теплоносій [72], що містить гліцерин, воду і додатково суміш глюконату кальцію та борної кислоти (1:1), консервуючу добавку на основі сульфату міді чи бензойної кислоти або протимікробну. Такий комплексний склад дає змогу отримати рідку композицію теплоносія для геліоустановок і геліосистем з низькою температурою замерзання та високою температурою кипіння, у поєднанні з пожежною безпекою та екологічною чистотою.

Також поширені СК, в яких тепловідвід здійснюється потоком повітря. Вони відрізняються конструктивним виконанням абсорбуючої поверхні та способами її обдування [100]. Поглинальна поверхня може виконуватись з плоского, оребреного чи гофрованого металевого листа, набору паралельних напівпрозорих скляних пластин, об'ємної сітки чи пористої насадки. Повітряні колектори значно дешевші від рідинних і не потребують додаткового захисту від замерзання теплоносія. Як абсорбер повітряного колектора найдоцільніше використовувати гофрований металевий лист, який ефективно поглинає сонячні промені та має велику площу контакту з теплоносієм. Нагрівачі цього типу

часто виготовляють з шорховатими прийомними поверхнями або з пористими чи сітчатими прийомниками [100]. При цьому доцільно також встановлювати турбулізатори потоку між прозорим покриттям та теплопоглиначем [12], які дають змогу збурити потік повітря та, відповідно, збільшити його тепловіддачу.

Відома конструкція, в якій абсорбер повітряного СК виконано із чорної пластини, що виконана у виді плісированої тканини [65]. В місцях перетинів абсорбер оснащений отворами для проходу повітря. Це дає змогу збільшити площу поверхні абсорбера, а при проході потоку повітря через отвори в місцях перетинів пластини абсорбера він турбулізується. Проте така конструкція повітряного колектора обумовлює високу металоємність та вагу в цілому.

Запропоновано також абсорбер у вигляді чорної пластини, робоча поверхня якої являє собою капілярну структуру [19]. Виконання поверхні абсорбера у вигляді капілярної структури переслідує ціль збільшити ступінь його чорноти і тим самим посилити поглинання випромінювання та в якійсь мірі турбулізувати потік повітря за рахунок збільшення шорсткості його поверхні. Проте затрати на виготовлення розвиненої капілярної структури набагато більші, ніж отримана вигода від збільшення ефективності такого сонячного колектора.

Ефективним є виконання абсорбера у вигляді чорних кульок, розміщених всередині сітчастої оболонки [65]. Сама оболонка закріплена у внутрішньому просторі корпусу таким чином, що випускний патрубок нагнітає повітря під сітчасту оболонку з кульками, після чого повітря проходить через неї між кульками та виходить через випуклий патрубок, розміщений під оболонкою. Повітря, проходячи через оболонку, створює всередині неї «киплячий шар» з кульок.

ККД сонячного колектора становить в середньому 70 % і залежить від температури навколишнього середовища, густини потоку сонячної енергії та температури, до якої необхідно нагріти воду в колекторі [16].

ККД колектора сонячної енергії η визначається ефективним коефіцієнтом тепловтрат K_k та його ефективним оптичним ККД η_0 [19, 30]:

$$\eta = \eta_0 - K_k \cdot (T_{\text{вх}} - T_3) / I_{\text{в}} \quad (1.4)$$

де $I_{\text{в}}$ – інтенсивність потоку сонячної енергії, яка надходить на сонячний колектор, Вт/м²; K_k – ефективний коефіцієнт тепловтрат сонячного колектора, Вт/(м²·К); $T_{\text{вх}}$, T_3 – відповідно температура теплоносія на вході в сонячний колектор та температура навколишнього середовища, К.

Наведена вище формула дає миттєве значення ККД сонячного колектора, яке може бути прийняте середнім для даної години доби.

Найвагоміший вплив на ККД сонячного колектора мають такі фактори:

1. Інтенсивність сонячної енергії та температура навколишнього середовища;

2. Конструктивні характеристики сонячного колектора і властивості теплопоглинача, зокрема матеріал і товщина листа, товщина і коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції, крок труб, пропускна здатність скла;

3. Робочі параметри СК – витрата теплоносія і його температура на вході.

Вітер, пил та затінення значно зменшують ККД сонячного колектора. При кутах нахилу колектора 0-50° вплив забруднення може досягати 5% [19]. Коли сонячне проміння надходить не по нормалі, елементи конструкції можуть загороджувати шлях сонячній радіації, що відповідно зменшує ККД СК.

Для підвищення ефективності сонячного колектора важливим є знайти такі оптимальні кути його встановлення, при яких буде отримано максимально можливу кількість поглинутої сонячної енергії [3, 49, 57, 109]. Зміна азимута $\gamma_{\text{в}}$ чи кута нахилу робочої поверхні колектора $\beta_{\text{в}}$ на $\pm 30^\circ$ незначно впливає на повну величину зібраної енергії [108, 111]. Значно більший вплив на кількість поглинутої енергії має одночасна зміна кутів нахилу та азимуту колектора по відношенню до падаючого теплового потоку, що відображається на ефективності як колектора, так і геліоустановки в цілому (рис. 1.5) [13, 77, 109].

Відомий аналіз результатів досліджень, які показують, що застосування дельта систем, замість традиційних, дає змогу продовжити ефективне використання сонячних систем теплопостачання (ССТ) в середньому на 1,5 год в добу [55, 56].

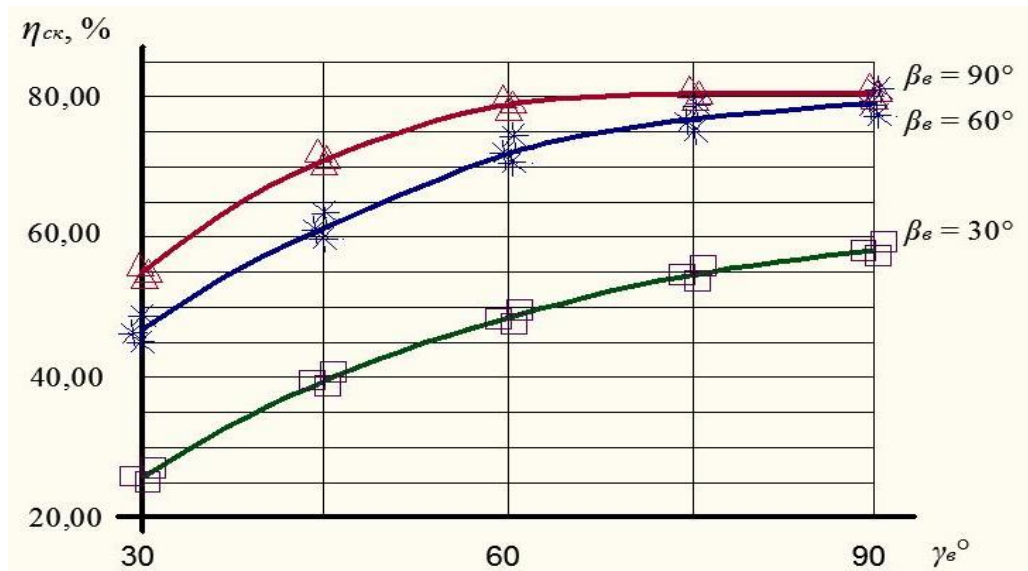


Рис. 1.5. Ефективність плоского сонячного колектора $\eta_{ск}$ в залежності від кутів падіння теплового потоку γ_v і β_v за інтенсивності випромінювання $I_v = 900 \text{ Вт/м}^2$ [109]

Ефективніше сонячну енергію вловлюють потрійно-орієнтовані СК [49]. Вони дають змогу додатково отримувати сонячну енергію в ранішні години та більше її закумуляувати до обіду. Також такі рішення дозволяють довше отримувати сонячну енергію порівняно із південно-орієнтованими СК. Результати зміни інтенсивності потоку сонячної енергії I_c впродовж дня за її надходження на систему СК потрійної орієнтації зображені на рис. 1.6.

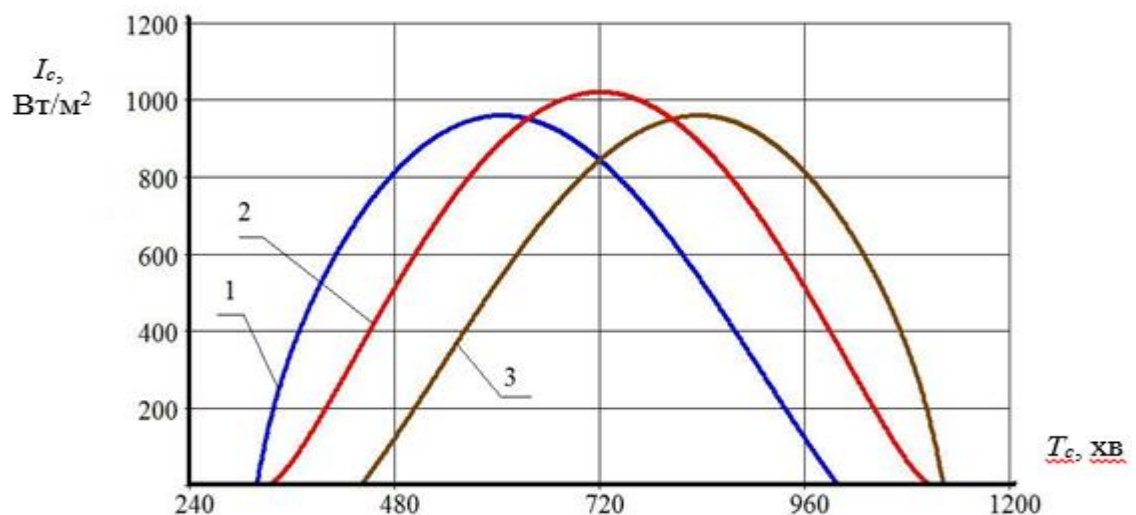


Рис. 1.6. Зміна інтенсивності сонячного випромінювання I_c впродовж світлового дня за її надходження на систему геліоколекторів потрійної орієнтації:

1 – східно-орієнтований геліоколектор; 2 – південно-орієнтований геліоколектор; 3 – західно-орієнтований геліоколектор [110]

За порівняння різних матеріалів, які використовують для виготовлення теплопоглинача, встановлено, що зі збільшенням товщини теплопоглинача та його коефіцієнту теплопровідності значення ККД колектора зростає [19].

Значний вплив на ККД СК має температура теплоносія на вході в колектор, адже чим вона нижча, тим і нижчі тепловтрати та вищий ККД.

За збільшення витрати теплоносія ККД сонячного колектора зростає до певної межі, а потім залишається сталим так, що існує оптимальний діапазон значень витрат теплоносія [19].

Ефективність СК значно зростає під час використання на теплоприймній поверхні селективно-поглинального матеріалу, який добре поглинає видиму частину сонячного спектру і практично не випромінює в інфрачервоній області спектра [16, 115]. Селективні покриття для теплопоглиначів повинні мати високий коефіцієнт поглинання, низьку випромінювальну здатність, стабільну величину значення селективності, витримувати короткотермінове перегрівання поверхні, мати хорошу корозійну стійкість.

Найпоширенішим типом селективного покриття є тонкі плівки на металічній основі, які поглинають видиме світло та інфрачервоне випромінювання. Сюди, зокрема, відносяться покриття з чорного нікелю та чорного хрому, які наносяться електрохімічним способом. Покриття чорним хромом найперспективніше для отримання необхідних оптичних властивостей і високої термічної стабільності, проте його вартість є високою. Виготовлення селективних поверхонь обходиться дорожче, ніж звичайне фарбування теплопоглинача в чорний колір. Завдяки цьому, а також через невеликий коефіцієнт поглинання за невисоких температурах такі поверхні недоцільно використовувати для теплопоглиначів, які працюють при температурі нижче 60°C [100].

Запропоновано селективне покриття на основі чорного алюмінію, отриманого шляхом реактивного (в суміші з киснем і аргоном) розпилювання алюмінію у вакуумі [16]. Проведені дослідження показали, що таке покриття

дає змогу підвищити ККД сонячного колектора на 18-22%, а коефіцієнт поглинання становить більше 95%.

Природний потік сонячної радіації посилюють за допомогою концентраторів [64, 138] (рис. 1.7), збірних лінз, оптичних клинів у вигляді тригранної призми з повним внутрішнім відбиванням [12], фокусуємих клинів тощо. Підвищенню ефективності сонячних колекторів шляхом концентрації сонячної енергії присвячено багато наукових досліджень [61, 130]. Основне функціональне призначення концентруючих систем, загалом, є підвищення інтенсивності сонячного випромінювання до рівня, який забезпечує його економічне та ефективне перетворення в необхідну енергію [38, 114]. Використання фокусуємих концентраторів дає змогу досягнути високих температур ($\geq 700^{\circ}\text{C}$) з залученням поглинутої енергії в теплових двигунах з високим ККД [100]. Відбивними концентраторами є дзеркала та поверхні параболоїдної форми із спеціальних матеріалів [31, 122].

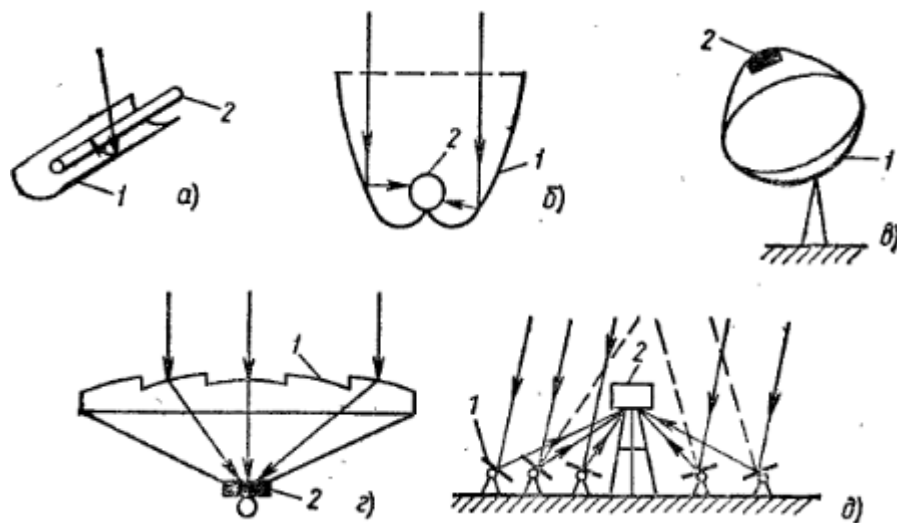


Рис. 1.7. Концентратори сонячної енергії [100]:

а – параболоциліндричний концентратор з трубчастим прийомником випромінювання; б – фоклін, в – параболічний концентратор; г – лінза Френеля; д – поле геліостатів з центральним прийомником випромінювання; 1 – відбивач; 2 – прийомник випромінювання

Заслуговує уваги сонячний колектор з рухомим параболічним концентратором, який керується за двома координатами під час стеження за Сонцем [12]. Дзеркала відбивають близько 92% падаючого на них сонячного

випромінювання, яке фокусується на невеликій площі. У фокусі відбивача на кронштейні закріплений двигун Стірлінга. В якості робочого тіла в двигуні Стірлінга використовують водень, або гелій.

Пропонується також використання параболоциліндричних концентраторів у вигляді напівциліндричного жолоба, внутрішня дзеркальна поверхня якого описується рівнянням параболи [19]. Сонячні промені в ньому фокусується вздовж осі, яку утворює множина фокусних точок уздовж жолоба. Їх недоліком є зміщення точки фокусування у разі зміни кута падіння сонячних променів, що вимагає постійної орієнтаційної корекції параболоциліндричного концентратора.

Для охоплення великої площі потоку сонячної енергії в потужних нагрівальних установках використовуються так звані фацетні концентратори [12], які складаються з багатьох дзеркал. Використовуються параболічні дзеркала з великим радіусом кривизни, у яких фокусна віддаль співрозмірна з поперечним перерізом. Зокрема, у сонячних електростанціях кількість дзеркал досягає декількох сотень, а орієнтація кожного з них коректується відповідно до руху Сонця.

Достатньо ефективним є використання геліоколекторів, оснащених фокліновими концентраторами. Фоклін – рідинний геліоприймач, який суміщає властивості плоских та концентруючих систем [108], в яких для концентрації сонячного випромінювання використовують дзеркала або лінзи, які спромовують сонячні промені в круглу або подовжену фокальну пляму чи в фокальну смугу.

Для збільшення ефективності ССТ також вдаються до використання додаткових технічних елементів. Запропонований геліоприймач з концентратором, у фокусі якого розміщений випаровувач термосифону, що слугує абсорбером [65]. Конденсатор цього термосифона, виконаний у вигляді плоского ребра, слугує для нагрівання теплоносія. До недоліків цього рішення можна віднести наявність концентратора і термосифона, що збільшує вартість та ускладнює конструкцію колектора.

На даний час досить поширеними є сонячні колектори, оснащені пристроями слідкування за Сонцем [132]. Запатентовано СК обладнаний пристроєм добового обертання з годинниковим механізмом [76]. Для слідкування за Сонцем колектор обладнаний двома коригуючими пристроями, перший з яких в автоматичному режимі змінює кут нахилу рами скла впродовж доби, а другий – кут її нахилу протягом півріч. Пристрої виконані у вигляді ексцентриків, закріплених на валах, установлених на рухомому кронштейні та розміщеному між основою і рамою скла. Це дає змогу впродовж року використовувати оптимальну орієнтацію сонячного колектора та забезпечити пряме попадання на нього променів сонячної радіації.

Незважаючи на вказані позитивні характеристики геліоколекторів з концентраторами сонячної енергії, тривала та ефективна експлуатація таких систем пов'язана із багатьма труднощами, пов'язаними першочергово з окисненням, забрудненням, стиранням дзеркальних поверхонь. У зв'язку з цим більш виправданим залишається використання удосконалених плоских СК.

Відомі результати досліджень, які показують, що ССТ із плоскими сонячними колекторами не повинна безперервно слідкувати за Сонцем, а достатньо декілька переорієнтацій сонячних колекторів впродовж світлового дня для отримання максимально можливої енергії [116, 145].

Також доцільно збільшення площі поглинання пластини завдяки виконанню її у вигляді півкульових лунок [78]. Це дає змогу суттєво збільшити ефективність сонячного колектора.

Запатентовано сонячний колектор, в якого корпус має напівсферичну форму, а абсорбер виконаний у вигляді гофрованої труби, яка розташована у корпусі спіралеподібно, контактуючи з внутрішньою поверхнею півсфери, а як теплоносії використана рідина, фізико-хімічні властивості якої відповідають матеріалу труби у відношенні антиагресивності [79]. Це дає змогу підвищити ККД сонячного колектора завдяки зниженню теплового напору. Проте, в таких сонячних колекторів неефективно використовуватиметься сонячна енергія впродовж дня [110].

Як ефективний метод зниження втрат теплоти в СК пропонується застосування прозорої сотової структури [106], яка знаходиться між заскленням і теплопоглинальною поверхнею та забезпечує зменшення конвективного і частково променистого теплообміну. За конструкцією структура соти складається з подовгуватих чарунок круглого, прямокутного чи шестикутного перерізу, виготовлених зі скла чи пластмаси. Матеріал для чарунок повинен мати невелику товщину (0,5 мм), низький коефіцієнт теплопровідності та низьку питому теплоємність. Діаметр чарунок не повинен перевищувати 5 мм. Матеріал чарунок повинен витримувати високі робочі температури.

На сьогоднішній день поширеними є сонячні колектори з полімерних матеріалів, що забезпечують зниження ваги і вартості сонячного колектора та геліосистеми в цілому завдяки виключенню металів з конструкції. Порівняльними дослідженнями теплової ефективності сонячних колекторів з алюмінієвими та полімерними абсорберами доведено, що полімерний СК за ефективністю лише незначно поступається металевому, маючи при цьому значно меншу вартість [39].

Існує значна кількість полімерів, які можуть використовуватись в конструкції плоского сонячного колектора – поліпропілен, полікарбонат, полісульфон, поліамід, аморфний поліамід, волокнисті пластики, полівінілхлорид, поліметилпропілен, акрил [24].

Доцільно використовувати полімерний сонячний колектор, який виготовляють із плити, що має сотову структуру. В якості абсорбера та прозорого покриття в ньому використовується полімерна плита [25]. Такий СК являє собою колектор з двома прозорими покриттями, що суттєво знижує величину сумарного коефіцієнта тепловтрат. Характеристики таких колекторів поступаються характеристикам традиційних сонячних колекторів на 7...14%, але невелика маса та зниження вартості роблять їх перспективними.

Ефективним є виготовлення сонячних колекторів на основі стільникових багатошарових полікарбонатних плит [19], оскільки полікарбонат стійкий до багатьох хімічних речовин, кислот, солей. Плита стільникового полікарбонату

являє собою паралельні листи з поперечними перегородками в цілісній структурі.

Були проведені дослідження оптимальної товщини захисного прозорого покриття полімерного сонячного колектора та доведено, що використовувати СК з товщиною прозорого покриття більшою, ніж 40 мм недоцільно [39]. При цьому було проаналізовано вплив вітру на ефективність полімерного сонячного колектора. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що під дією вітру (при швидкості 1-5 м/с) ефективність полімерного сонячного колектора зменшується менше, ніж ефективність звичайного сонячного колектора – відповідно на 20 та 33%.

Використовуються безтрубні сонячні водонагрівачі лоткового типу [100]. Особливістю їх є поперекове розташування на дні вкорочених перегородок через один ряд, таким чином, що забезпечується зигзагоподібний рух води. Це дає змогу підвищити ККД сонячного колектора, скоротити час нагріву води та зменшити вартість конструкції. При заданому ухилі дна лотка забезпечується потрібна швидкість води.

Оскільки існує невідповідність у часі між надходженням сонячної енергії та її споживанням виникає необхідність у використанні акумуляторів тепла [67, 73, 74, 112, 141]. Потік сонячної енергії змінюється за добу від нульового значення, в нічний час, до максимального значення в полудень (рис. 1.8.,а). Оскільки потужність системи опалення максимальна в грудні-січні, а надходження сонячного випромінювання в цей час невелике (рис. 1.8.,б), для забезпечення теплоспоживання Q необхідно вловлювати сонячної енергії E , більше, ніж потрібно на цей час E_1 , а її надлишок E_2 накопичувати в акумуляторі теплоти. Кількість енергії яка акумулюється може бути розрахована при короткостроковому акумулюванні на кілька годин або діб та на кілька місяців – при сезонному акумулюванні. У цілому ж застосування акумулятора теплоти підвищує ефективність геліосистеми та надійність теплопостачання.

Акумулятор теплоти повинен відповідати таким вимогам [19, 137]:

- сприймати енергію з максимальною інтенсивністю без надмірних різниць температур;
- віддавати енергію по можливості з максимальною інтенсивністю;
- мати невисокі втрати теплоти;
- витримувати велику кількість циклів без значного зниження потужності.

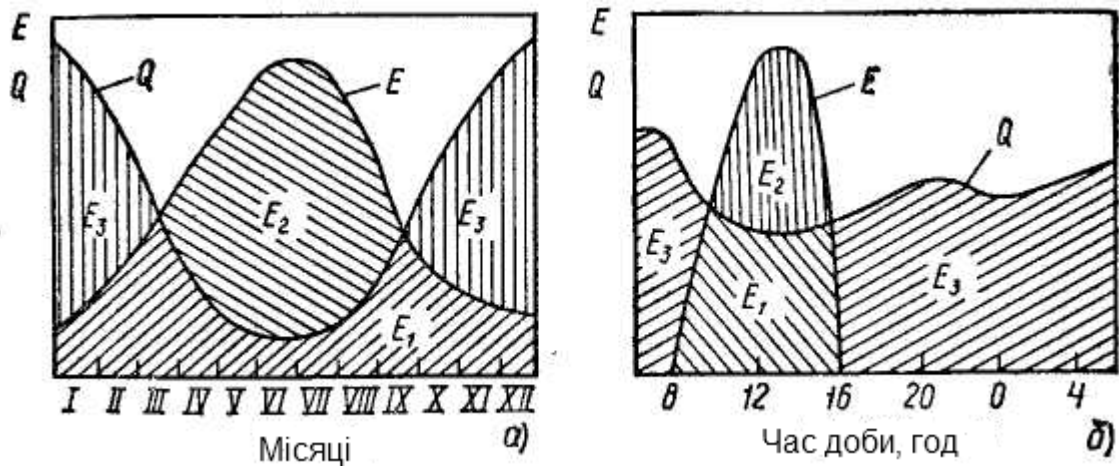


Рис.1.8. Потік сонячної енергії впродовж [106]:
 а – року; б – доби: E – кількість поглинутої сонячної енергії;
 Q – теплове навантаження на систему теплопостачання

Найпоширенішими є водяні акумулятори теплоти [24]. Такі акумулятори можуть працювати з природньою та механічною циркуляцією. У повітряних ССТ часто використовують пористі теплоакумулятори [40]. У них теплота акумулюється масивним об'ємом дрібного каміння за постійного вентилявання теплоносієм. Пористі теплоакумулятори дешевші від водяних, проте займають втричі більший об'єм і їх важче вписати в інтер'єр будинку.

Поширені також ґрунтові акумулятори теплоти [51], в яких завдяки теплоємності засипки (піску, каміння тощо) відбувається акумулювання теплової енергії з поступовою зміною її температурних полів. Перевагою таких акумуляторів є відносно невисокі затрати на спорудження вказаних систем. Проте, вони характеризуються відносно високими тепловими втратами, які значною мірою залежать від розмірів і форми акумуляторів, а також рівня температур та теплоізоляційних характеристик ґрунту.

Найкомпактнішими є теплоакумулятори фазового переходу [12, 119]. У них теплова енергія акумулюється у вигляді прихованої теплоти фазового

переходу або поліморфного переходу кристалічної речовини. Робочим тілом акумуляторів фазового переходу найчастіше є парафін або евтектичні сплави металів чи солі.

Сьогодні для підвищення енергетичної ефективності водонагрівальних сонячних колекторів розроблені сонячні колектори з фотоелектричними панелями, які забезпечують отримання електричної енергії, якої вистачає для приводу циркуляційного насосу. Однак, недоліком таких колекторів є висока вартість та складність конструкції.

1.3. Пасивні системи сонячного теплопостачання

Системи з пасивним використанням сонячної енергії – це такі системи, конструкції яких базуються на принципі вільної конвекції. Для передачі теплоти не використовуються машини та механізми. У пасивній системі сонячного теплопостачання сама конструкція будівлі виконує роль сонячного колектора. Сонячна радіація, що падає на стіни, вікна, дах та інші поверхні, поглинається будівлею і зберігається у вигляді акумульованої теплоти.

Для опалення використовують такі типи пасивних систем [12]:

- з безпосереднім засвоєнням випромінювання, яке надходить у внутрішні приміщення через засклені поверхні, розташовані з південної сторони;
- з непрямим вловлюванням сонячного випромінювання спеціальною термоакумуючою стінкою, розташованою за заскленим фасадом – стіною Тромба-Мішеля;
- з контуром конвективної циркуляції повітря і пористим теплоакумулятором.

Пасивні системи можуть бути відкриті та закриті [95]. У відкритих системах сонячна енергія проникає безпосередньо в приміщення, а в закритих – потік сонячної енергії поглинається теплоприймачем.

Перевагами пасивних систем є те, що вони досить прості у виконанні та дешеві. Проте вони мають і ряд недоліків: складно передати тепло у приміщення, які віддалені від теплопоглинача, нерегулярність і значні перепади

надходження теплоти, що вимагає додаткового затінення влітку та заходів до зменшення радіаційних втрат взимку чи нічний час.

Для зменшення тепловтрат північна сторона будівлі повинна мати мінімальну висоту, без віконних прорізів, з подвійними тамбурами [131, 135]. Південну сторону роблять максимальної висоти і повністю засклену. Передбачають також посилену теплоізоляцію. Для зменшення нерівномірності надходження сонячної теплоти частину заскленої поверхні використовують для природного освітлення, іншу ж її частину – для нагрівання чорних стінових панелей, які знаходяться за склом. За рахунок циркуляції повітря відбувається відведення тепла від стінових панелей і додаткове нагрівання повітря в приміщенні.

До матеріалів, які поглинають і зберігають теплоту, відносять: бетонні плити підлоги, кам'яні стіни і інші будівельні матеріали [135]. Вони є основними елементами в будинках, що пасивно використовують сонячну енергію. Поширеними є системи, в яких використовують спеціальні елементи для накопичення теплоти, вмонтовані в конструкцію будівлі (наприклад, заповнені водою баки або ящики з камінням). Для припинення нагрівання приміщень в теплу пору року використовують сонцезахисний пристрій, який перешкоджає доступу сонячних променів на світлопропускаючу загорожу (дашки, ролети, тенти, штори) [70].

До пасивних систем відносяться парники і теплиці, чорні баки, резервуари для підігрівання води влітку, засклені веранди і лоджії, а також зимові сади, прозора конструкція яких представляє собою "теплову пастку" і дає додаткову житлову площу для розміщення зелені, куточка відпочинку або басейну [106]. Раціональне застосування пасивних систем сонячного опалення дає економію 30-40% від загальних витрат теплоти на традиційне опалення будівель.

Відомі дослідження теплової ефективності опалювально-вентиляційних систем будинків із пасивним сонячним теплонадходженням [58]. Пасивне сонячне теплопостачання часто використовується для обігрівання теплиць. Такі

системи можуть містити акумулятори теплоти та канали циркуляції повітря, як теплоносія. Існує ряд методів розрахунку таких систем. Широкого застосування такі системи знайшли для сушіння матеріалів, для чого розроблено геліосушарки та методи їх розрахунку [40, 59], а також для опріснення морської води. Сьогодні в світі працює більше 50 потужних установок для опріснення води загальною площею більше 50 тис. м² [101].

Важливим елементом пасивних сонячних систем є акумулювання енергії. Акумулятор теплоти необов'язково повинен бути з'єднаний з сонячним колектором. Він може бути розміщений окремо в будівлі. Акумулятор теплоти може розміщуватись під підлогою в плитах перекриття або у внутрішніх перегородках. Теплоносій через перекриття або стіни передає теплоту воді, яка розміщена біля акумуляторів у великих ємностях. По можливості акумулятор теплоти повинен розміщуватись в приміщенні, яке повинно опалюватись або охолоджуватись.

Оптимальна ширина проміжку між прозорим покриттям і стіною, яка є акумулятором теплоти, повинна бути 50-125 мм [106]. Однак, в деяких комбінованих пасивних сонячних системах цей проміжок може бути збільшений і використовуватись як хол, вестибюль або теплиця.

Пасивні сонячні колектори повітряного типу можуть розміщуватись у віконних пройомах існуючих вікон. Проте, для помітної економії енергії вони не є ефективними, оскільки для цього необхідно колектори великих розмірів.

1.4. Комбіновані системи сонячного теплопостачання

Системи сонячного теплопостачання призначені для перетворення сонячної енергії в теплову, її термоакумуляції та подачі споживачу. Схемних рішень таких систем є дуже багато, але всі вони повинні складатись з основних елементів – теплопоглинач, термоакумулятора (бака-акумулятора) теплоносія і теплоспоживача. На сьогоднішній день існує велика кількість схемних рішень із використанням комбінованих систем сонячного теплопостачання у пасивних будинках [130, 137].

Під час спорудження ССТ з використанням сонячних колекторів велика частина їх вартості припадає саме на сонячні колектори. Збільшення їх площі не лише забезпечує більшу частку заміщення сонячної енергії, але і призводить до збільшення та подорожчання сонячної установки. Підвищенням ефективності використання сонячних колекторів та системи в цілому можна досягнути зменшення вартості систем сонячного теплопостачання. Саме тому багато авторів пропонує комбіновані ССТ [19, 22, 37, 44, 75, 77, 100].

Сонячні установки доцільно поєднувати з сучасними енергоощадними системами теплопостачання. До найперспективніших можна зарахувати гібридні системи у складі сонячної водогрійної та теплонасосної установок (рис. 1.9) [13, 52, 54, 93]. Остання використовує низькопотенційне тепло ґрунту або теплових викидів і регенерує його до високої температури в оберненому термодинамічному циклі з використанням енергії мережі.

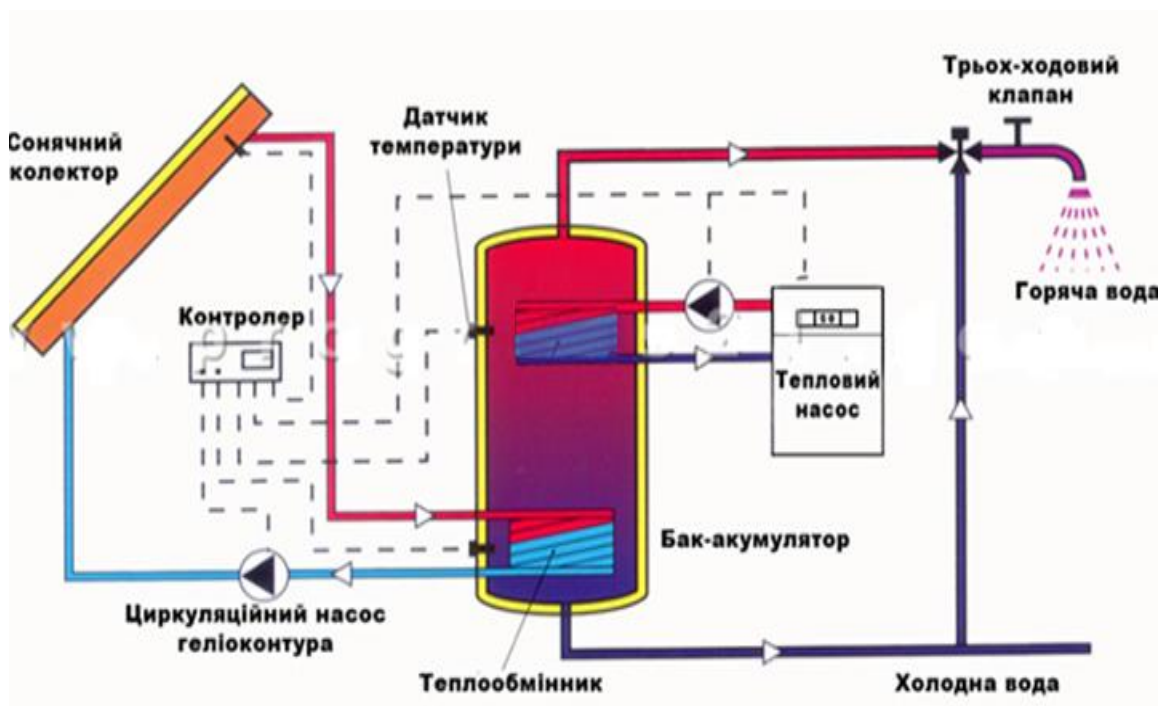


Рис. 1.9 Схема комбінованої системи теплопостачання з сонячним колектором та тепловим насосом

За такою схемою сонячні колектори можуть працювати у режимі оптимальної теплопродуктивності практично цілий рік. У холодну пору року, коли енергії Сонця не вистачає для необхідного рівня нагрівання води, блок керування системою підключає тепловий насос, який догріває воду до заданої

температури [132]. Для покриття пікових навантажень може використовуватись додатковий електричний нагрівач.

Існують гібридні системи теплопостачання без баку-акумулятора [52], що дають змогу знизити їх вартість, однак недоліком таких систем є складність узгодження витрат теплоносія в теплообмінних пристроях для досягнення ефективного теплообміну, а також вимушене ускладнення автоматичної системи контролю та управління вимірювальною технікою та запірно-регулювальною арматурою. Також поширеними є системи альтернативних сонячно-біопаливних систем теплопостачання [93].

Запропоновано використовувати гібридні котельні, в яких у систему теплопостачання включені геліоустановки. За такого рішення для паливної загальною потужністю 300 кВт включення в гібридну систему геліоустановки потужністю 100 кВт забезпечує зниження річної потреби споживання природного газу на 66,5 тис. м³ в рік та суттєве зменшення об'єму викидів димових газів.

Існують геотермальні ССТ, в яких джерелами теплоти служать сонячний колектор, тепловий насос та геотермальне джерело [60]. Використання такої схеми забезпечує надійне теплопостачання об'єктів в умовах змінного дебету свердловин.

Сонячну енергію також можна використовувати для систем холодопостачання, в яких термодинамічний цикл здійснюється завдяки сонячній енергії [20]. Існує абсорбційне охолодження неперервної дії та періодичної дії [100]. Були проведені дослідження, в яких розробка спеціальних систем охолодження для роботи на сонячній енергії дає змогу понизити робочі температури генератора і підвищити ефективність використання енергії від колектора до генератора, завдяки чому підвищується ККД системи охолодження [19]. Також сонячну енергію використовують для сушильно-випарних систем в процесах відновлення абсорбенту і підтримування неперервності циклу [23].

Сонячна енергетика може бути використана в сільському господарстві. Значну економію традиційних енергоресурсів можна отримати у разі використання геліосушарок, наприклад в зерносушилках [100, 106]. Для приготування їжі в районах з сухим і гарячим кліматом доцільно використовувати сонячні печі [12]. Існують сонячні водопідйомні та опріснювальні установки для проблем водопостачання [106].

Поширеними є комбіновані сонячні системи на основі фотоелектричних модулів та сонячних колекторів – когенераційні фотоелектричні теплові модулі, які одночасно здійснюють перетворення сонячної енергії в теплову та електричну [105]. Основними елементами модуля є фотоелектрична панель, теплопоглинач, резервуар з теплоносієм та прозоре захищення. Залежно від технологічної доцільності ефективного використання сонячної енергії розрізняються три основні типи фотоелектричних теплових модулів:

- для пріоритетного вироблення електроенергії, в зв'язку з чим конструкція модуля передбачає відсутність повітряного шару між фотоелектричною панеллю та захисним прозорим покриттям;
- для максимальної ефективності отримання теплової енергії, що досягається використанням в модулі подвійного прозорого покриття з повітряним прошарком між ним та фотоелектричною панеллю;
- для досягнення максимальної загальної ефективності – конструкція модуля містить одинарне світлопрозоре покриття з повітряним прошарком між ним та фотоелектричною панеллю.

Відомі теплові схеми сонячних електростанцій з термохімічним перетворенням енергії [26], що відрізняються тим, що в зоні фокусування сонячної енергії розміщується хімічний реактор, куди подається реагуюча суміш. За цією схемою охолоджений конвертований газ транспортується в район енергоспоживання, де в метанаторі відбувається реакція метанування. Теплота, яка при цьому виділяється, використовується для вироблення електроенергії та теплопостачання [26].

В даний час будуються комбіновані установки з параболічними концентраторами потужністю 9-25 кВт. ККД таких систем становить приблизно 25%, що є вищим значенням, ніж у фотоелектричних елементів. Для виробництва фотоелектричних елементів використовується кремній «сонячної чистоти» з чистотою 99,9999%.

Розроблено систему комбінованого сонячного теплопостачання, в якій використовується явище стратифікації води [107]. Об'єм бака-акумулятора умовно розбито на 4 секції з однаковою довжиною теплообмінника, вбудованого у бак-акумулятор. Це дає змогу зменшити собівартість виробництва теплоти від геліосистеми на 35 %. Встановлено, що запропонована технологічна схема, у зв'язку із невикористанням додаткової витрати теплоносія, що гріє від геліоколектора, виключає застосування понаднормативної площі геліоколекторів до 60 %, що також надає можливість віддати перевагу найудосконалішим геліосистемам з метою забезпечення максимального терміну їх експлуатації.

1.5. Методи дослідження сонячних колекторів

На даний час існує ряд методик дослідження сонячних колекторів, що базуються на різних математичних моделях [71]. Існує багато закордонних стандартів з дослідження сонячних колекторів [123, 124, 125, 126] та вимірюванню сонячної енергії [126], а також розроблені стандарти України для випробування сонячних колекторів [29, 34, 35, 36].

Основними методами досліджень сонячних колекторів є лабораторні та натурні, які можуть бути стаціонарними та нестаціонарними [48, 103, 136, 144].

Стаціонарні методи досліджень плоских сонячних колекторів ґрунтуються на моделі Хоттеля-Уїллера-Бліса [103]. В цій моделі нехтують впливом перехідних процесів під час нагрівання та охолодження колектора на його ефективність. Миттєвий ККД сонячного колектора визначається як відношення його теплопродуктивності до густини потоку сонячного випромінювання в площині колектора і описується рівнянням:

$$\eta = F' \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L \cdot (T_m - T_3)}{S} \right] \quad (1.5)$$

якщо використана середньомасова температура теплоносія T_m , де F' – коефіцієнт ефективності теплопоглинача; $(\tau\alpha)$ – приведена ефективна поглинаюча здатність сонячного колектора; U_L – повний коефіцієнт тепловтрат, Вт·м²/К; T_m – середньомасова температура теплоносія, К; T_3 – температура навколишнього середовища, К; S – густина потоку сонячного випромінювання, Вт/м².

Здебільшого нестационарні методики дослідження сонячних колекторів побудовані на основі простої динамічної моделі колектора – одноелементної, в рамках якої вводять середню температуру і середню теплоємність колектора, відносячи його до одного з його елементів. Одноелементна модель дає змогу розглядати динамічну поведінку колектора як єдиного цілого. Найзручніше вибирати як визначальну середньомасову температуру теплоносія. В цьому випадку ККД колектора описується рівнянням:

$$\eta = F' \left[(\tau\alpha) - U_L \cdot (T_m - T_3) \right] - \frac{c_A}{S} \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (1.6)$$

де c_A – приведена до температури T_m теплоємність сонячного колектора з розрахунку на 1 м² його площі, Дж/(кг·К).

У лабораторних методах дослідження сонячних колекторів миттєвий ККД визначається за таким рівнянням:

$$\eta = F' (\tau\alpha) - \frac{a \cdot (T_m - T_3)}{S} - \frac{b \cdot (T_m - T_3)^2}{S} \quad (1.7)$$

де a і b – поправні коефіцієнти, що враховують залежність коефіцієнта теплових втрат колектора від температури.

Натурна методика була запропонована для проведення дослідів в натурних умовах. В цій методиці вимірювання температур, витрати теплоносія і потоку сонячного випромінювання проводиться серіями тривалістю 5 – 15 хв. В цьому випадку миттєвий ККД СК визначається за формулою:

$$\eta = \frac{q_u(t)}{S(t)} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_{\text{вх}} - T_3}{S} \quad (1.8)$$

де q_u – кількість теплоти, що отримав сонячний колектор, Вт; F_R – коефіцієнт відведення теплоти із сонячного колектора; $T_{\text{вх}}$ – температура теплоносія на вході в сонячний колектор, К.

Показником ефективності сонячних колекторів є його ККД, який визначається як відношення теплопродуктивності колектора до кількості сонячної енергії, яка надходить на колектор [64].

$$\eta = \frac{Q_k}{(E_k \cdot A)} \quad (1.9)$$

де Q_k – теплопродуктивність колектора, Вт; E_k – кількість сонячної енергії, яка поступає на 1 м² площі поверхні сонячного колектора, Вт/м²; A – площа поверхні теплопоглинача колектора, м².

1.6. Аналіз поєднання покрівлі та сонячного колектора

Системи сонячного тепlopостачання із звичайними сонячними колекторами є достатньо дорогими. Також істотною вадою цих колекторів є висока трудомісткість виготовлення і недостатня ефективність перетворення сонячної енергії в теплову внаслідок втрат теплоти. Крім того, плоска поверхня прямокутної форми великого розміру призводить до труднощів архітектурної та технологічної прив'язки необхідної кількості сонячних колекторів на спорудах. Колектори такого типу є масивними створюють додаткове навантаження на конструкції споруд, на яких розміщено СК.

Розроблені енергоефективні огорожувальні конструкції у вигляді дахів та зовнішніх стін будівельних об'єктів (житлових, громадських, адміністративних тощо), а також як елементи поверхонь індустріальних об'єктів (морозильні, холодильні і сушильні камери, тощо). Такі конструкції дають змогу ефективно використовувати як енергію сонячного випромінювання, так і утилізувати теплоту витяжного повітря для потреб гарячого водopостачання, кондиціонування і тепlopостачання, а також за потреби дають можливість реалізувати функції викиду назовні надлишків тепла і регулювання акумуляції теплоти [101]. Широко використовуються настінні

сонячні колектори, які одночасно виконують функцію огорожувальних конструкцій [135, 137].

Одним із найпростіших способів використання сонячної теплоти для існуючих дахів є пропускання води або повітря через поверхню даху [12] (рис. 1.10). Теплосприймальна поверхня повинна бути чорною. До крокв кріпляться рами для встановлення прозорого покриття. Вода подається через перфоровану трубку вздовж гребеня даху, стікаючи по поверхні скатної покрівлі, відбирає з неї теплоту та збирається в приймальний жолоб, звідки після фільтрування використовується як теплоносії. Дах можна також покрити хвилястими алюмінієвими листами, пофарбованими в чорний колір. Проведені дослідження такої системи показали, що ККД при цьому є невисоким, проте незначні затрати, пов'язані з перетворення існуючого даху в сонячний колектор, виправдовують невеликий ККД.

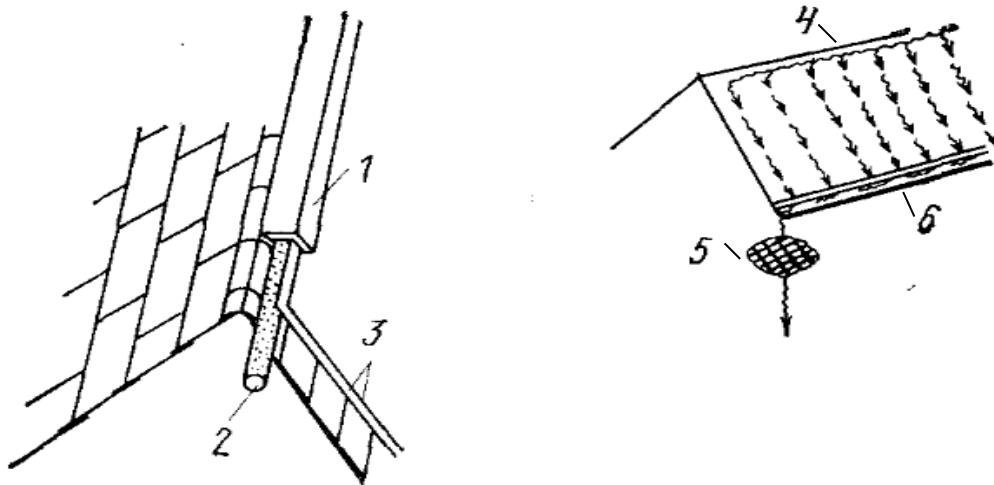


Рис. 1.10. Сонячний колектор водяного типу з відкритим потоком:
1 – верхня накладка; 2 – перфорована труба; 3 – прозоре покриття; 4 – холодна вода; 5 – фільтр нагрітої води, яка стікає в жолоб; 6 - жолоб

Відомий геліопрофіль [66, 99], який являє собою видовжений алюмінієвий профіль, який має теплосприймальну поверхню, канали для рідкого та повітряного теплоносія (в останньому може розміщуватись теплоакумулювальна рідина) і ребра закріплення з сусідніми елементами (рис. 1.11) Монтаж такого сонячного колектора ведуть безпосередньо на каркасі споруди із заміщенням ним відповідно частини покрівлі.

Нагрів теплоносія здійснюється завдяки теплоті сонячного випромінювання, що поглинається теплопоглинальною поверхнею 2 окремого елемента 1, від якої через стінку корпусу передається теплоакumuлюючій речовині в його порожнині 4 та безпосередньо теплоносієві в трубі 3. Нагрітий теплоносій через вихідний патрубок надходить до трубопроводів гарячого водопостачання. За відсутності сонячного випромінювання теплоносій нагрівається завдяки теплоті, накопиченій в теплоакumuлювальній речовині.

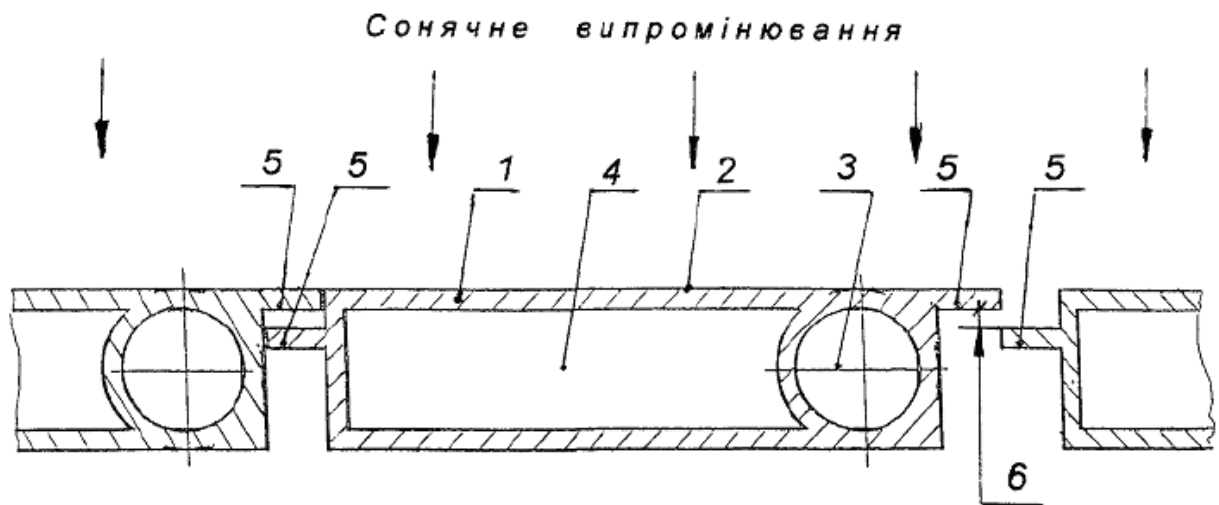


Рис. 1.11. Переріз геліопрофілю [66]:

1 – окремий елемент геліопрофілю; 2 – теплопоглинальна панель; 3 – труба для теплоносія; 4 – порожнина для повітря або теплоакumuлювальної речовини; 5 – ребра закріплення

Розроблено також комбінований фотогеліоколектор з плоскими концентраторами на основі геліопрофілю, який одночасно виробляє теплоту та електрику [41]. Його особливістю є наявність концентратора, а також повітряного та водяного охолодження фотоелектричного модуля. Це дає змогу підвищити ефективність його роботи та збільшити ККД.

Вказані технічні рішення забезпечують можливість створення різноманітних архітектурних варіантів прив'язки сонячного колектора до існуючих споруд, а також широкі архітектурні можливості під час проектуванні нових споруд. Крім того, якщо сонячний колектор монтується безпосередньо на каркас споруди, то він виконує роль частини споруди, що виключає додаткове навантаження на несучі конструкції.

Найбільш економічно вигідним та простим є використання сонячної енергії, яку отримують скатні покрівлі будівель. Комплексне вирішення питань прив'язок сонячних колекторів безпосередньо до елементів даху як існуючих споруд так і для проектування нових об'єктів, має достатньо широкі перспективи, оскільки для цього може бути реалізована можливість заміни ними частини покрівлі, що виключає додаткове навантаження на несучі конструкції, та в цілому знижує вартість сонячного теплопостачання [9]. Найприйнятнішим для такого варіанту СТ є південноорієнтовані скатні частини даху будівель, які покриті гофрованими металевими листами. Це відкриває широкі можливості виконання ними функцій приймача сонячної енергії, та завдяки високій теплопровідності металу досягнення високого ступеня передачі поглинутої теплоти теплоносієві через стінку труб, які безпосередньо контактують з металевою покрівлею. Поєднання металевого покриття даху з трубою системою циркуляції теплоносія представляє такий варіант сонячного теплопостачання як геліопокрівлю [7], з використанням її як автономно, так і в комбінованих системах теплопостачання, аналогічно класичним плоским сонячним колекторам.

1.7. Висновки та постановка завдань дослідження

1. Серед поновлювальних джерел енергії для людства пріоритетним є падаюча на Землю сонячна енергія, використання лише 1,5% якої забезпечило б всі потреби сьогоденної світової енергетики. Найефективнішим способом використання сонячної енергії є перетворення її в теплову енергію, зокрема в системах теплопостачання.

2. Найпоширенішими та ефективними є активні системи сонячного теплопостачання з плоскими колекторами. Недоліками плоских сонячних колекторів є значна залежність теплоти, що отримується, від періоду доби та невисокий показник питомої отриманої енергії з 1 м² робочої поверхні колектора на одну грошову одиницю сумарних затрат, навіть за високих значень ККД колекторів.

3. Ефективним шляхом підвищення ефективності геліосистем є поєднання сонячного колектора та покрівлі будівлі, що дає змогу суттєво знизити вартість цієї системи.

4. Необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження ефективності геліопокрівлі в системах сонячного теплопостачання.

Наукові результати розділу 1 висвітлено у публікаціях автора: [7, 9, 144, 148].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ГЕЛІОПОКРІВЛЕЮ

У цьому розділі розроблено математичну модель роботи системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею. Виконано теоретичні дослідження процесу тепловіддачі від геліопокрівлі з прозорим покриттям під дією вітру за різної швидкості повітряного потоку.

2.1. Моделювання акумуляції теплоти системою теплопостачання із геліопокрівлею

Режим роботи системи теплопостачання з геліопокрівлею описується рівнянням енергетичного балансу, яке поділяє енергію Сонця на корисну енергію і втрати. Енергетичний баланс геліопокрівлі в цілому можна представити у вигляді [19, 133]:

$$Q_{\text{сон}} = Q_U + Q_L + Q_{\text{ак}} \quad (2.1)$$

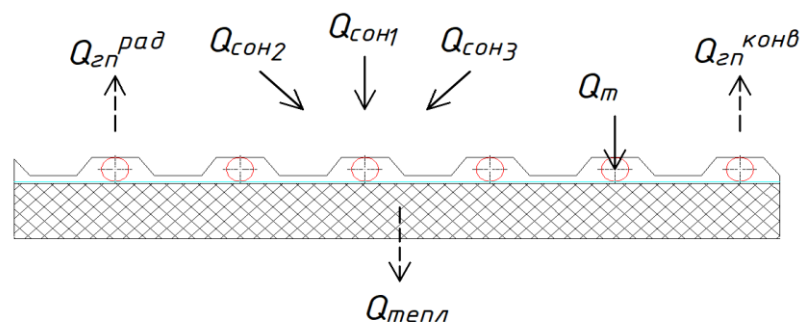
де $Q_{\text{сон}}$ – інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню покрівлі, Вт; Q_U – тепловий потік, переданий теплоносію в геліопокрівлі (корисне тепло); Q_L – теплові втрати геліопокрівлі в навколишнє середовище конвекцією та випромінюванням, а також теплопровідністю через нижні та бокові стінки геліопокрівлі, Вт; $Q_{\text{ак}}$ – кількість тепла закумульованої баком-акумулятором, Вт.

Для оцінки ефективності геліопокрівлі необхідно провести аналітичні розрахунки енергетичного балансу та визначити термоакумуляційні властивості геліопокрівлі.

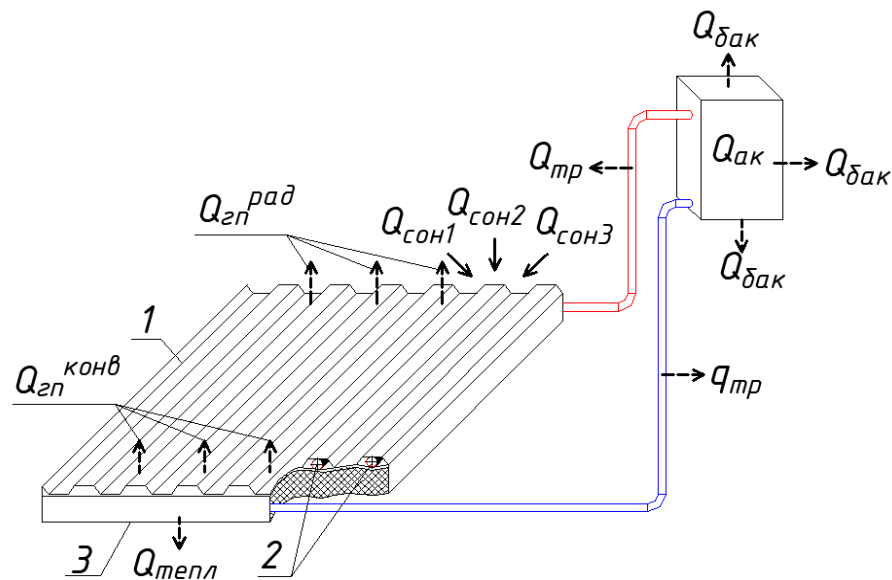
Оскільки сонячна енергія поглинається покрівельним матеріалом будівлі, кількість, яку вона може поглинути, першою чергою залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить на поверхню цього матеріалу ($Q_{\text{сон}}$) [87, 134]. Від покрівельного матеріалу будівлі теплота втрачається конвекцією ($Q_{\text{гп}}^{\text{коhb}}$) та випромінювання ($Q_{\text{гп}}^{\text{рад}}$) в навколишнє середовище. Решта енергії від

покрівлі через теплопоглинач передається теплоносію в трубках контуру циркуляції геліопокрівлі (Q_T). Частина поглинутої теплоти втрачається шаром теплоізоляції через нижню частину геліопокрівлі ($Q_{\text{тепл}}$), стінками баку-акумулятора ($Q_{\text{бак}}$) та трубками для теплоносія від геліопокрівлі до баку-акумулятора ($Q_{\text{тр}}$), що загалом зумовлено теплопровідністю використаних матеріалів. Завдяки різниці температур, та, відповідно різниці густин теплоносія, в зоні вхідного і вихідного патрубків створюється циркуляція теплоносія. Решта енергії (рис. 2.1) акумулюється як корисна енергія ($Q_{\text{ак}}$) в баку-акумуляторі гарячої води.

В модельованій геліопокрівлі прийнято використання трубок циркуляції теплоносія з внутрішнім діаметром 20 мм, який загалом передбачений в промислових колекторах різних типів. Робоча площа експериментального колектора становила 0,16 м². Об'єм баку-акумулятора прийнято із розрахунку 75 л води на 1 м² площі колектора аналогічно з відомими ССТ [6]. Геліопокрівля утеплена екструдованим пінопластом товщиною 50мм – на бокових стінках та 100 мм – під теплопоглиначем. Всі трубопроводи утеплені теплоізоляцією товщиною 20мм. З врахуванням геометричних параметрів гофрованого покрівельного листа розглянуто надходження теплового потоку як на горизонтальні площини, так і суміжні з ними під кутом 30° бокові грані. Крок між трубками контуру циркуляції теплоносія прийнято рівним 70 мм, що відповідає профілю гофрованого теплопоглинача та лежить в межах, прийнятих для різного типу колекторів і є оптимальним [100]. Початкова температура теплоносія становила 14°C, температура навколишнього середовища: 20°C. Розрахунок проводився для умов місяця липня.



а)



б)

Рис. 2.1. Схема теплових потоків геліопокрівлі (а) та ССТ з геліопокрівлею (б):

1 – покрівельний матеріал будівлі; 2 – трубки контуру циркуляції;
3 – теплоізоляція

Для моделювання роботи геліопокрівлі були прийняті такі припущення і спрощення:

- температура теплоносія у трубках контуру циркуляції геліопокрівлі вважалась сталою у досліджуваному проміжку часу;
- потік сонячної енергії розподілений рівномірно по поверхні покрівельного матеріалу будівлі;
- прийнято, що поглинальні властивості поверхонь не залежать від довжини хвилі.
- втрати тепла від бокових стінок геліопокрівлі є незначними.

Сонячний тепловий потік, який надходить на геліопокрівлю, є результатом поглинання теплоти горизонтальними та відповідними похилими гранями гофрованого покрівельного листа, Вт:

$$Q_{\text{сон}} = h \cdot (F_1 I_{\text{в1}} + F_2 I_{\text{в2}} + F_3 I_{\text{в3}}) \quad (2.2)$$

де h – коефіцієнт поглинання сонячної енергії покрівельним матеріалом будівлі;
 F_i – площа поглинання відповідної грані гофрованого покрівельного матеріалу будівлі, м^2 ; $I_{\text{в}i}$ – інтенсивність сонячного випромінювання, яке надходить на відповідну грань гофрованого покрівельного матеріалу даху будівлі, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Коефіцієнт поглинання сонячної енергії покрівельним матеріалом залежить від природи самого матеріалу, а з нанесенням чорної матової фарби був прийнятий 0,98 [19].

Добова інтенсивність сонячного випромінювання I_c , Вт/(м²·добу), є повною енергією сонячного випромінювання, яка приходить на одиницю площі поверхні за світловий день [100]:

$$I_c = \int_0^{24} G dt \quad (2.3)$$

де G – кількість сонячного випромінювання, Вт/м².

Інтенсивність сонячного випромінювання I_b , Вт/м², яке надходить на гофровану геліопокрівлю, становить суму прямої та розсіяної сонячної радіації впродовж дня [100]:

$$I_b = \int_0^{24} \left(G_b \cdot \cos \theta + \frac{G_d(1 + \cos \theta)}{2} \right) dt \quad (2.4)$$

де G_b , G_d – відповідно, кількість прямої та розсіяної сонячної радіації [5], Вт/м²; θ – кут між напрямком потоку випромінювання та нормаллю до поверхні теплопоглинача, град.

$$\cos \theta = (A - B) \cdot \sin \delta + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cos \beta \quad (2.5)$$

де

$$A = \sin \varphi \cdot \cos \beta \quad (2.6)$$

$$B = \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \quad (2.7)$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma \quad (2.8)$$

$$D = \cos \varphi \cdot \cos \beta \quad (2.9)$$

$$E = \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \quad (2.10)$$

де δ – кут між напрямком на Сонце та екваторіальною площиною, град.; ω – часовий кут, град; β – кут нахилу геліопокрівлі (між площиною, що розглядається та горизонтальною площиною), град; φ – широта місцевості, град; γ – кут повороту геліопокрівлі (відхилення від меридіану проекції на горизонтальну площину нормалі до поверхні теплопоглинача геліопокрівлі), град.

Кут між напрямком до Сонця та екваторіальною площиною δ визначено за формулою [100]:

$$\delta = \delta_0 \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right] \quad (2.11)$$

де δ_0 – напрям земної осі до нормалі площини обертання (в північній півкулі $\delta_0 = + 23,5^\circ$ в період літнього сонцестояння та $\delta_0 = - 23,5^\circ$ в період зимового сонцестояння), град; n – день року ($n = 1$ відповідає 1 січня);

Часовий кут ω визначається за формулою [100]:

$$\omega = \left(\frac{1}{15} \right) \cdot (t_{solar} - 12) = \left(\frac{1}{15} \right) \cdot (t_{zone} - 12) + \omega_{eq} + (\varphi - \varphi_{zone}) \quad (2.12)$$

де t_{solar} , t_{zone} – відповідно локальний сонячний і декретний час, год; φ_{zone} – довгота, на якій знаходиться Сонце, коли t_{zone} відповідає полудню (коли сонячний і декретний час співпадають), град; ω_{eq} – поправний коефіцієнт, абсолютна величина якого є малою і ним переважно нехтують.

Залежність (2.6) може бути спрощена для випадку, коли теплопоглинач геліопокрівлі, який орієнтований в напрямку до екватора, виявиться повернутим перпендикулярно до сонячного потоку в полудень і якщо його кут нахилу β дорівнює широті місцевості φ . В цьому випадку ($\gamma = 0$, $\beta = \varphi$) і залежність (2.4) матиме такий вигляд:

$$\cos \theta = \cos \omega \cdot \cos \delta \quad (2.13)$$

Конвективні втрати теплоти із поверхні покрівельного матеріалу, Вт:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{конв}} = \alpha_{\text{гп}} \cdot F_{\text{гп}} \cdot (t_{\text{гп}} - t_3) \quad (2.14)$$

де $\alpha_{\text{гп}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від покрівельного матеріалу будівлі до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $F_{\text{гп}}$ – площа поглинача сонячної енергії, м²; $t_{\text{гп}}$ – температура теплопоглинача, °С; t_3 – температура навколишнього середовища, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{гп}}$, Вт/(м²·К), від поверхні покрівельного матеріалу будівлі в навколишнє середовище визначались за емпіричною формулою [19]:

$$\alpha_{\text{гп}} = 5,8 + 11,6 \cdot \sqrt{V} \quad (2.15)$$

де V – швидкість повітряного потоку, м/с.

Втрати теплоти випромінюванням від поверхні покрівельного матеріалу будівлі у навколишнє середовище, Вт:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{рад}} = \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}} \cdot c_0 \cdot F_{\text{гп}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{гп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.16)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}}$ – приведений ступінь чорноти покрівельного матеріалу будівлі; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла; $T_{\text{н}}$ – температура небозводу, К; $T_{\text{гп}}$ – температура теплопоглинача, К.

Ефективна температура небозводу, яка враховує неоднорідність температури атмосфери, розраховується за такою формулою, °С [19]:

$$t_{\text{н}} = 0,0552 \cdot t_3^{1,5} \quad (2.17)$$

Випромінювальна здатність покрівельного матеріалу даху будівлі c визначалась за формулою, Вт(м²·К⁴):

$$c = \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}} \cdot c_0 \quad (2.18)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}}$ – приведений ступінь чорноти покрівельного матеріалу будівлі.

Кількість тепла, що передається від покрівлі до теплоносія:

$$Q_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гп}}} + \frac{\delta_{\text{гп}}}{\lambda_{\text{гп}}} + R_{\text{ІК}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в1}}}} \cdot l \cdot (t_{\text{гп}} - t_{\text{т}}) \quad (2.19)$$

де $\alpha_{\text{гп}}$, $\alpha_{\text{в1}}$ – відповідно, коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні геліопокрівлі та від теплопоглинача до внутрішньої поверхні трубок контуру циркуляції теплоносія, Вт/(м²·К); $\lambda_{\text{гп}}$ – коефіцієнт теплопровідності теплопоглинача, Вт/(м·К); l – довжина трубопроводів; $\delta_{\text{гп}}$ – товщина теплопоглинача, м; $R_{\text{ІК}}$ – лінійний термічний опір теплопередачі трубок контуру циркуляції, м · К / Вт.

Термічний опір теплопередачі ізольованих трубопроводів, м · К / Вт:

$$R_{\text{ІК}} = \frac{1}{\pi \cdot d_{\text{в}} \cdot \alpha_{\text{в1}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\pi \cdot d_3 \cdot \alpha_{\text{в3}}} \quad (2.20)$$

де $\alpha_{в1}$ і $\alpha_{з1}$ – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від теплопоглинача до внутрішньої поверхні трубок контуру циркуляції теплоносія та від стінки трубок контуру циркуляції до теплоізоляції, Вт/(м²·К); $d_{в}$ і $d_{з}$ – відповідно внутрішній та зовнішній діаметр трубопроводів, м; $d_{із}$ – зовнішній діаметр теплоізоляції, м; $\lambda_{із}$ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·К).

Втрати теплоти через нижню частину теплоізоляції геліопокрівлі, Вт:

$$Q_{\text{тепл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{з1}} + \frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{1}{\alpha_{в}}} \cdot F_b \cdot (t_{\text{т}} - t_{\text{з}}) \quad (2.21)$$

де $\lambda_{із}$ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·К); $\delta_{із}$ – товщина теплоізоляції, м; $\alpha_{в}$ – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні геліопокрівлі, Вт/(м²·К); F_b – площа поверхні теплоізоляції, м².

Втрати теплоти в трубопроводах від геліопокрівлі до бака-акумулятора, Вт:

$$Q_{\text{тр}} = l \cdot \frac{(t_{\text{т}} - t_{\text{з}})}{R_K} \quad (2.22)$$

де l – довжина трубопроводів, м; R_K – лінійний термічний опір теплопередачі трубопроводів, м · К / Вт.

Термічний опір теплопередачі ізольованих трубопроводів, м · К / Вт:

$$R_K = \frac{1}{\pi \cdot d_{в} \cdot \alpha_{в}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ст}} \cdot \ln \frac{d_{з}}{d_{в}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{із}} \cdot \ln \frac{d_{із}}{d_{з}} + \frac{1}{\pi \cdot d_{із} \cdot \alpha_{з}} \quad (2.23)$$

де $\alpha_{в}$ і $\alpha_{з}$ – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від нагрітого теплоносія до стінки труби та від стінки труби в навколишнє середовище, Вт/(м²·К); $d_{в}$ і $d_{з}$ – відповідно внутрішній та зовнішній діаметр трубопроводів, м; $d_{із}$ – зовнішній діаметр теплоізоляції, м; $\lambda_{із}$ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·К).

Втрати теплоти баком-акумулятором, Вт:

$$Q_{\text{бак}} = K_{\text{бак}} \cdot F_{\text{бак}} \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{з}}) \quad (2.24)$$

де $K_{\text{бак}}$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції баку-акумулятора, Вт/(м²·К); $F_{\text{бак}}$ – площа теплоізоляції баку-акумулятора, м²; $t_{\text{бак}}$ – температура теплоносія в баці-акумуляторі, °С.

Кількість закумуляованої енергії баком-акумулятором, Дж:

$$Q_{\text{ак}} = \frac{m \cdot c \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{п}})}{\tau} \quad (2.25)$$

де c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг · К); m – маса теплоносія, кг; $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{бак}}$ – відповідно, початкова та кінцева температури теплоносія в баці-акумуляторі, °С.

Отже, для системи сонячного теплопостачання система балансових рівнянь матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{сон}} = h \cdot (F_1 I_{\text{в1}} + F_2 I_{\text{в2}} + F_3 I_{\text{в3}}) \\ Q_{\text{гп}}^{\text{конв}} = \alpha_{\text{гп}} \cdot F_{\text{гп}} \cdot (t_{\text{гп}} - t_3) \\ Q_{\text{гп}}^{\text{рад}} = \varepsilon_{\text{гп}}^{\text{гп}} \cdot c_0 \cdot F_{\text{гп}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{гп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 \right] \\ Q_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гп}}} + \frac{\delta_{\text{гп}}}{\lambda_{\text{гп}}} + R_{\text{IK}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в1}}}} \cdot l \cdot (t_{\text{т}} - t_3) \\ Q_{\text{тепл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{з1}}} + \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \cdot F_{\text{б}} \cdot (t_{\text{гп}} - t_{\text{т}}) \\ Q_{\text{тр}} = l \cdot \frac{(t_{\text{т}} - t_3)}{R_{\text{К}}} \\ Q_{\text{бак}} = K_{\text{бак}} \cdot F_{\text{бак}} \cdot (t_{\text{бак}} - t_3) \\ Q_{\text{ак}} = \frac{m \cdot c \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{п}})}{\tau} \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Розв'язуванням системи балансових рівнянь отримано розрахункові значення температури теплоносія в процесі опромінення теплосприймальної металеві поверхні геліопокрівлі при зміні інтенсивності теплового потоку впродовж дня з 9:00 до 19:00 при різній швидкості повітряного потоку, що представлено у графічній формі відповідною кривою на рис. 2.2, залежно від тривалості опромінення.

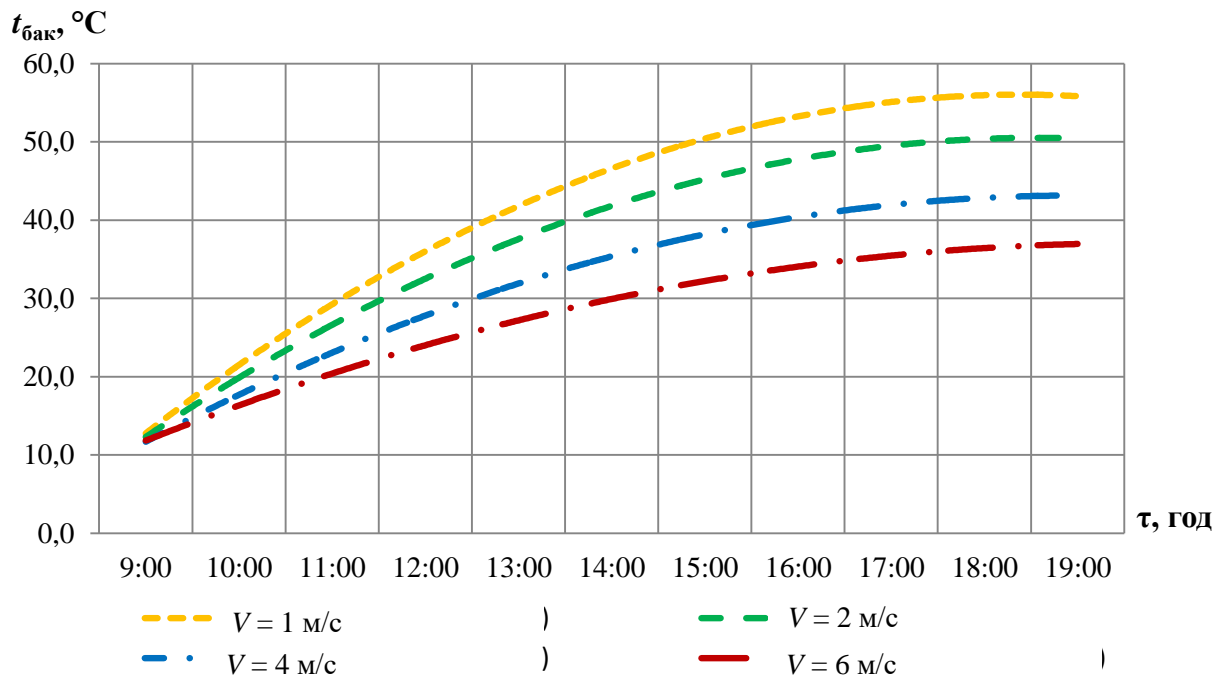


Рис. 2.2. Розрахункова температура теплоносія в баці-акумуляторі $t_{\text{бак}}$ за зміни інтенсивності теплового потоку впродовж дня та швидкості вітрового потоку

Використовуючи значення досягнутої температури в баці-акумуляторі, стає можливим розрахувати кількість закумуляованої теплоти системою теплопостачання геліопокрівлею та провести оцінку ефективності її роботи. Результати розрахунку питомої теплової потужності системи теплопостачання з геліопокрівлею подано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Кількість закумуляованої питомої теплоти та енергетична ефективність системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею впродовж дня

τ , ГОД	$V = 1 \text{ м/с}$		$V = 2 \text{ м/с}$		$V = 4 \text{ м/с}$		$V = 6 \text{ м/с}$	
	$Q_{\text{ак}}$, кДж/м ²	η , %	$Q_{\text{ак}}$, кДж/м ²	η , %	$Q_{\text{ак}}$, кДж/м ²	η , %	$Q_{\text{ак}}$, кДж/м ²	η , %
9:00	0	61	0	51	0	37	0	27
10:00	1832		1282		540		393	
11:00	3402		2695		1742		931	
12:00	5522		4603		3363		2309	
13:00	7929		6770		5205		3875	
14:00	9473		8159		6386		4879	
15:00	10232		8842		6967		5372	
16:00	10494		9078		7167		5542	
17:00	10651		9219		7287		5644	
18:00	10755		9313		7367		5712	
19:00	10755	9313	7367	5712				

Проаналізувавши отримані результати, встановлено, що при середній швидкості повітряного потоку 1-2 м/с температура теплоносія в баку-акумуляторі досягає 50-55°C, а при збільшенні швидкості до 4-6 м/с становить 37-42°C. При цьому середнє значення ККД ССТ з геліопокрівлею відповідно досягає рівня 61-51% та 37-27% з показниками закумуляованої питомої теплоти від 10755 до 9313 кДж/м² та від 7367 до 5712 кДж/м².

Проте чисельним моделюванням достатньо складно встановити вплив усіх факторів та нестационарні процеси що відбуваються як в сонячному колекторі так і в усій системі в цілому. Тому для визначення енергетичної ефективності геліопокрівлі у ССТ були проведені експериментальні дослідження.

2.2. Вплив вітру на тепловіддачу геліопокрівлі з прозорим покриттям

На ефективність роботи геліопокрівлі, окрім інтенсивності падаючого потоку та часу опромінення, впливають і інші фактори, серед яких для натурних умов експлуатації такої ССТ невивченим є вплив швидкості вітру [8]. При цьому важливим є отримання даних щодо кількісної оцінки втрат теплової енергії поверхнею геліопокрівлі без впливу вітру та під дією вітру при різних швидкостях повітряного потоку [86].

Для підвищення ефективності геліопокрівлі запропоновано її додатково покрити склом, що забезпечує значне зменшення тепловтрат ССТ.

Розрахунок тепловіддачі для геліопокрівлі з прозорим покриттям здійснювався за формулою [43]:

$$\alpha_f = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (2.27)$$

де α_f – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К); Nu – критерій Нусельта; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м · К); l – ширина прозорого покриття, м.

Визначальним розміром у формулах є ширина прозорого покриття, а визначальною температурою – середнє значення температури повітряного потоку.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі геліопокрівлі за природної конвекції (без впливу вітру) критерій Нуссельта визначався за критеріальним рівнянням:

$$\text{Nu} = 0,50 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \quad (2.28)$$

де Gr – критерій Грасгофа; Pr – критерій Прандтля.

Критерій Грасгофа визначався за формулою [43]:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \cdot \gamma \cdot \Delta t \quad (2.29)$$

де ρ – густина повітря, кг/м^3 ; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$; γ – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, К^{-1} ; Δt – різниця температур прозорого покриття та навколишнього середовища, К .

Критерій Прандтля визначався за формулою:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (2.30)$$

Для навколишнього середовища з температурою 20°C критерій Прандтля становить 0,718.

Після обчислення критерія Нуссельта, встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі α_f для геліопокрівлі без впливу на неї вітру становить $1,76 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі для геліопокрівлі при впливі на неї вітру при $Re < 5 \cdot 10^5$, критерій Нуссельта визначався за критеріальним рівнянням:

$$\text{Nu} = 0,67 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (2.31)$$

де Pr – критерій Прандтля; Re – число Рейнольдса, визначалось за критеріальним рівнянням:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad (2.32)$$

де V – швидкість повітряного потоку, м/с ; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

Результати розрахунків зображено у графічній формі (рис. 2.4).

З графіку (рис. 2.4) видно, що коефіцієнт тепловіддачі геліопокрівлі при зміні швидкості повітряного потоку змінюється від 3,5 до 8,1 Вт/(м²·К).

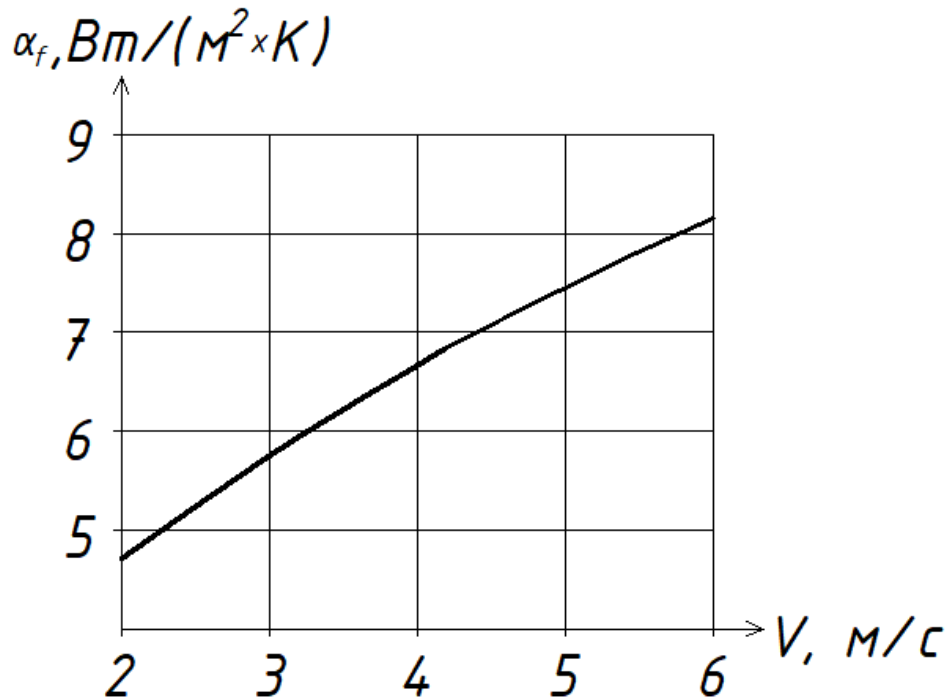


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнта тепловіддачі α_f від швидкості V повітряного потоку геліопокрівлі з прозорим покриттям

Проаналізувавши результати математичних розрахунків впливу вітру на ефективність геліопокрівлі встановлено, що навіть при швидкості повітряного потоку 2м/с, коефіцієнт тепловіддачі геліопокрівлі зростає вдвічі. Це є підставою необхідності проведення системних експериментальних досліджень щодо впливу вітру на енергетичну ефективність геліопокрівлі в ССТ.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичну модель роботи геліопокрівлі у системі сонячного теплопостачання, що дало змогу визначити її теплові характеристики.

2. Теоретично отримано математичну залежність температури теплоносія в процесі опромінення теплосприймальної металевої поверхні геліопокрівлі при

зміні інтенсивності теплового потоку впродовж дня з 9:00 до 19:00 при різній швидкості повітряного потоку. Визначено, що при середній швидкості повітряного потоку 1-2 м/с температура теплоносія в баку-акумуляторі досягає 50-55°C, а при збільшенні швидкості до 4-6 м/с становить 37-42°C. При цьому середнє значення ККД ССТ з геліопокрівлею відповідно досягає рівня 61-51% та 37-27% з показниками закумуляованої питомої теплоти від 10755 до 9313 кДж/м² та від 7367 до 5712 кДж/м².

3. Виконано теоретичні дослідження процесу тепловіддачі від геліопокрівлі з прозорим покриттям під дією вітру, при різній швидкості повітряного потоку. Встановлено, що дія повітряного потоку навіть при швидкості 2 м/с збільшує α_f від 1,76 до 3,62 Вт/(м²·К), який зростає до 8,16 Вт/(м²·К) пропорційно збільшенню швидкості обдуву до 6 м/с.

Наукові результати розділу 2 висвітлено у публікаціях автора: [8, 86, 87, 134].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕЛІОПОКРІВЛІ

У цьому розділі представлено опис експериментальних установок для проведення лабораторних та натурних досліджень геліопокрівлі з прозорим покриттям та без нього, з верхнім та нижнім розташуванням трубок для теплоносія у ССТ. Проведено планування повного факторного експерименту, описано процес проведення замірів та вимірювальну апаратуру, математичне оброблення отриманих результатів та їх представлення у вигляді графіків, номограм та аналітичних залежностей. Дослідження були спрямовані на виявлення впливу визначальних факторів на ефективність геліопокрівлі різної конструкції.

3.1. Ефективність геліопокрівлі в гравітаційній системі сонячного телопостачання

3.1.1. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими під теплопоглиначем

Опис експериментальної установки та умов проведення експерименту. Експериментальна установка змонтована в лабораторії Національного університету «Львівська політехніка» і представляє собою фрагмент геліопокрівлі, джерела випромінювання, бака-акумулятора, вимірювальних приладів та з'єднувальних трубопроводів. Схему та фото експериментальної установки зображено на рис. 3.1.

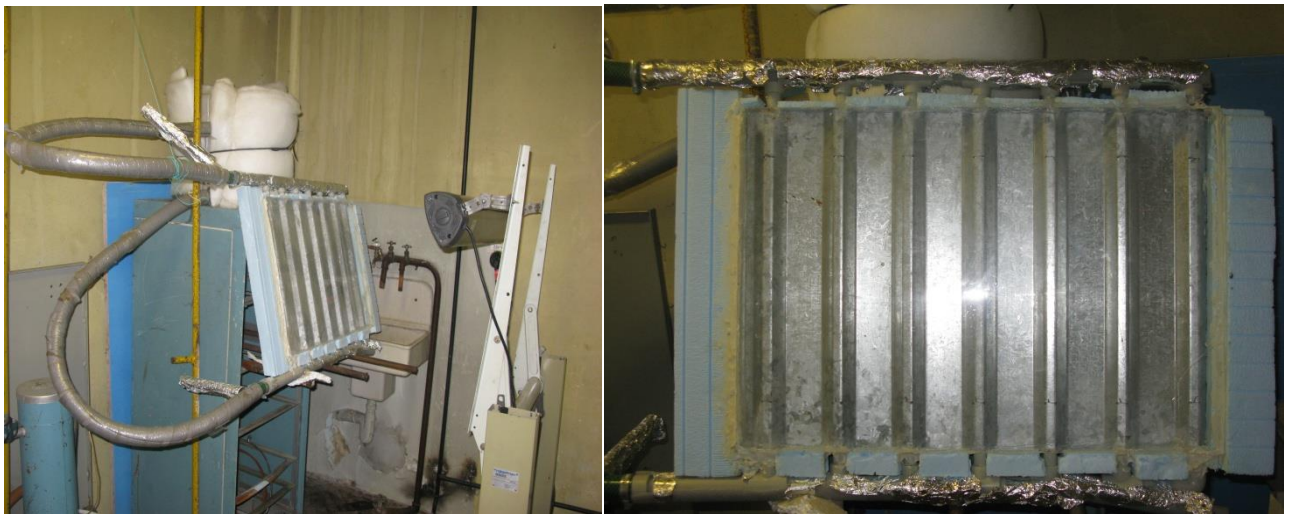
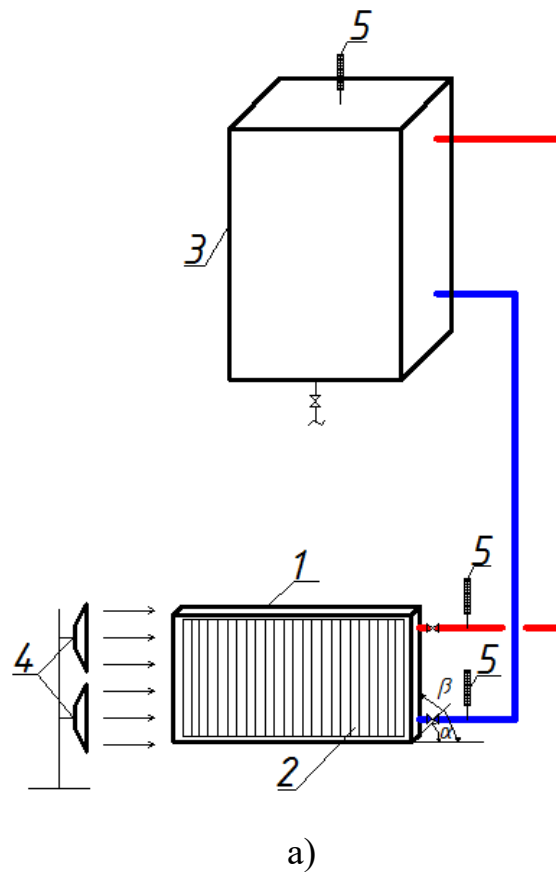


Рис. 3.1. Схема (а) та фото (б) експериментальної установки:
 1 – геліопокрівля; 2 – покрівельний матеріал будівлі; 3 – бак-акумулятор; 4 – джерело випромінювання; 5 – термометри

Роль теплопоглинача в геліопокрівлі виконує металевий покрівельний матеріал даху будівлі, а саме стандартний профільногофрований лист. Розріз геліопокрівлі зображено на рис. 3.2. Перевагою профільного теплопоглинача у порівнянні з класичними плоскими сонячними колекторами є збільшення на

25% площі робочої поверхні та більша можливість теплосприймання у ранішні та вечірні години за рахунок похилих граней [88, 89, 142]. Для досягнення максимального поглинання тепла від джерела випромінювання зовнішня поверхня гофрованого листа була зафарбована в чорний колір.

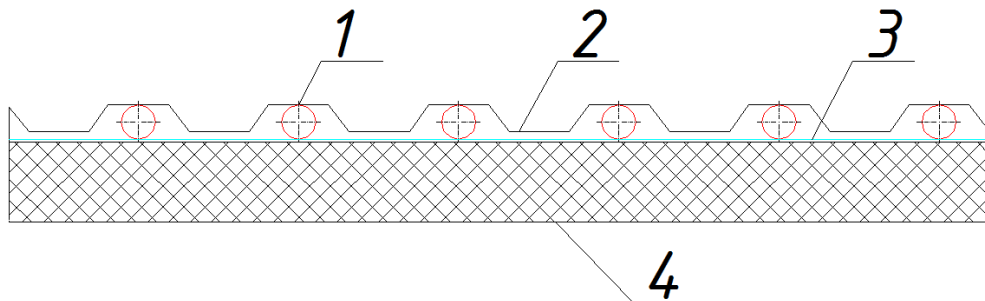


Рис. 3.2. Розріз геліопокрівлі з трубками контуру циркуляції розташованими під теплопоглиначем: 1 – трубки контуру циркуляції; 2 – теплопоглинач; 3 – променевідбиваючий екран; 4 – теплоізоляційний шар

Тепло отримане теплопоглиначем 2 передається теплоносію, який циркулює по трубках контуру циркуляції 1. За рахунок різниці температур, та відповідно різниці густин теплоносія в зоні вхідного і вихідного патрубків геліопокрівлі створюється циркуляція теплоносія від геліопокрівлі до баку-акумулятора. З метою підвищення ефективності роботи геліопокрівлі використано шар теплоізоляції 4 із пінополістиролу товщиною 50 мм і променевідбиваючого екрану 3. Завдяки вибраним заходам та селективного покриття на зовнішній поверхні теплопоглинача створюються умови для максимального поглинання і передачі теплоносієві падаючого на покрівлю сонячного випромінювання.

Для зменшення тепловтрат ССТ всі підвідні трубопроводи та бак-акумулятор були теплоізольовані з використанням при цьому альмінієвої фольги як тепловідбивача. Джерелом теплового випромінювання служив побутовий інфрачервоний випромінювач Alf, який випромінює у довгохвильовому спектрі видимого випромінювання, та інфрачервоному спектрі. Потужність випромінювання складала 300-1300 Вт/м². Інтенсивність потоку випромінюваної енергії вимірювалась актинометром з ціною поділки 0,5 калорій.

Перед початком дослідів складався спеціальний журнал, відповідно до методики і плану досліджень, в який записувались результати. Здійснювався контроль за тим, щоб на проведення експерименту не впливали інші фактори (сонячна енергія через вікно, гладкі поверхні, затінення сонячного колектора, тощо).

Кожного разу перед початком експерименту система заповнювалась свіжою порцією води. Видалялось повітря із системи. Перевірялась герметичність системи при робочому тиску. Перевірялась справність вимірювальних приладів.

Впродовж проведення експерименту вимірювались: інтенсивність потоку енергії; температура теплоносія на вході в геліюпокрівлю; температура теплоносія на виході із геліюпокрівлі; температура теплоносія в баку-акумуляторі (в трьох точках по висоті баку). Температура навколишнього повітря та його швидкість вимірювалась термоелектроанемометром TESTO 405 – V1.

Після завершення дослідів виключались теплові випромінювачі, зупинялась циркуляція теплоносія, зливався теплоносій і система заповнювалась новою порцією охолодженого теплоносія.

Прилади та їх похибки вимірювань, які використовувались при проведенні експериментальних досліджень наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Прилади вимірювання та їх похибки

№ п/п	Назва вимірюваної величини	Назва приладу	Абсолютна похибка
1	Інтенсивність теплового випромінювання	Актинометр	± 10 Вт
2	Температура повітря біля експериментальної установки	TESTO 405 – V1	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
3	Швидкість повітряного потоку	TESTO 405 – V1	$\pm 0,1$ м/с
4	Температура теплоносія	Ртутні термометри	$\pm 0,1^\circ\text{C}$

Експериментальні дослідження проводились при таких умовах, припущеннях та спрощеннях:

- густина теплового потоку прийнята однаковою по всій площині ГП;
- ГП не затінювалася;
- вплив відбитої сонячної енергії від навколишніх предметів не враховувався;
- прийнято довірчу ймовірність результатів експерименту 0,95.

Планування експерименту та методика його проведення. Для більш ефективного проведення експериментів і зниження затрат на його організацію проведено планування експерименту відповідно до існуючих методик [1, 10].

Основними факторами, які впливають на ефективність геліопокрівлі є:

- x_1 – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині геліопокрівлі, α , °;
- x_2 – кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі, β , °;
- x_3 – інтенсивність потоку теплової енергії, що випромінює джерело, I_B , Вт/м²;
- x_4 – швидкість (V , м/с) вітру;
- x_5 – напрям (ψ , град) вітру.

Врахувати одночасну зміну всіх 5 факторів є доволі складною задачею, тому для спрощення було запропоновано проведення експериментальних досліджень у два етапи.

На першому етапі дослідів змінними прийняті: x_1 ($\alpha = [30; 90]^\circ$); x_2 ($\beta = [30; 90]^\circ$); x_3 ($I_B = [300; 900]$ Вт/м²) при відсутності впливу факторів x_4 ($V = [2; 6]$ м/с) та x_5 ($\psi = [0; 90]^\circ$).

В другій серії відповідно змінювались: x_3 ($I_B = [300; 900]$ Вт/м²); x_4 ($V = [2; 6]$ м/с); x_5 ($\psi = [0; 90]^\circ$), при сталих значеннях x_1 ($\alpha = 90^\circ$) та x_2 ($\beta = 90^\circ$).

Дані про рівні факторів та інтервали варіювання для I етапу досліджень подано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Назва фактора	Кодоване позначення	Рівні факторів		Інтервал варіювання
		-1	+1	
Кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі α , °	x_1	30	90	60
Кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі β , °	x_2	30	90	60
Інтенсивність теплового потоку I_B , Вт/м ²	x_3	300	900	600

Кути падіння теплового потоку $\alpha = 30^\circ$ та $\beta = 30^\circ$, а також інтенсивність теплового потоку $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$ відповідає кутам падіння та інтенсивності теплового потоку в ранішні та вечірні години, а кути $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$, а також $I_B = 900 \text{ Вт/м}^2$ – відповідає параметрам теплового потоку в полудень.

Було складено матрицю планування повного факторного експерименту (ПФЕ) із врахуванням взаємодії факторів (табл. 3.2). Реальна теплопоглинальна здатність сонячного колектора першочергово змінюється впродовж світлового дня відповідно до кута падіння теплового потоку на поверхню теплопоглинача. Для оцінки роботи геліопокрівлі параметром оптимізації вибрано коефіцієнт ефективності геліопокрівлі $K_{\text{еф}}$, який показує, як впливає зміна кута падіння променів на ефективність геліопокрівлі.

$$K_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{ак max}}}{Q_{\text{ак i}}} \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{ак max}}$ – теплова енергія, що акумулювалась в баку-акумуляторі при кутах падіння теплового потоку – $\alpha = 90^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ та інтенсивності теплового потоку $I_B = 900 \text{ Вт/м}^2$; $Q_{\text{ак i}}$ – отримана теплова енергія геліосистемою за інших кутів падіння та інтенсивності теплового потоку.

Теплова енергія, що акумулювалась в баку-акумуляторі, визначалась за формулою:

$$Q_{\text{ак}} = m \cdot c \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) \quad (3.2)$$

де m – маса теплоносія в баці-акумуляторі, кг; c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К); $t_{\text{п}}$, $t_{\text{к}}$ – відповідно температури теплоносія в баці-акумуляторі на початку та вкінці експерименту, К.

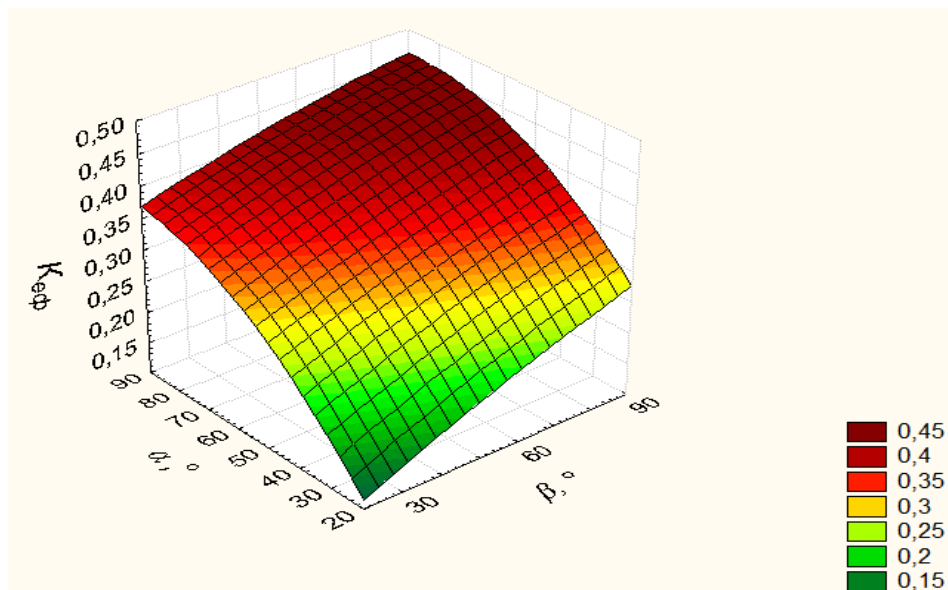
На I етапі дослідів $K_{\text{эф}}$ відображає вплив кутів падіння та інтенсивності теплового потоку на ефективність ГП з гофрованим теплопоглиначем.

Таблиця 3.2

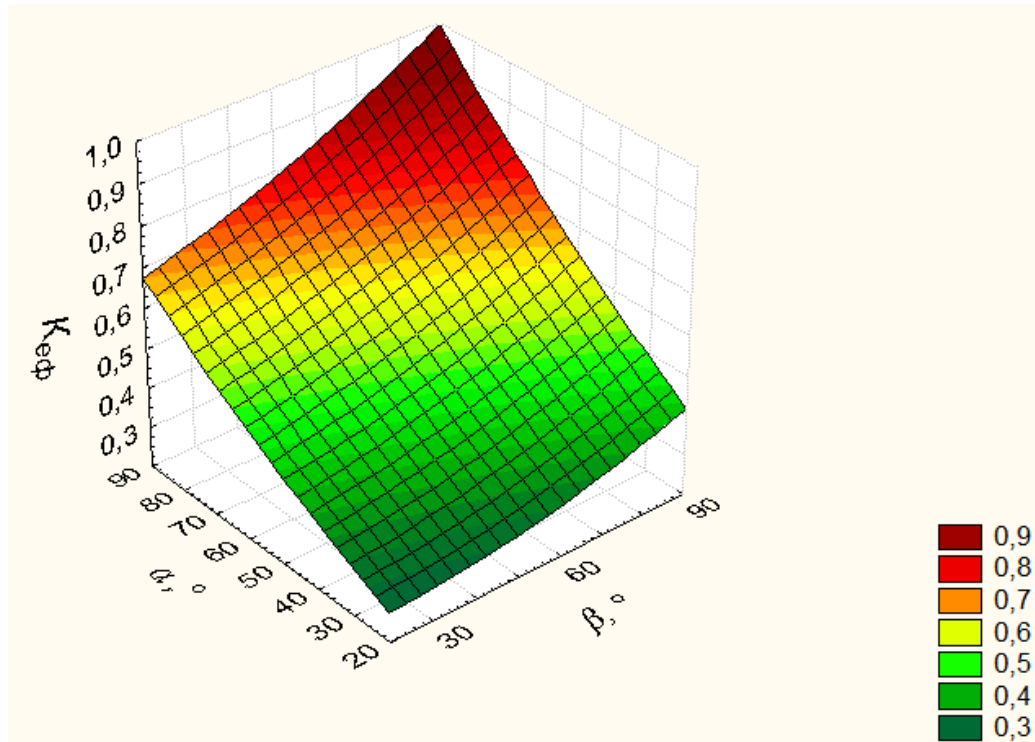
Матриця планування експерименту

№	x_0	α	β	$I_{\text{в}}$	$\alpha \beta$	$\alpha I_{\text{в}}$	$\beta I_{\text{в}}$	$\alpha \beta I_{\text{в}}$	$K_{\text{эф}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,20
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,27
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,40
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,47
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,33
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,47
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,73
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,00

Результати експериментальних досліджень. Результати експериментальних вимірювань розглянутої ССТ подані у тривимірному вигляді при інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м² (рис. 3.3).



а)



б)

Рис. 3.3. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання при інтенсивності теплового потоку $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_B = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень, зображених на рис. 3.3, можна зробити висновок, що ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання за зміни кутів падіння α і β від 90° до 30° зменшується на 67%.

Коефіцієнт корисної дії системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею η , за кількістю енергії, отриманої баком-акумулятором $Q_{\text{ак}}$, визначався за формулою:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ак}}}{Q_{\text{пром}}} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

де $Q_{\text{ак}}$ – кількість тепла, що отримав бак-акумулятор за час τ , с, визначалась експериментально; $Q_{\text{пром}}$ – кількість променевого тепла, що надійшла на поверхню геліопокрівлі за той самий проміжок часу τ , с.

$$Q_{\text{пром}} = F \cdot I_B \cdot \tau, \quad (3.4)$$

де F – площа геліопокрівлі, м^2 ; I_B – інтенсивність випромінювання джерела на поверхню геліопокрівлі, $\text{Вт}/\text{м}^2$; τ – проміжок часу, с.

Зміну коефіцієнта корисної дії ССТ із геліопокрівлею впродовж експерименту зображено на рис. 3.4.

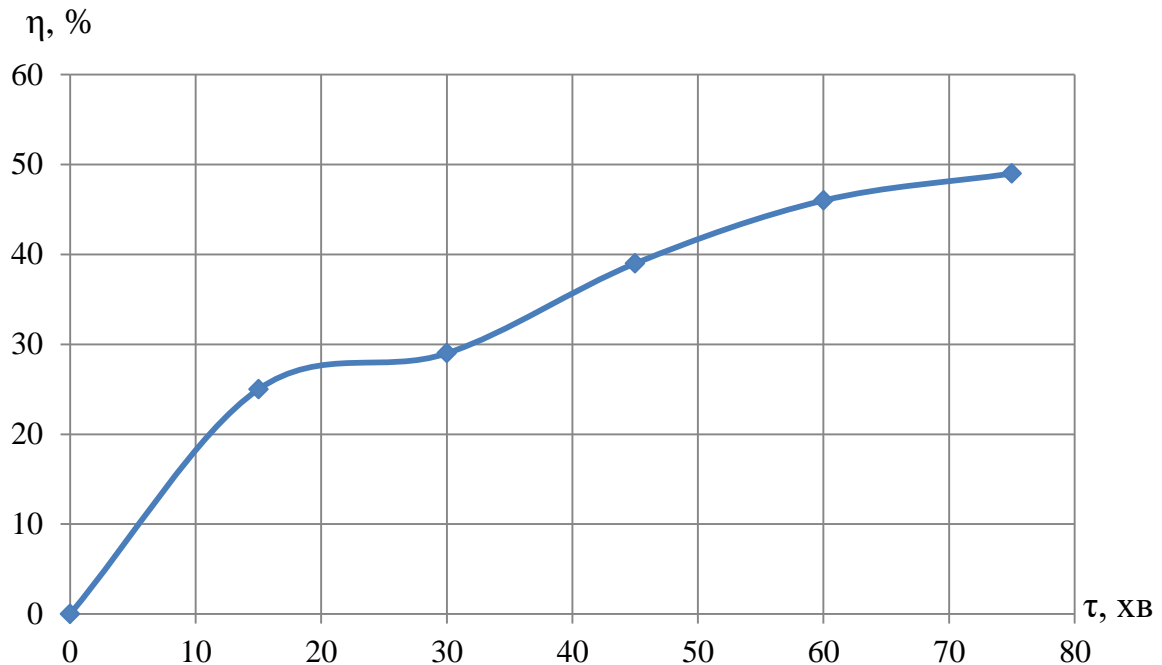


Рис. 3.4. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею без прозорого покриття впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт}/\text{м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.4, ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею без прозорого покриття змінюється від 25% до 45%. При цьому середнє значення ККД розглянутої геліосистеми становить 38%.

Опрацювання результатів експерименту. Опрацювання результатів дослідження проводились відомими методами математичної статистики. Кожен експеримент супроводжувався виникненням похибки. Для оцінки похибок кожен експеримент проводився декілька раз, тому проводилась серія паралельних дослідів. Оцінка відтворюваності дослідів зводилася до визначення дисперсії відтворюваності дослідів. Досліди виконувались у випадковій послідовності, яка встановлювалась за допомогою таблиці випадкових чисел.

Під час проведення експериментів кожен дослід проводився тричі, при однакових умовах, для того, щоб можна було оцінити похибки. Під час кожного дослідів отримувались значення функції відгуку, які усереднювались.

Для перевірки сумнівних результатів використовувався критерій Стьюдента:

$$\frac{y_i - y_{cp}}{s} \geq t \quad (3.5)$$

де t – критерій Стьюдента; y_{cp} – середнє арифметичне значення результатів паралельних дослідів; y_i – результат окремого дослідів; s – квадратична похибка.

Середнє арифметичне значення результатів паралельних дослідів:

$$y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.6)$$

де n – кількість паралельних дослідів.

Відхилення результату окремого дослідів від середньоарифметичного представляють як різницю $y_i - y_{cp}$. Наявність відхилення свідчить про мінливість варіації значень паралельних дослідів. Для виміру цієї мінливості запропоновано застосувати дисперсію – середнє значення квадрату відхилень величини від її середнього значення:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp})^2}{n - 1}, \quad (3.7)$$

де $(n - 1)$ – число степенів вільності, рівне кількості дослідів мінус 1.

Корінь квадратний із дисперсії взятий з додатнім знаком, називається середнім квадратичним відхиленням:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (3.8)$$

Однорідність дисперсій перевіряється за даними статистичних критеріїв, найпростіший з яких є критерій Фішера F (F – критерій), який являє собою відношення більшої дисперсії s_{max}^2 до меншої s_{min}^2 :

$$F = \frac{s_{max}^2}{s_{min}^2}, \quad (3.9)$$

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 (G – критерій), який визначається як відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій.

Оскільки проводились досліди по визначенню ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання залежно від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання

№	α	β	I_B	Серії дослідів						s^2	
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			Уср, %
				№ пров.дос.	$y'_{1,}$ %	№ пров.дос.	$y''_{1,}$ %	№ пров.дос.	$y'''_{1,}$ %		
1	30	30	300	4	0,171	15	0,229	24	0,2	0,2	0,000841
2	90	30	300	16	0,244	8	0,289	18	0,28	0,27	0,000543
3	30	90	300	12	0,421	22	0,401	5	0,38	0,4	0,000463
4	90	90	300	2	0,465	9	0,446	6	0,5	0,47	0,000721
5	30	30	900	21	0,29	23	0,33	19	0,37	0,33	0,001600
6	90	30	900	3	0,506	13	0,434	17	0,47	0,47	0,001296
7	30	90	900	7	0,699	1	0,756	20	0,74	0,73	0,000831
8	90	90	900	14	1	11	1	10	1	1	0,000000

Критерій Фішера:

$$F = \frac{0,001296}{0,000463} = 2,78.$$

З відповідної таблиці приймалось значення критерію Фішера для рівня значимості 0,05: $F_{табл} = 19,2$.

Порівнюючи отримане з експериментів та табличне значення критерію Фішера $2,78 < 19,2$ видно, що табличне значення більше експериментального. Для певності використано критерій Кохрена:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,01349}{0,006295} = 0,205.$$

З відповідної таблиці для числа степенів вільностей $f = n - 1 = 2$ і кількості дослідів $N = 8$ приймається $G_{табл} = 0,515$ для рівня значимості 0,05.

Оскільки табличне значення критерію Кохрена більше за експериментальне $0,205 < 0,515$, то однорідність дисперсії підтверджується.

Після перевірки на однорідність, дисперсія усереднюється і використовується наступна формула:

$$s^2(y) = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - y_{cp})}{N(n-1)} \quad (3.10)$$

Отже, дисперсія відтворюваності рівна:

$$s^2(y) = \frac{0,0126}{16} = 0,00079$$

Коефіцієнти регресії визначались за формулою:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_{ji}}{N}, \quad (3.11)$$

де j – номер фактора; N – кількість дослідів.

Був прийнятий такий запис моделі:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.12)$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{сф}} = 0,48 + 0,07\alpha + 0,17\beta + 0,15I_{\text{в}} + 0,02\alpha\beta + 0,03\alpha I_{\text{в}} + 0,07\beta I_{\text{в}} + 0,02\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.13)$$

Коефіцієнти регресії показують наскільки значимим є вплив фактору на функцію відгуку та як зміна фактора вплине на зміну параметра оптимізації.

Після визначення коефіцієнтів регресії проводилась перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Перш за все визначалася дисперсія коефіцієнта регресії за формулою:

$$S^2(b_j) = \frac{S^2(y)}{N} \quad (3.14)$$

Довірчий інтервал задавався верхньою і нижньою границею:

$$I_i = (b_i + \Delta b_i; b_i - \Delta b_i), \quad (3.15)$$

де b_i – коефіцієнт регресії; Δb_i – можлива похибка.

$$\Delta b = \pm t \cdot S(b_j) = t \sqrt{\frac{s_y^2}{N(n-1)}}, \quad (3.16)$$

де t – табличне значення критерію Стьюдента при числі ступенів вільності, з яким визначалось $S^2(y)$ і вибраному рівні значимості; $S(b_j)$ – квадратична похибка коефіцієнта регресії.

Коефіцієнт буде значимий, якщо його абсолютна величина більша довірчого інтервалу.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00079}{16}} = \pm 0,014$$

Отже, всі факторами є значимі і рівняння регресії не зміниться та буде мати вигляд:

$$K_{\text{сф}} = 0,48 + 0,07\alpha + 0,17\beta + 0,15I_{\text{в}} + 0,02\alpha\beta + 0,03\alpha I_{\text{в}} + 0,07\beta I_{\text{в}} + 0,02\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.17)$$

На підставі аналізу коефіцієнтів регресії можна констатувати, що суттєвий вплив на поведінку функції відгуку виявляє фактор x_2 (кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі $\beta, ^\circ$) та x_3 (інтенсивність теплового потоку $I_B, \text{Вт/м}^2$), а фактор x_1 (кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині геліопокрівлі $\alpha, ^\circ$) впливає не так істотно.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі тепlopостачання $K_{\text{еф}}$ від кутів падіння теплового потоку α і β та інтенсивності теплового потоку I_B (рис. 3.5).

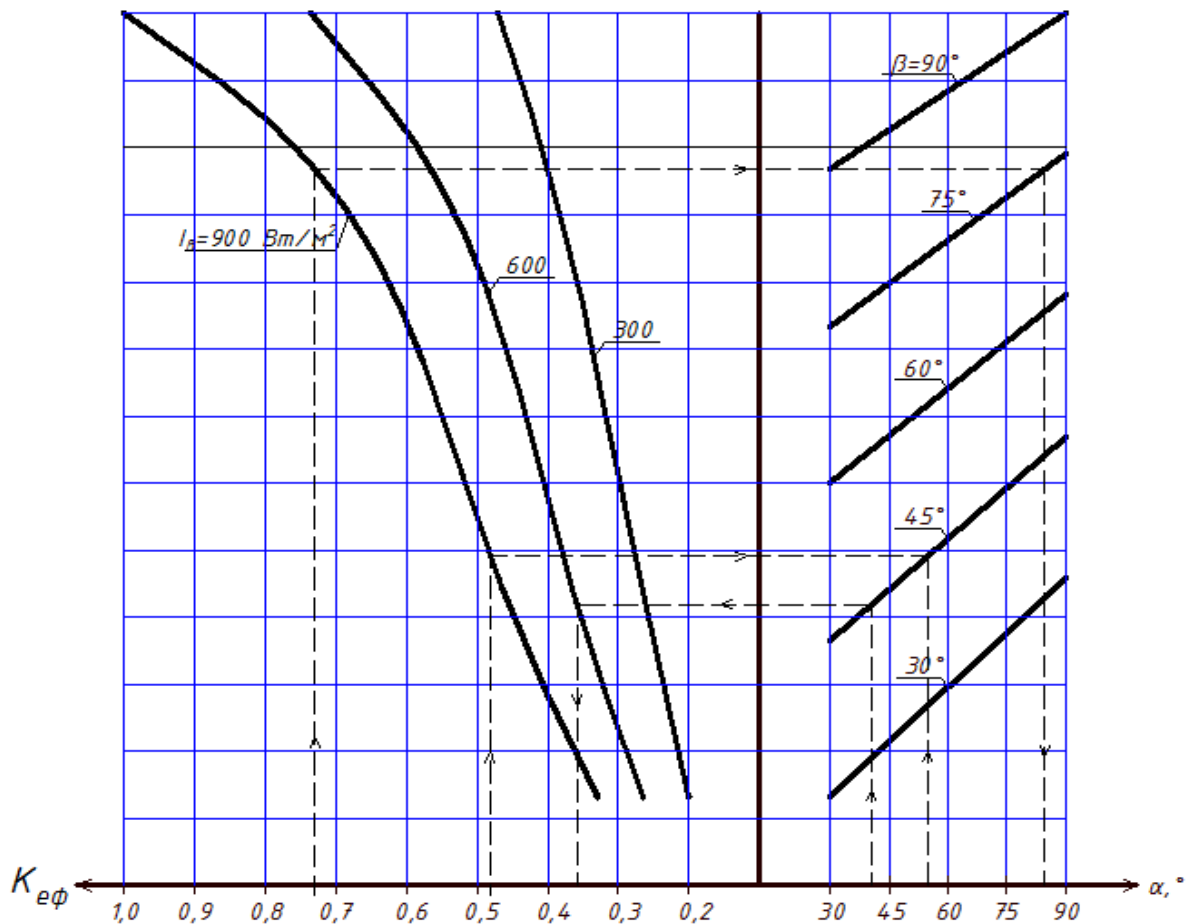
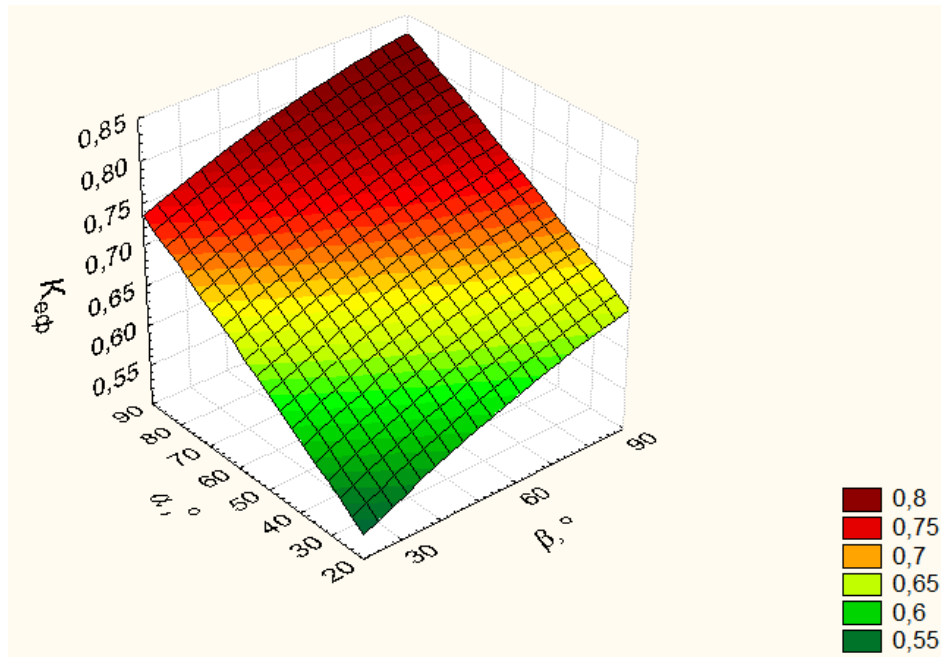


Рис. 3.5. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку α і β та інтенсивності теплового потоку I_B

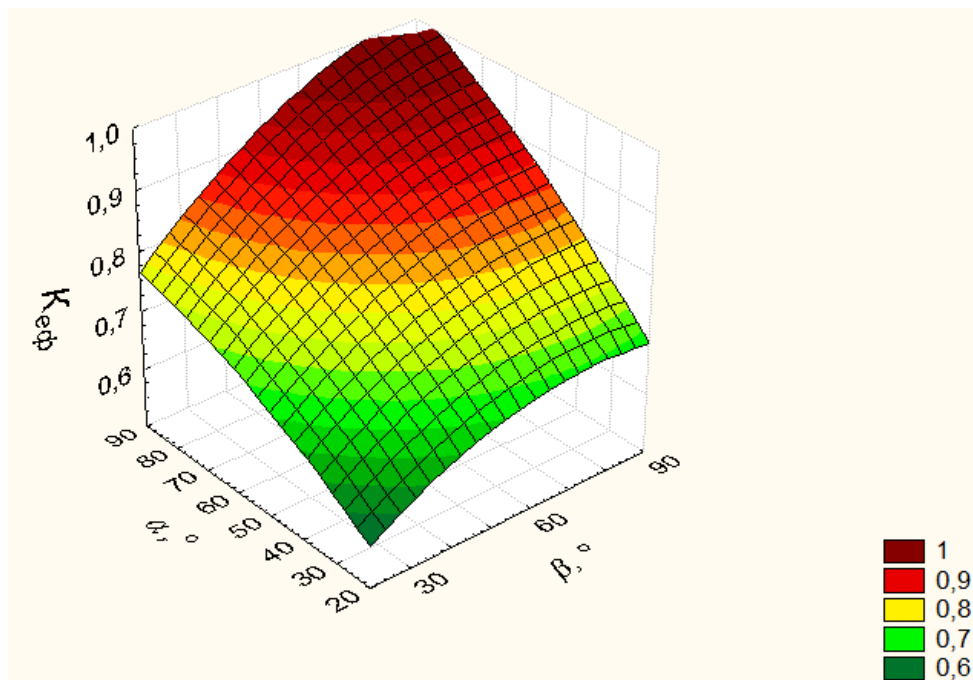
Номограма (рис. 3.5) апроксимується емпіричною залежністю (3.18) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття $K_{\text{еф}}$ у

Впродовж проведення експерименту вимірювались: інтенсивність потоку енергії; температура теплоносія на вході та виході з ГП та в баку-акумуляторі.

Для наочності результати експериментальних досліджень представлені у тривимірному вигляді за інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м² (рис. 3.6).



а)



б)

Рис. 3.6. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі тепlopостачання при інтенсивності теплового потоку $I_B = 300$ Вт/м² (а), $I_B = 900$ Вт/м² (б)

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень зображених на рис. 3.6, можна зробити висновок, що ефективність геліопокрівлі з додатковим заскленням у гравітаційній ССТ при зміні кутів падіння α і β від 90° до 30° зменшується на 42%, тоді як у звичайних плоских сонячних колекторів – на 60% [110, 111, 113]. Змінивши кути падіння сонячного випромінювання відбувається незначне падіння ефективності геліопокрівлі.

Зміну коефіцієнта корисної дії ССТ із геліопокрівлею з прозорим покриттям впродовж експерименту зображено на рис. 3.7.

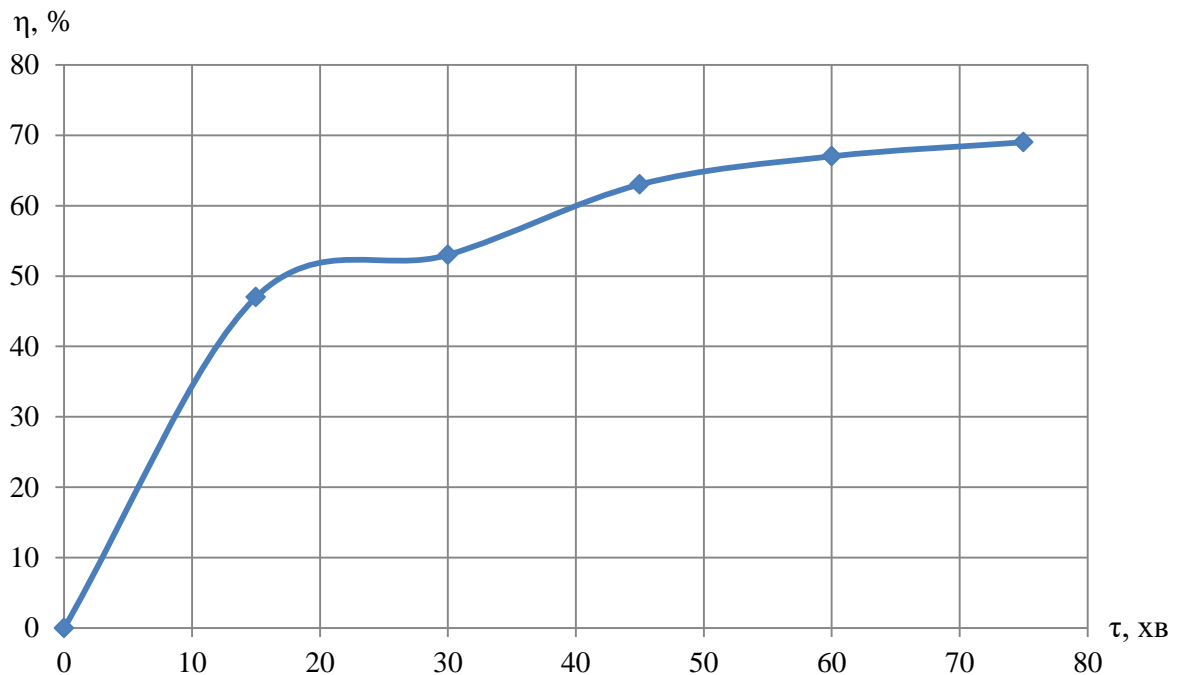


Рис. 3.7. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею з прозорим покриттям впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_b = 600 \text{ Вт/м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.7 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею з прозорим покриттям змінюється від 47% до 69%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 60%.

Оскільки проводились дослідження по визначенню ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям залежно від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі теплопостачання

№	α	β	$I_{\text{в}}$	Серії дослідів						$U_{\text{ср}}$		s^2
				1-а серія		2-а серія		3-а серія		%		
				№ пров. дос.	$y'_{i, \%}$	№ пров. дос.	$y''_{i, \%}$	№ пров. дос.	$y'''_{i, \%}$			
1	30	30	300	4	0,55	15	0,61	24	0,58	0,58	0,000900	
2	90	30	300	16	0,642	8	0,679	18	0,719	0,68	0,001483	
3	30	90	300	12	0,735	22	0,759	5	0,756	0,75	0,000171	
4	90	90	300	2	0,837	9	0,811	6	0,842	0,83	0,000277	
5	30	30	900	21	0,668	23	0,691	19	0,681	0,68	0,000133	
6	90	30	900	3	0,73	13	0,77	17	0,75	0,75	0,000400	
7	30	90	900	7	0,81	1	0,83	20	0,85	0,83	0,000400	
8	90	90	900	14	1	11	1	10	1	1	0,000000	

$$F = \frac{0,001483}{0,000133} = 11,15 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001483}{0,003764} = 0,394 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,008}{16} = 0,00047.$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{сф}} = 0,761 + 0,054\alpha + 0,091\beta + 0,051I_{\text{в}} + 0,009\alpha\beta + 0,009\alpha I_{\text{в}} + 0,011\beta I_{\text{в}} + 0,014\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.19)$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводилась перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00047}{16}} = \pm 0,011$$

Якщо знехтувати факторами, які є не значимі то рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{еф}} = 0,761 + 0,054\alpha + 0,091\beta + 0,051I_{\text{в}} + 0,014\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.20)$$

На підставі аналізу коефіцієнтів регресії можна констатувати, що найбільший суттєвий вплив на поведінку функції відгуку виявляє фактор x_2 (кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі $\beta, ^\circ$).

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$ (рис. 3.8).

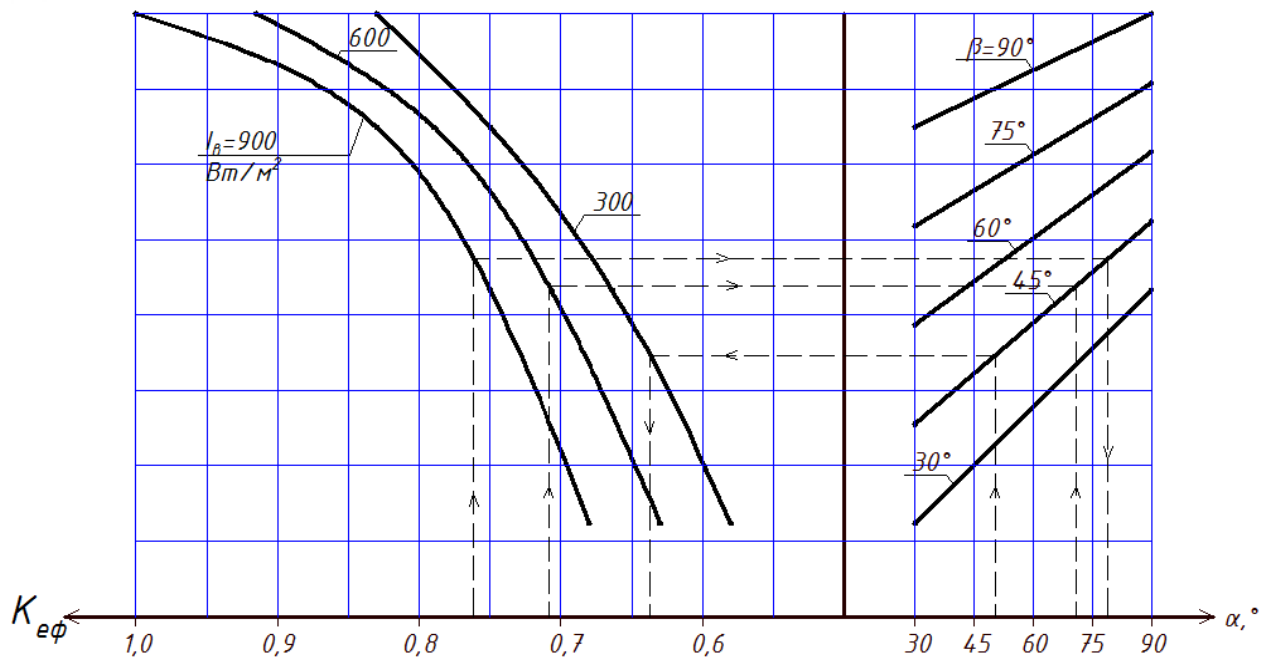


Рис. 3.8. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку α і β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$

Номограма (рис. 3.8) апроксимується емпіричною залежністю (3.21) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від кутів падіння теплового потоку α і β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$:

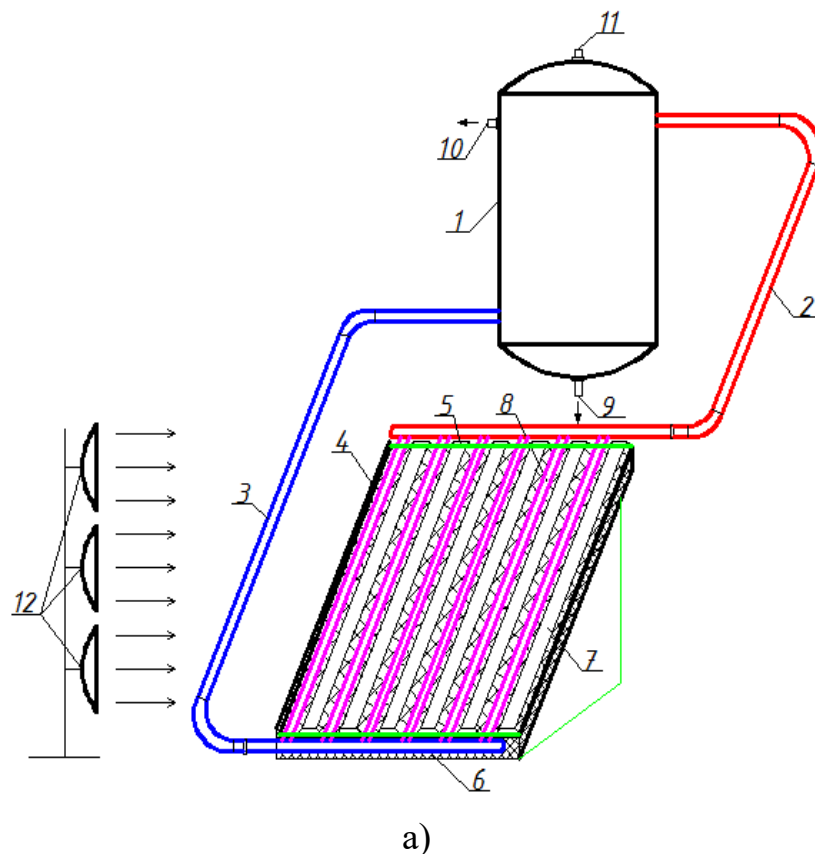
$$K_{\text{эф}} = \left((3625 + 3 \cdot I_{\text{в}}) + (37 - 0,022 \cdot I_{\text{в}}) \cdot \beta + (27 - 0,025 \cdot I_{\text{в}}) \cdot \alpha + (-0,233 + 5,556 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{в}}) \cdot \beta \cdot \alpha \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.21)$$

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності більша довірчого інтервалу, отже рівняння (3.21) не змінюється.

3.1.3. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем

Для підвищення ефективності геліопокрівлі було запропоновано конструкцію геліопокрівлі з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем сонячної енергії. Це дає змогу збільшити площу поглинання, що підвищує її ефективність.

Установка складалася із геліопокрівлі з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем, бака-акумулятора, джерела випромінювання та вимірювальних приладів. Схема та фото експериментальної установки зображені на рис. 3.9.





б)

Рис. 3.9. Схема (а) та фото (б) експериментальної установки:
 1 – бак-акумулятор; 2 – подаючий трубопровід; 3 – зворотній трубопровід; 4 – геліопокрівля; 5 – прозоре покриття; 6 – теплоізоляційний шар; 7 – покрівельний матеріал будівлі; 8 – трубки контуру циркуляції; 9 – патрубок зливу теплоносія; 10 – патрубок відбору теплоносія; 11 – повітровипускний клапан; 12 – джерело випромінювання.

Експериментальна установка працює наступним чином.

Сонячне проміння попадає на покрівельний матеріал будівлі 7 та трубки для теплоносія 8. При цьому відбувається їх нагрівання. За рахунок різниці температур, та відповідно різниці густин теплоносія в зоні вхідного і вихідного патрубків, створюється циркуляція теплоносія. Нагрітий теплоносій через подаючий трубопровід 2 подається у бак-акумулятор гарячої води 1. Нагріта вода через патрубок 10 подається споживачу. Охолоджений теплоносій по зворотньому трубопроводу 3 повертається у геліопокрівлю 4 і нагрівається. Спуск води з бака-акумулятора відбувається через патрубок 9. Випуск повітря – через повітровипускний клапан 11. Теплоізоляційний шар 6 забезпечує зменшення тепловтрат. Розміщення шару променевідбиваючого матеріалу під теплопоглиначем дає можливість збільшити ефективність використання сонячного випромінювання, частина якого пройшла повз теплопоглинач. Шар променевідбиваючого матеріалу відбиває сонячне випромінювання назад на теплопоглинач, в результаті чого теплопоглиначем поглинається практично все сонячне випромінювання, яке потрапляє на геліопокрівлю.

Планування експерименту та методика його проведення. У табл. 3.1 подано дані про рівні факторів та інтервали варіювання.

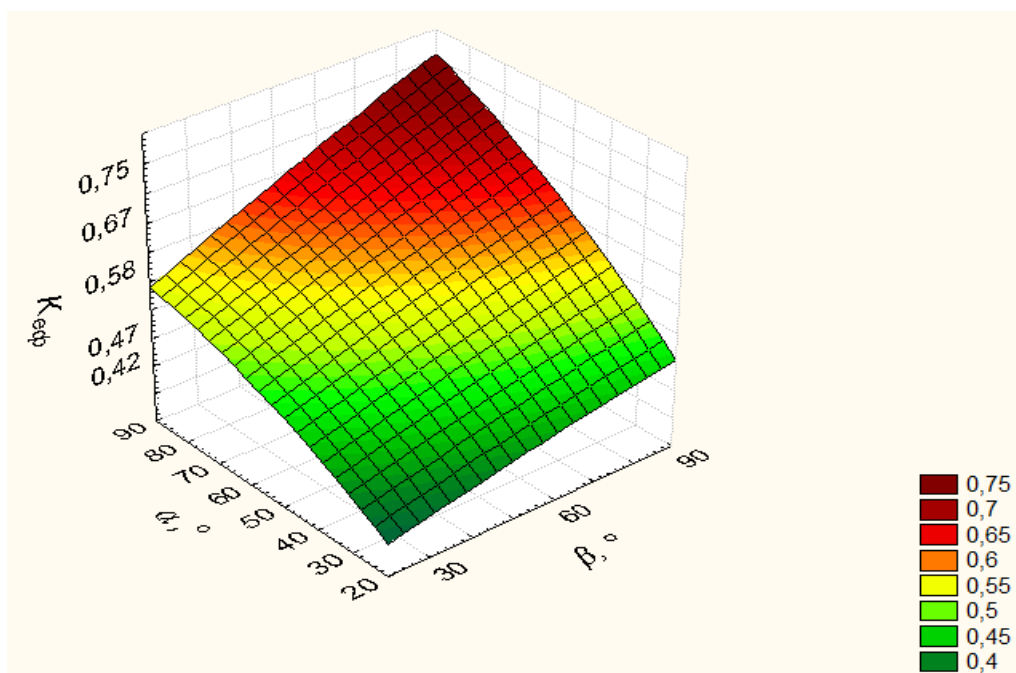
Було складено матрицю планування ПФЕ із врахуванням взаємодії факторів, табл. 3.6. Параметром оптимізації вибрано коефіцієнт ефективності геліопокрівлі $K_{\text{еф}}$, який показує як впливає зміна кутів падіння теплового потоку на ефективність геліосистеми.

Таблиця 3.6

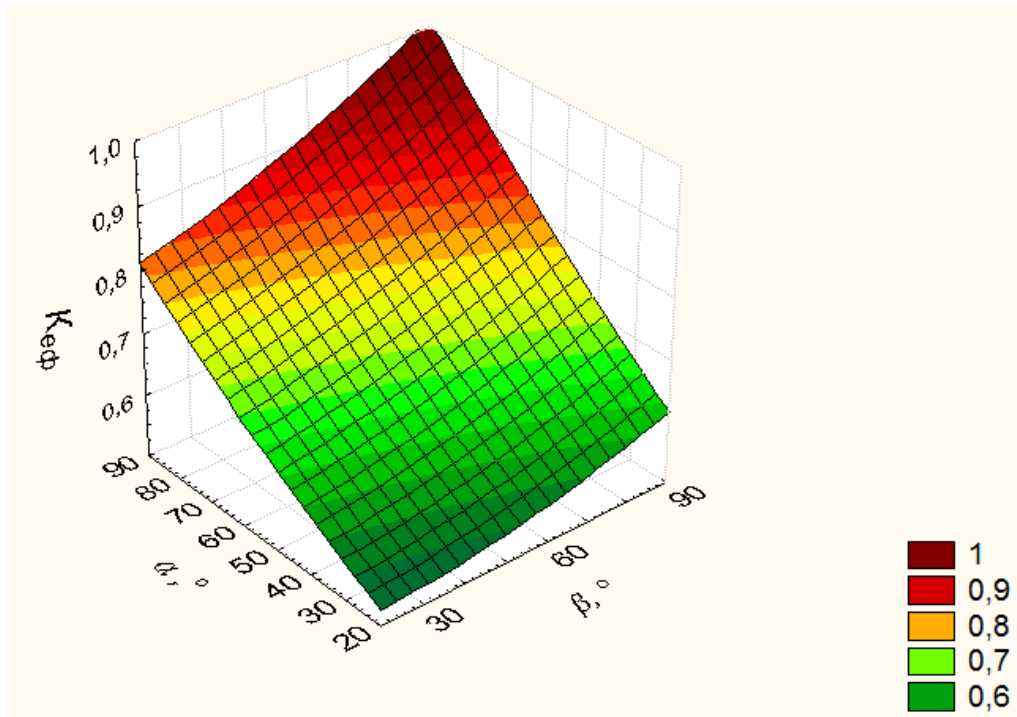
Матриця планування експерименту

№	x_0	α	β	$I_{\text{в}}$	$\alpha \beta$	$\alpha I_{\text{в}}$	$\beta I_{\text{в}}$	$\alpha \beta I_{\text{в}}$	$K_{\text{еф}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,42
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,50
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,58
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,75
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,50
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,58
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,92
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,00

Результати експериментальних вимірювань. Результати обробки експериментальних вимірювань подані у графічній формі (рис. 3.10) при інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м².



а)



б)

Рис. 3.10. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія у гравітаційній системі тепlopостачання при інтенсивності теплового потоку $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_B = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень (рис. 3.10) видно, що ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції, розташованими над теплопоглиначем, за зміни кутів падіння α і β від 90° до 30° зменшується на 50%, що свідчать про незначне падіння ККД геліосистеми.

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ із геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту зображено на рис. 3.11.

Як видно з графіку на рис. 3.11 ККД системи сонячного тепlopостачання з геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту змінюється від 35% до 55%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 46%.

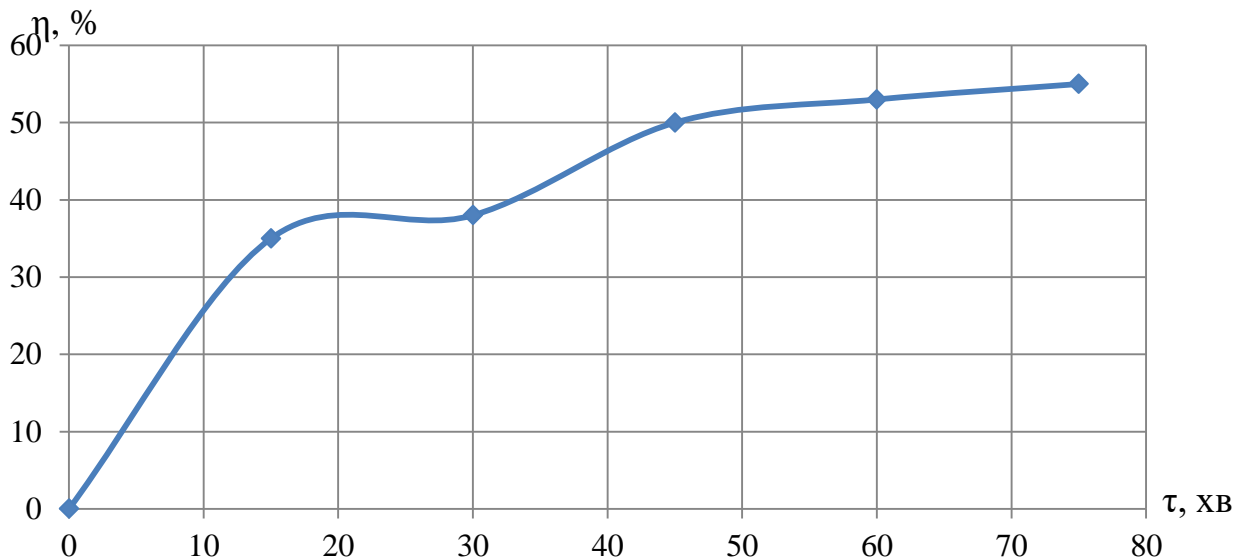


Рис. 3.11. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт/м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Опрацювання результатів дослідження. Оскільки проводились досліди по визначенню ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія у гравітаційній системі тепlopостачання залежно від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стьюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі тепlopостачання

№	α	β	I_B	Серії дослідів						U_{cp}	s^2
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			
				№ пров.дос.	$y'_{1,}$ %	№ пров.дос.	$y''_{1,}$ %	№ пров.дос.	$y'''_{1,}$ %		
1	30	30	300	4	0,38	15	0,43	24	0,45	0,42	0,001300
2	90	30	300	16	0,49	8	0,51	18	0,5	0,5	0,000100
3	30	90	300	12	0,62	22	0,55	5	0,58	0,58	0,001225
4	90	90	300	2	0,74	9	0,76	6	0,75	0,75	0,000100
5	30	30	900	21	0,49	23	0,51	19	0,5	0,5	0,000100
6	90	30	900	3	0,56	13	0,58	17	0,6	0,58	0,000400
7	30	90	900	7	0,91	1	0,93	20	0,92	0,92	0,000100
8	90	90	900	14	1	11	1	10	1	1	0,000000

$$F = \frac{0,001225}{0,000100} = 12,25 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001225}{0,003325} = 0,368 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,0067}{16} = 0,00042$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{эф}} = 0,656 + 0,051\alpha + 0,156\beta + 0,094I_{\text{в}} + 0,011\alpha\beta - 0,011\alpha I_{\text{в}} + 0,054\beta I_{\text{в}} - 0,011\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.22)$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками для теплоносія розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00042}{16}} = \pm 0,011 .$$

Отже, факторами, які є незначимі можна, знехтувати і рівняння регресії набуває вигляду:

$$K_{\text{эф}} = 0,656 + 0,051\alpha + 0,156\beta + 0,094I_{\text{в}} + 0,054\beta I_{\text{в}} \quad (3.23)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що більший вплив на ефективність геліопокрівлі має інтенсивність теплового потоку $I_{\text{в}}$, а кути падіння теплового потоку α та β впливають менше.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія $K_{\text{эф}}$ у гравітаційній системі

теплопостачання від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку I_B (рис. 3.12).

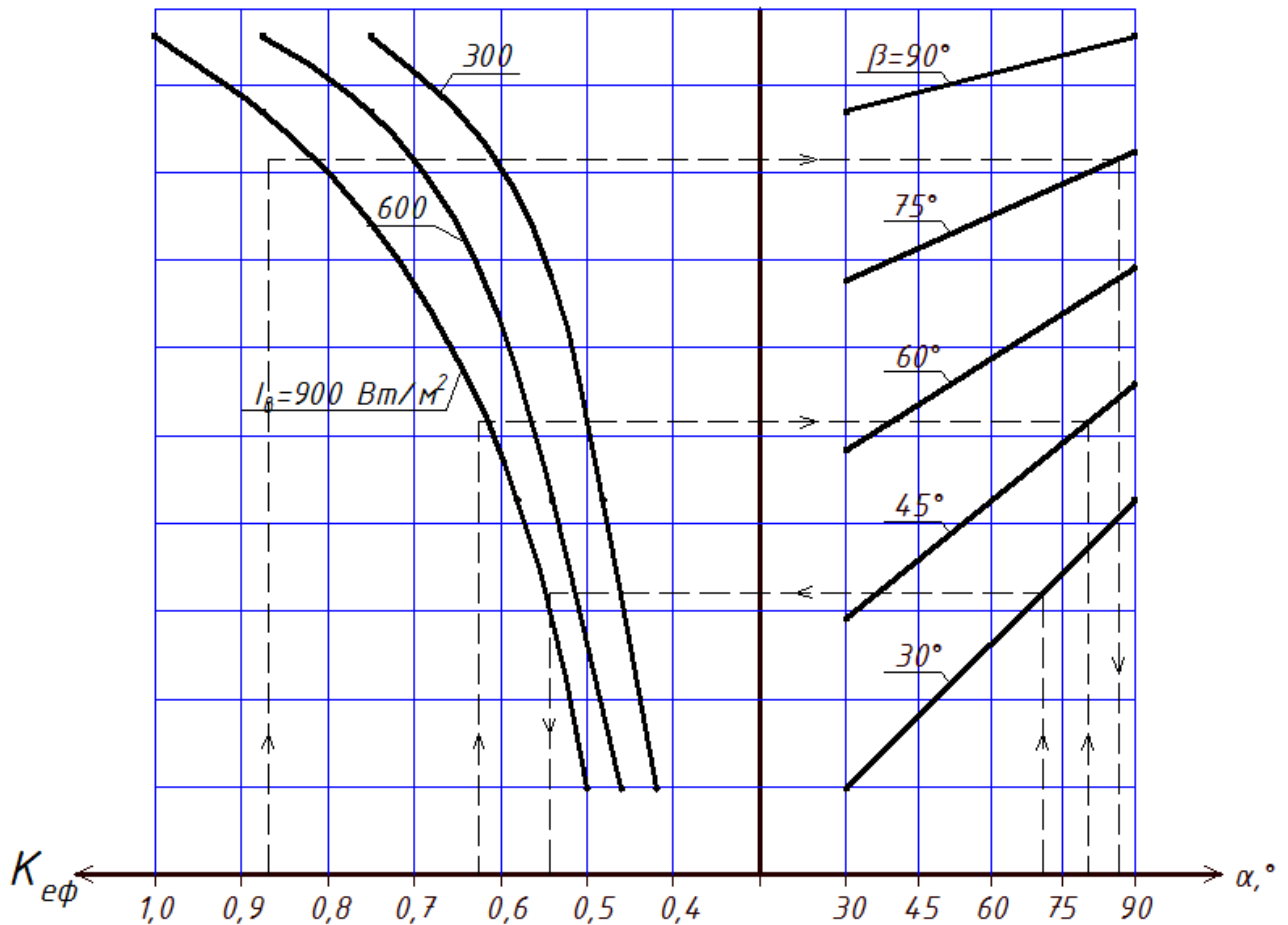


Рис. 3.12. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія K_{ef} у гравітаційній системі теплопостачання від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку I_B

Номограма (рис. 3.12) апроксимується емпіричною залежністю (3.24) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем K_{ef} у гравітаційній системі теплопостачання від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку I_B :

$$K_{ef} = \left(\begin{aligned} &((3588 - I_B) + (-7 + 0,085 \cdot I_B) \cdot \beta + (3 + 0,012 \cdot I_B) \cdot \alpha + \\ &+ (0,375 - 4,167 \cdot 10^{-4} \cdot I_B) \cdot \beta \cdot \alpha \end{aligned} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.24)$$

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності є більшою від розрахункового довірчого інтервалу, отже рівняння (3.24) не змінюється.

3.1.4. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем

Для підвищення ефективності геліопокрівлі та виявлення впливу кутів падіння теплового потоку на її ефективність, геліопокрівлю запропоновано додатково покрити склом. Скло герметично кріпиться, що дає змогу суттєво знизити тепловтрати геліопокрівлі.

У табл. 3.1 подано дані про рівні факторів та інтервали варіювання.

Для максимального виявлення впливу факторів на функцію відгуку була складена матриця планування ПФЕ із врахуванням ефекту взаємодії факторів, табл. 3.8. Параметром оптимізації було вибрано коефіцієнт ефективності $K_{\text{еф}}$ геліопокрівлі з прозорим покриттям та з верхнім розташуванням трубок для теплоносія. Коефіцієнт ефективності $K_{\text{еф}}$ показує, як впливає зміна кута падіння променів та інтенсивності теплового потоку на ефективність геліосистеми.

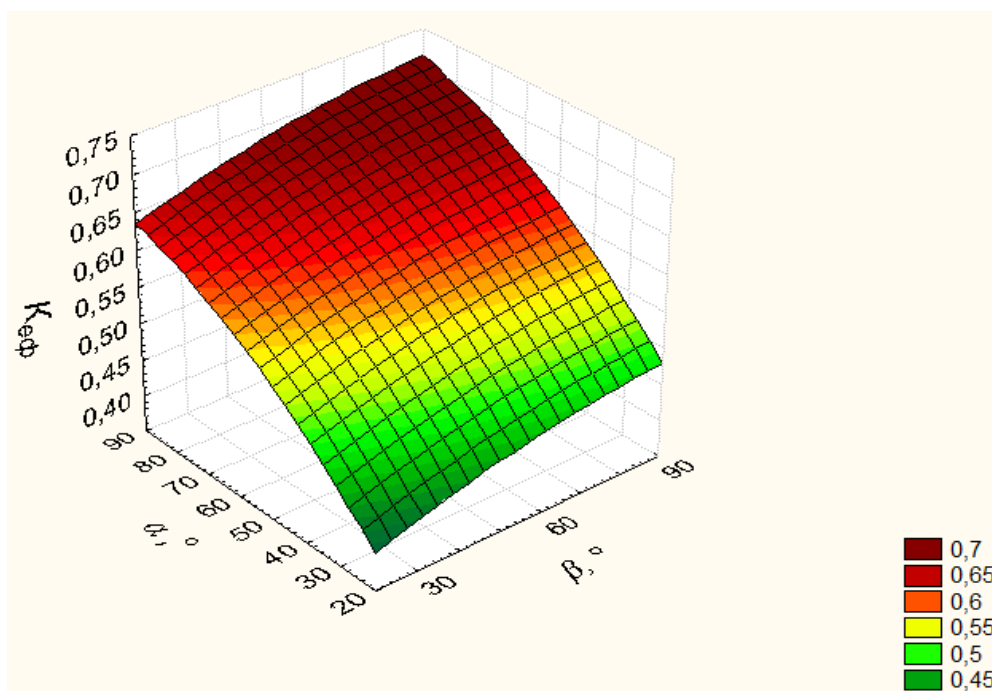
Таблиця 3.8

Матриця планування експерименту

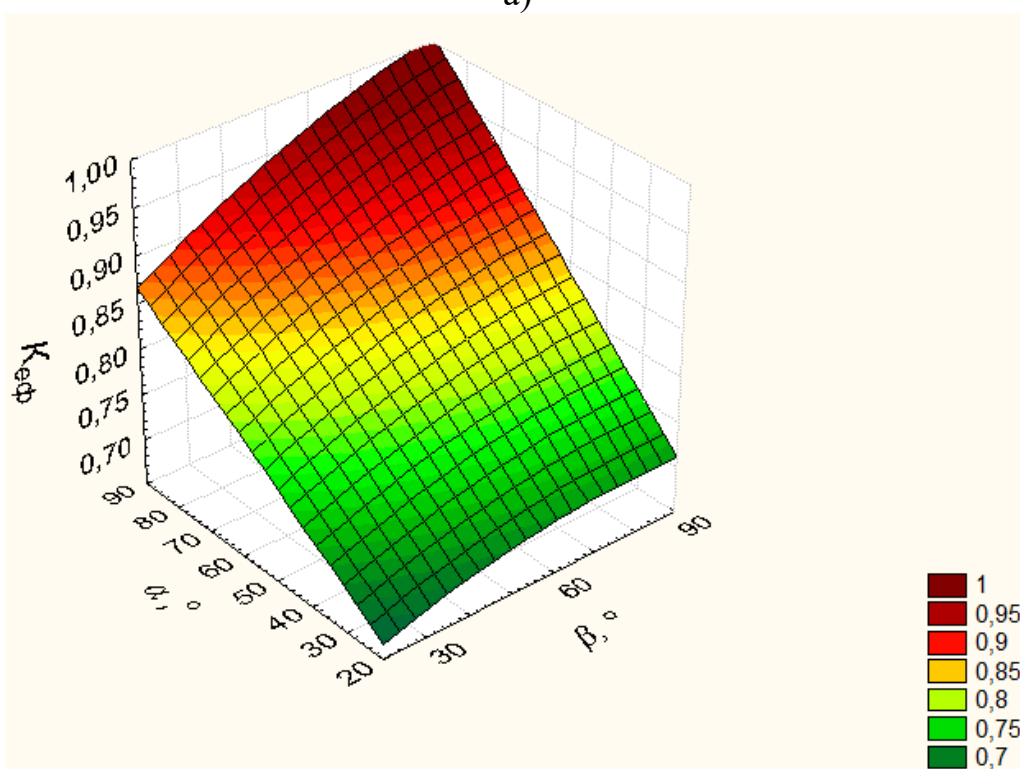
№	x_0	α	β	I_B	$\alpha \beta$	αI_B	βI_B	$\alpha \beta I_B$	$K_{\text{еф}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,47
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,53
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,59
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,71
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,71
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,82
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,88
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,00

Впродовж проведення експерименту вимірювались: інтенсивність потоку енергії; температура теплоносія на вході в геліопокрівлю; температура теплоносія на виході із геліопокрівлі; температура теплоносія в баку-акумуляторі (в трьох точках по висоті баку).

Результати обробки експериментальних даних подані у графічній формі у тривимірному вигляді за інтенсивності теплового потоку 300 та 900 Вт/м² (рис. 3.13).



а)



б)

Рис. 3.13. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем при інтенсивності теплового потоку $I_b = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_b = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

Результати дослідження (рис. 3.13) показали високу ефективність роботи геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками для теплоносія, розташованими над поглиначем сонячної енергії у гравітаційній системі тепlopостачання, при

значних кутах падіння випромінювання (ранішні і вечірні години). Так коефіцієнт ефективності $K_{\text{эф}}$, за інтенсивності теплового потоку $I_b = 300 \text{ Вт/м}^2$, змінюється від 0,71 до 0,47 при зміні кутів падіння α та β від 30° до 90° . В середньому ефективність такої геліопокрівлі, при зміні кутів падіння теплового потоку α та β від 30° до 90° , зменшується на 30%.

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ із геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту зображено на рис. 3.14.

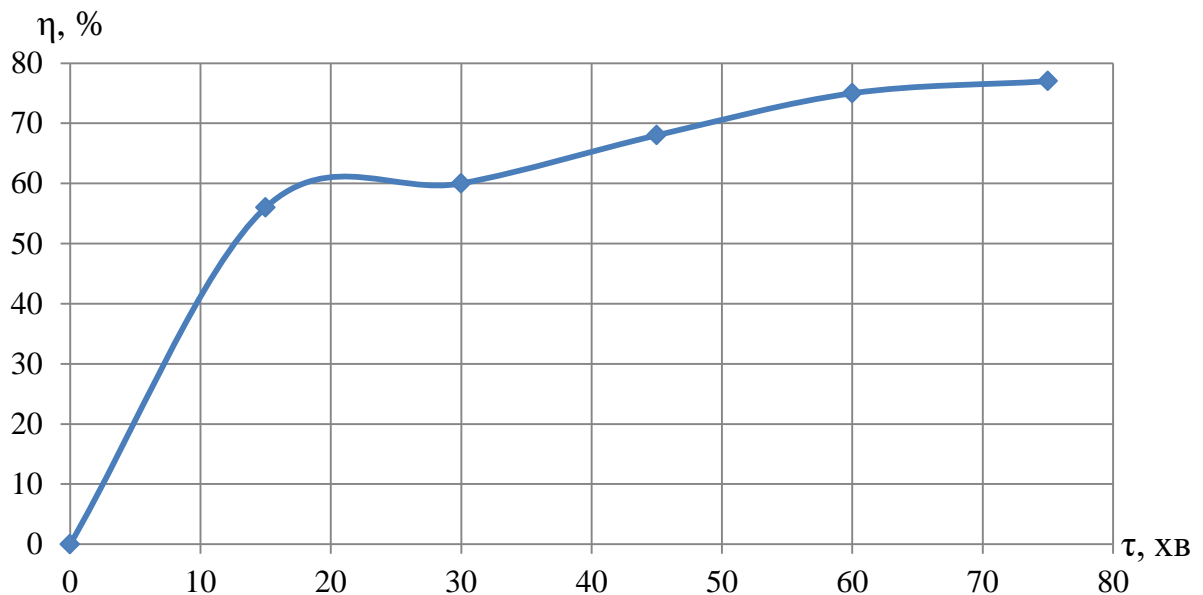


Рис. 3.14. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_b = 600 \text{ Вт/м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.14 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту змінюється від 56% до 77%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 67%.

Оскільки проводились дослідження визначення ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія залежно від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками контуру циркуляції розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі тепlopостачання

№	α	β	I_B	Серії дослідів						$u_{cp},$ %	s^2
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			
				№ пров.дос.	$y'_{I,}$ %	№ пров.дос.	$y''_{I,}$ %	№ пров.дос.	$y'''_{I,}$ %		
1	30	30	300	4	0,445	15	0,495	24	0,47	0,47	0,000625
2	90	30	300	16	0,565	8	0,495	18	0,53	0,53	0,001225
3	30	90	300	12	0,594	22	0,564	5	0,612	0,59	0,000588
4	90	90	300	2	0,71	9	0,74	6	0,68	0,71	0,000900
5	30	30	900	21	0,71	23	0,73	19	0,69	0,71	0,000400
6	90	30	900	3	0,81	13	0,82	17	0,83	0,82	0,000100
7	30	90	900	7	0,899	1	0,861	20	0,88	0,88	0,000361
8	90	90	900	14	1	11	1	10	1	1	0,000000

$$F = \frac{0,001225}{0,000100} = 12,25 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001225}{0,004199} = 0,292 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,0084}{16} = 0,00052$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{эф}} = 0,714 + 0,051\alpha + 0,081\beta + 0,139I_B + 0,009\alpha\beta + 0,006\alpha I_B + 0,006\beta I_B - 0,006\alpha\beta I_B \quad (3.25)$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками для теплоносія розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі тепlopостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00052}{16}} = \pm 0,012$$

Отже, факторами, які є не значимі можна знехтувати і рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{эф}} = 0,714 + 0,051\alpha + 0,081\beta + 0,139I_{\text{в}} \quad (3.26)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що найбільший вплив на ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками для теплоносія розташованими над теплопоглиначем має інтенсивність теплового потоку $I_{\text{в}}$, а кути падіння теплового потоку α та β впливають менше.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції $K_{\text{эф}}$ від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$ (рис. 3.15).

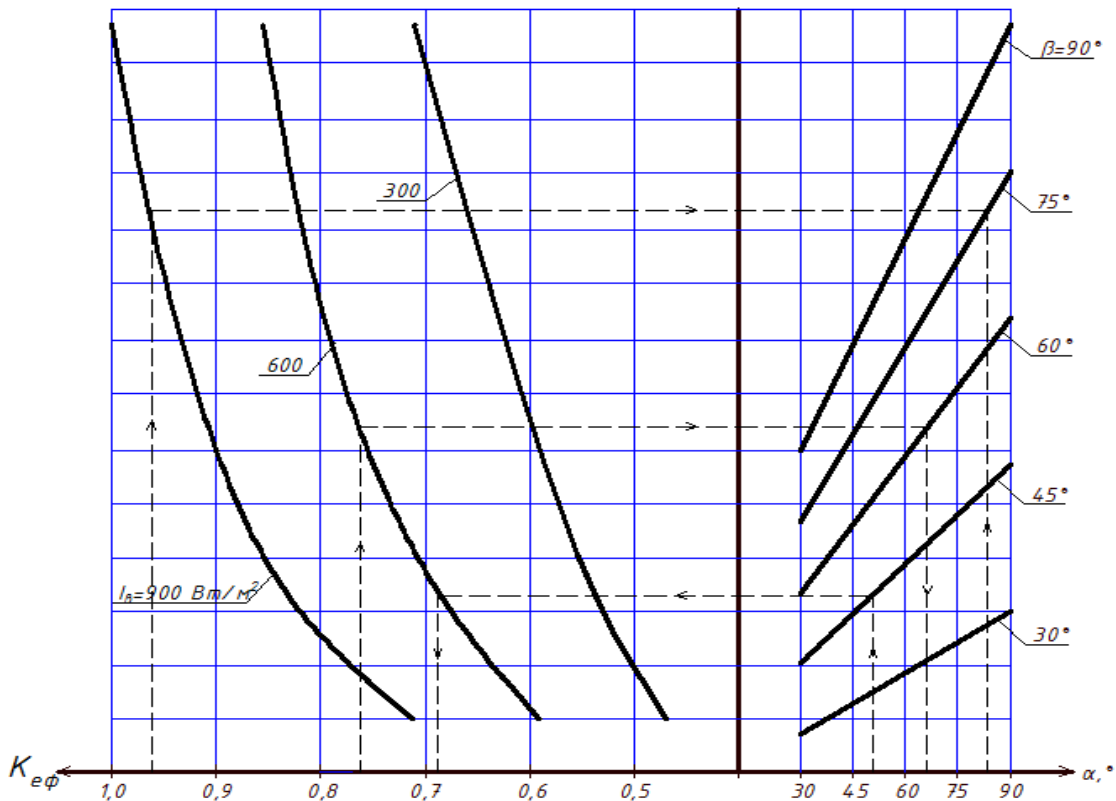


Рис. 3.15. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції $K_{\text{эф}}$ від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$

Номограма (рис. 3.15) апроксимується емпіричною залежністю (3.27) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія $K_{\text{еф}}$ від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку I_B :

$$K_{\text{еф}} = \left((4413 - 2 \cdot I_B) + (-6 + 0,072 \cdot I_B) \cdot \beta + (-16 + 0,07 \cdot I_B) \cdot \alpha + (0,4 - 7,778 \cdot 10^{-4} \cdot I_B) \cdot \beta \cdot \alpha \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.27)$$

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності більша довірчого інтервалу, отже рівняння (3.27) не змінюється.

3.1.5. Зіставлення результатів дослідження ефективності геліопокрівлі у гравітаційній системі тепlopостачання

Після проведених досліджень для визначення оптимальної конструкції геліопокрівлі було проаналізовано коефіцієнти корисної дії систем тепlopостачання з різними конструкціями геліопокрівлі, відображені на рис. 3.16.

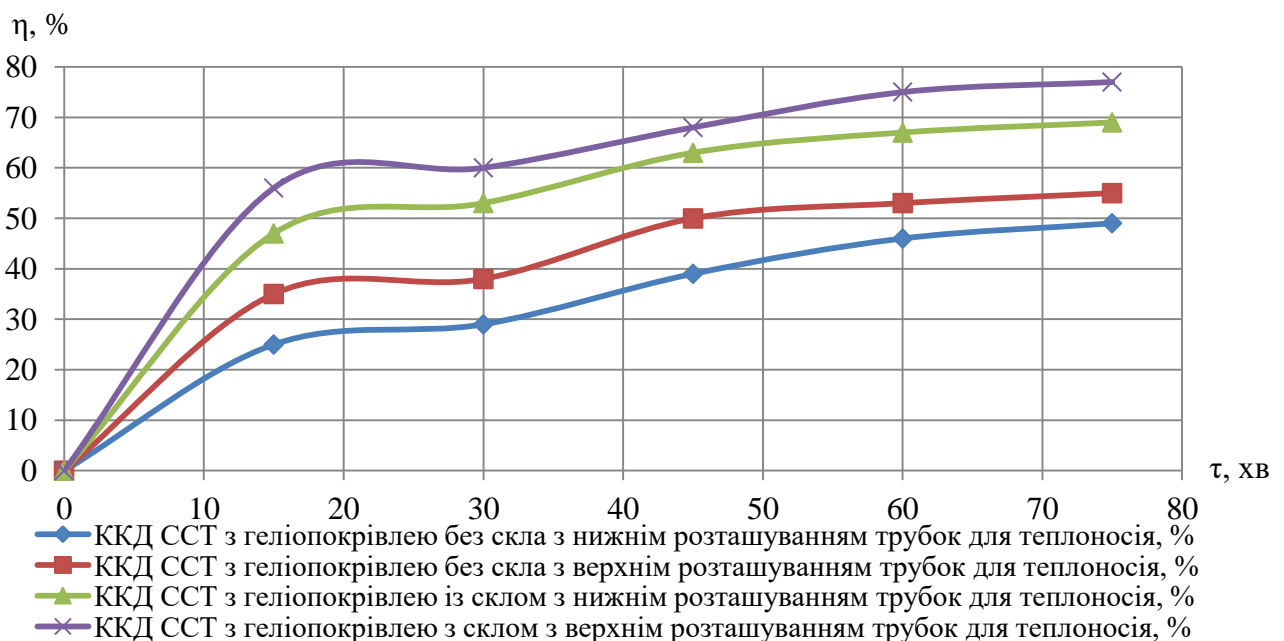


Рис. 3.16. Зміна ККД ССТ з різними конструкціями геліопокрівлі впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт/м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Проаналізувавши результати зміни ККД систем тепlopостачання з різними конструкціями геліопокрівлі (рис. 3.16) встановлено, що ефективність

геліопокрівлі з прозорим покриттям є в середньому на 20% вищою, ніж ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття. ККД ССТ з геліопокрівлею з верхнім розташуванням трубок для теплоносія є на 10% вищою, ніж ККД ССТ з геліопокрівлею з нижнім розташуванням трубок для теплоносія.

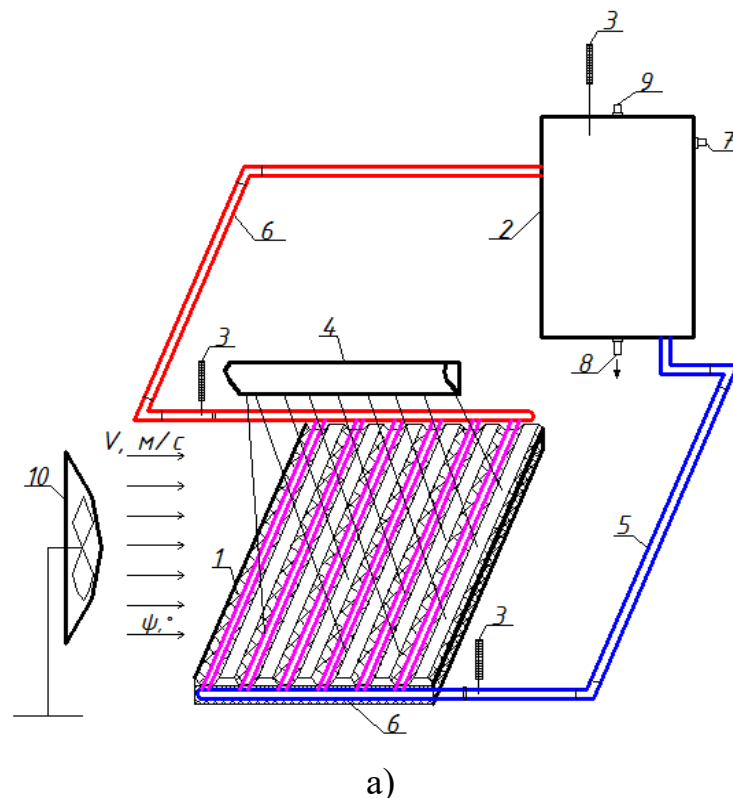
Найвищий ККД системи сонячного теплопостачання є у геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок контуру циркуляції теплоносія з прозорим покриттям, який в середньому становить 67%. Тому подальші дослідження і розрахунки проводилися для геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок для теплоносія.

3.1.6. Вплив вітру на ефективність геліопокрівлі

Дослідження впливу вітру на геліопокрівлю з прозорим покриттям. Важливим є вивчення всіх факторів, які впливають на роботу геліопокрівлі для пошуку оптимальних режимів її роботи.

Метою дослідження є вивчення впливу вітру на роботу геліопокрівлі. Тому важливим є дослідити, як змінюється енергетична ефективність геліопокрівлі при дії на неї повітряного потоку [11, 85, 146].

Схема та фото експериментальної установки зображена на рис. 3.17.





б)

Рис. 3.17. Схема (а) та фото (б) експериментальної установки:
 1 – геліюпокрівля; 2 – бак-акумулятор; 3 – термометри; 4 – джерело випромінювання; 5 – зворотний трубопровід; 6 – подаючий трубопровід; 7 – патрубок подачі теплоносія споживачу; 8 – патрубок зливу теплоносія; 9 – повітровипускник; 10 – вентилятор.

Впродовж експерименту вимірювалась температура теплоносія у трьох точках системи (на виході з геліюпокрівлі, на вході в геліюпокрівлю та в баці-акумуляторі) термометрами. Швидкість повітряного потоку вимірювалась термоелектроанемометром TESTO 405 – V1. Інтенсивність потоку енергії, що випромінювало джерело, вимірювалась актинометром.

Швидкість повітряного потоку змінювалась від 2 до 6 м/с, що відповідає нормативним значенням середньої швидкості вітру в Україні.

Для максимального виявлення впливу факторів на функцію відгуку була складена матриця планування ПФЕ із врахуванням ефекту взаємодії факторів, табл. 3.11. Визначальними факторами були вибрані такі величини:

- x_1 – швидкість повітряного потоку V , м/с;
- x_2 – напрям повітряного потоку $\pm \psi$, рис. 3.18;
- x_3 – інтенсивність теплового потоку $I_{\text{в}}$, Вт/м².

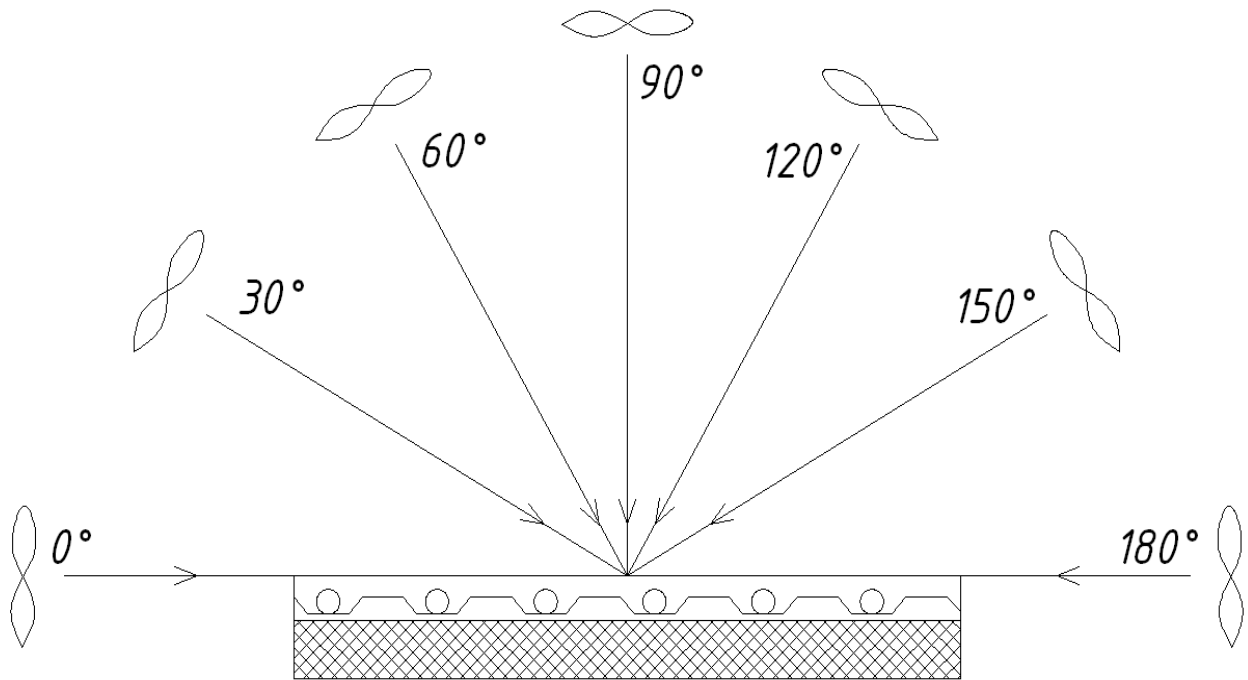


Рис. 3.18. Зміна напрямку повітряного потоку $\pm \psi, ^\circ$

Дані про рівні факторів та інтервали варіювання для дослідів подано у табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Рівні факторів та інтервали варіювання

Назва фактора	Кодоване позначення	Рівні факторів		Інтервал варіювання
		-1	+1	
Швидкість повітряного потоку V , м/с	x_1	2	6	4
Напрямок повітряного потоку ψ , $^\circ$	x_2	0	90	90
Інтенсивність теплового потоку I_B , Вт/м ²	x_3	300	900	600

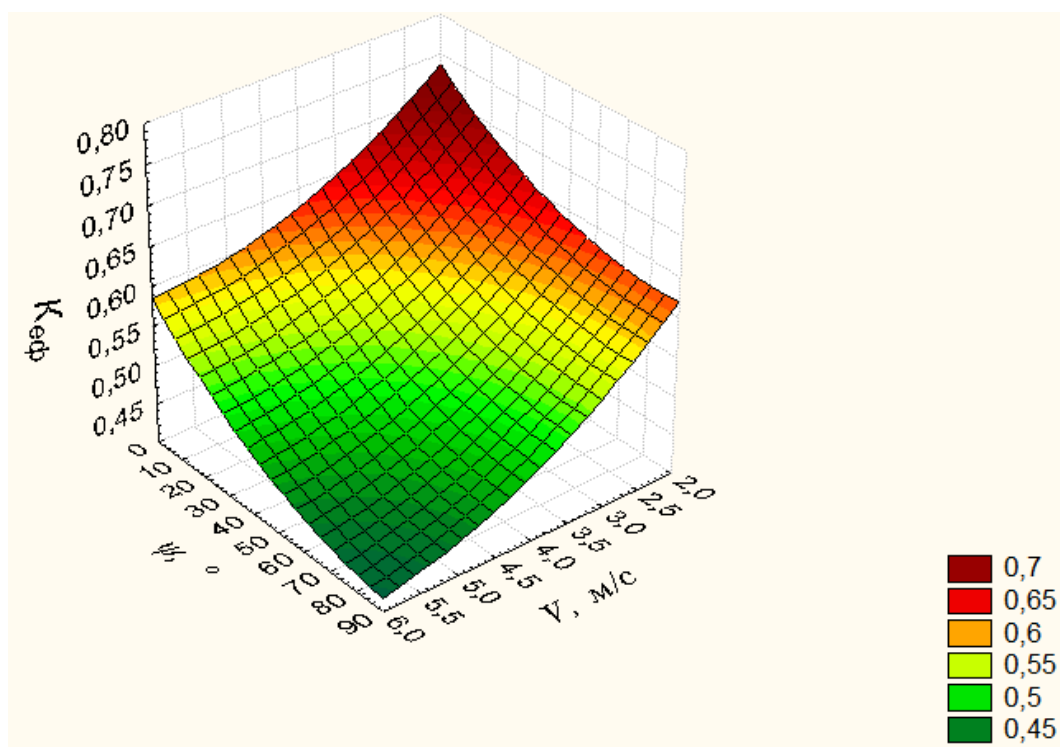
Параметром оптимізації було вибрано $K_{\text{еф}}$ – відношення кількості тепла, що отримала геліюпокрівля при різних швидкостях і напрямках повітряного потоку в умовах опромінення тепловим потоком певної інтенсивності до кількості тепла, що отримала геліюпокрівля при найменшому впливі вітру.

Таблиця 3.11

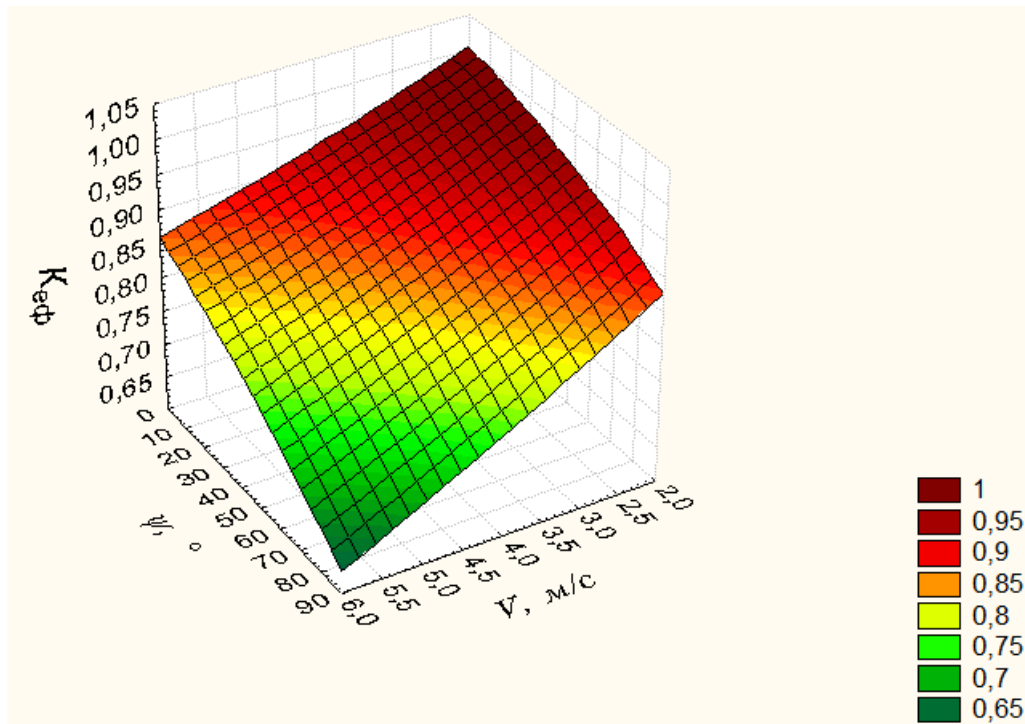
Матриця планування експерименту

№	x_0	V	ψ	I_B	$V\psi$	VI_B	ψI_B	$V\psi I_B$	$K_{эф}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,74
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,58
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,63
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,42
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,00
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,84
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,89
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,63

Результати експериментальних вимірювань подані у графічній формі (рис. 3.19) при інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м².



a)



б)

Рис. 3.19. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку за інтенсивності теплового потоку $I_b = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_b = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

З рисунків (рис. 3.19) видно, що при напрямі повітряного потоку, перпендикулярному до геліопокрівлі, та при збільшенні його швидкості, енергетична ефективність геліопокрівлі зменшується швидше, ніж при тій самій швидкості та напрямі повітряного потоку, паралельному до геліопокрівлі. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку знижується на 35% .

Зміна коефіцієнту корисної дії системи сонячного теплопостачання із геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія при впливі на неї вітру впродовж експерименту зображено на рис. 3.20.

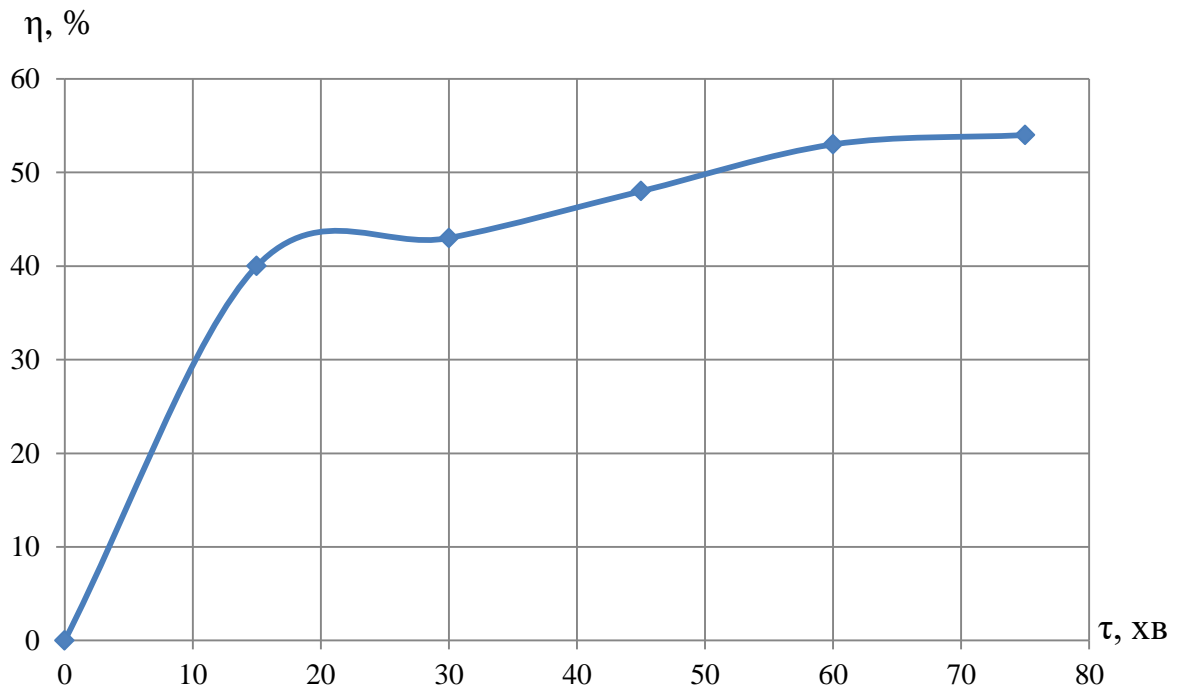


Рис. 3.20. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт/м}^2$, швидкості повітряного потоку $V = 4 \text{ м/с}$ та напрямку повітряного потоку $\psi = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.20 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при впливі на неї вітру змінюється від 40% до 54%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 48%.

Оскільки проводились дослідження по визначенню ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку, залежно від швидкості та напрямку повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.11).

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{ef}} = 0,716 - 0,099V - 0,074\psi + 0,124I_B - 0,019V\psi - 0,006VI_B - 0,006\psi I_B - 0,006V\psi I_B \quad (3.28)$$

Таблиця 3.11

**Визначення похибок при дослідженні впливу повітряного потоку на
геліопокрівлю з прозорим покриттям у гравітаційній системі
теплопостачання**

№	V	ψ	I _B	Серії дослідів						У _{ср} ,	s ²
				1-а серія		2-а серія		3-а серія		%	
				№ пров.дос.	y' ₁ , %	№ пров.дос.	y'' ₁ , %	№ пров.дос.	y''' ₁ , %		
1	2	0	300	4	0,726	15	0,74	24	0,75	0,74	0,000196
2	6	0	300	16	0,568	8	0,59	18	0,58	0,58	0,000133
3	2	90	300	12	0,61	22	0,63	5	0,65	0,63	0,000400
4	6	90	300	2	0,383	9	0,42	6	0,46	0,42	0,001369
5	2	0	900	21	1	23	1	19	1	1	0,000000
6	6	0	900	3	0,811	13	0,85	17	0,86	0,84	0,000721
7	2	90	900	7	0,861	1	0,91	20	0,9	0,89	0,000643
8	6	90	900	14	0,641	11	0,62	10	0,63	0,63	0,000121

$$F = \frac{0,001369}{0,000121} = 11,31 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001369}{0,003583} = 0,382 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,00717}{16} = 0,00045.$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за *t*-критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками для теплоносія розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00061}{16}} = \pm 0,013$$

Отже, факторами, які є не значимі, можна знехтувати і рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{еф}} = 0,716 - 0,099V - 0,074\psi + 0,124I_{\text{в}} - 0,019V\psi \quad (3.29)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що більший вплив на енергетичну ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у гравітаційній системі тепlopостачання має швидкість повітряного потоку, а його напрям – впливає менше.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від швидкості V і напрямку повітряного потоку ψ та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$ (рис. 3.21).

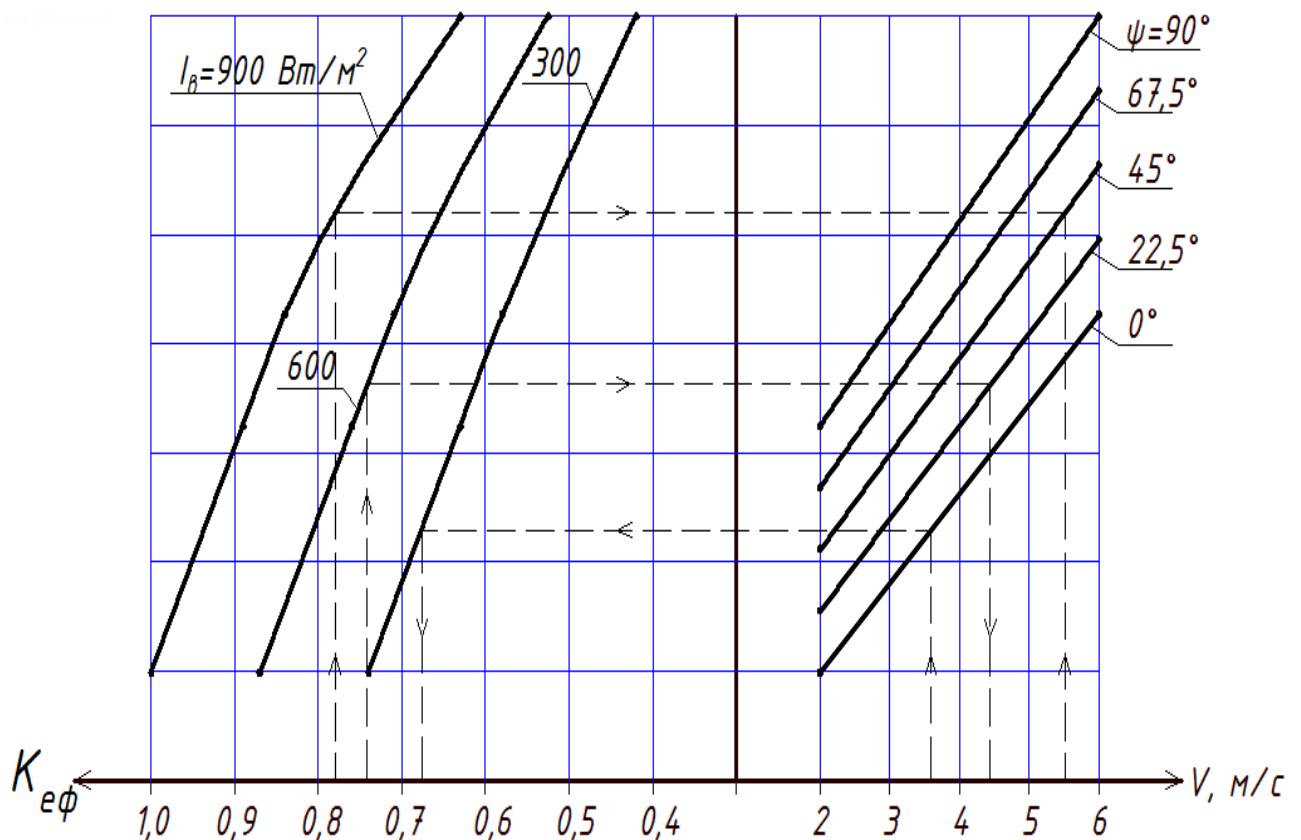
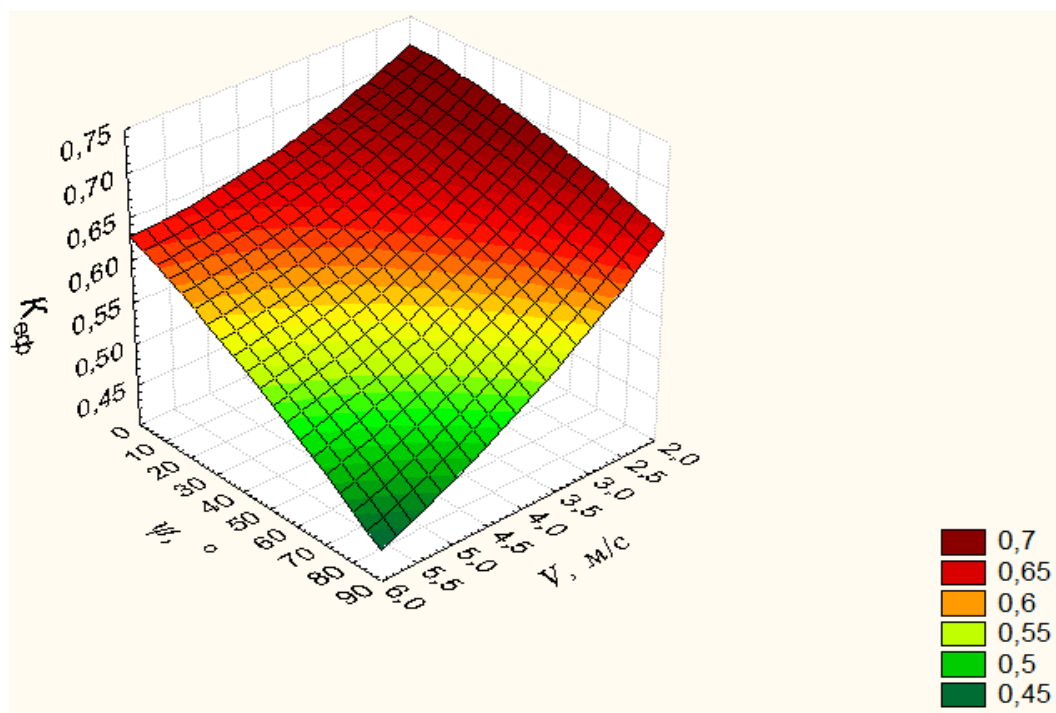
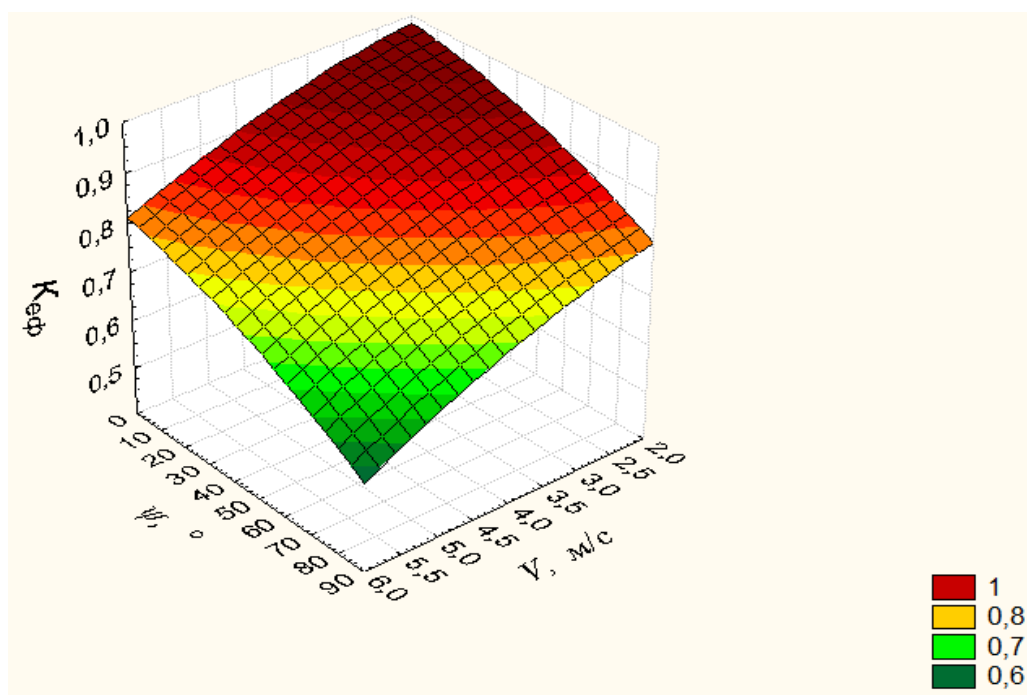


Рис. 3.21. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від швидкості V і напрямку повітряного потоку ψ та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$

Результати експериментальних вимірювань подані у графічній формі у тривимірному вигляді при інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м² (рис. 3.22).



а)



б)

Рис. 3.22. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку за інтенсивності теплового потоку $I_b = 300$ Вт/м² (а), $I_b = 900$ Вт/м² (б)

З графіків (рис. 3.22) видно, що при напрямі повітряного потоку, перпендикулярному до геліопокрівлі та при збільшенні його швидкості, енергетична ефективність геліопокрівлі зменшується швидше, ніж при тій самій швидкості та напрямі повітряного потоку, перпендикулярному до геліопокрівлі. Найбільше ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття зменшується при напрямку повітряного потоку перпендикулярному до геліопокрівлі. Ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі тепlopостачання при впливі на неї повітряного потоку знижується на 45%.

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ із геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія при впливі на неї вітру впродовж експерименту зображено на рис. 3.23.

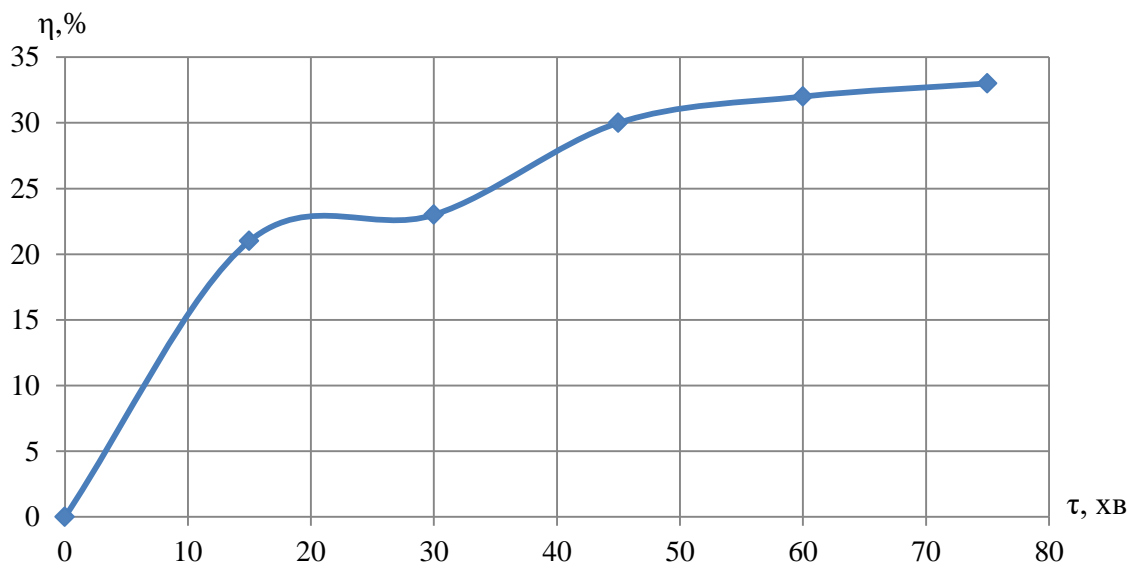


Рис. 3.23. Зміна ККД ССТ з геліопокрівлею без прозорого покриття з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_b = 600 \text{ Вт/м}^2$, швидкості повітряного потоку $V = 4 \text{ м/с}$ та напрямку повітряного потоку $\psi = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.23 ККД системи сонячного тепlopостачання з геліопокрівлею з прозорим покриттям з верхнім розташуванням трубок для теплоносія впродовж експерименту при впливі на неї вітру змінюється від 21% до 33%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить лише 28%.

Оскільки проводились дослідження по визначенню ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку залежно від швидкості та напрямку повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.13).

Таблиця 3.13

Визначення похибок при дослідженні впливу повітряного потоку на геліопокрівлю з прозорим покриттям у гравітаційній системі теплопостачання

№	V	ψ	I _B	Серії дослідів						У _{ср} , %	s ²
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			
				№ пров. дос.	y' ₁ , %	№ пров. дос.	y'' ₁ , %	№ пров. дос.	y''' ₁ , %		
1	2	0	300	4	0,69	15	0,72	24	0,755	0,72	0,001225
2	6	0	300	16	0,6	8	0,628	18	0,601	0,61	0,000243
3	2	90	300	12	0,65	22	0,67	5	0,69	0,67	0,000400
4	6	90	300	2	0,4	9	0,477	6	0,44	0,44	0,001369
5	2	0	900	21	1	23	1	19	1	1,00	0,000000
6	6	0	900	3	0,8	13	0,78	17	0,761	0,78	0,000361
7	2	90	900	7	0,81	1	0,85	20	0,83	0,83	0,000400
8	6	90	900	14	0,59	11	0,53	10	0,56	0,56	0,000900

$$F = \frac{0,001369}{0,000243} = 5,63 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001369}{0,004898} = 0,279 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,0098}{8} = 0,00061.$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано наступне рівняння регресії:

$$K_{\text{сф}} = 0,701 - 0,104V - 0,076\psi + 0,091I_B - 0,021V\psi - 0,019VI_B - 0,021\psi I_B + 0,009V\psi I_B \quad (3.31)$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям з трубками для теплоносія розташованими над теплопоглиначем у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00045}{16}} = \pm 0,011$$

Отже, факторами, які є не значимі, можна знехтувати і рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{еф}} = 0,701 - 0,104V - 0,076\psi + 0,091I_{\text{в}} - 0,021V\psi - 0,019VI_{\text{в}} - 0,021\psi I_{\text{в}} \quad (3.32)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок про те, що найбільший вплив на ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання має швидкість повітряного потоку, а напрямок повітряного потоку та інтенсивність теплового потоку впливають менше. Також можна стверджувати, що при чисельному збільшенні факторів, енергетична ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям буде зменшуватись.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття $K_{\text{еф}}$ від швидкості повітряного потоку V , напряму повітряного потоку α та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$ (рис. 3.24).

Номограма (рис. 3.24) апроксимується емпіричною залежністю (3.33) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі $K_{\text{еф}}$ від швидкості повітряного потоку V , напряму повітряного потоку ψ та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$:

$$K_{\text{еф}} = \left((6075 + 6 \cdot I_{\text{в}}) + (10 - 0,028 \cdot I_{\text{в}}) \cdot \psi + (-13840 - 0,458 \cdot I_{\text{в}}) \cdot V + (-4 + 3,333 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{в}}) \cdot \psi \cdot V \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.33)$$

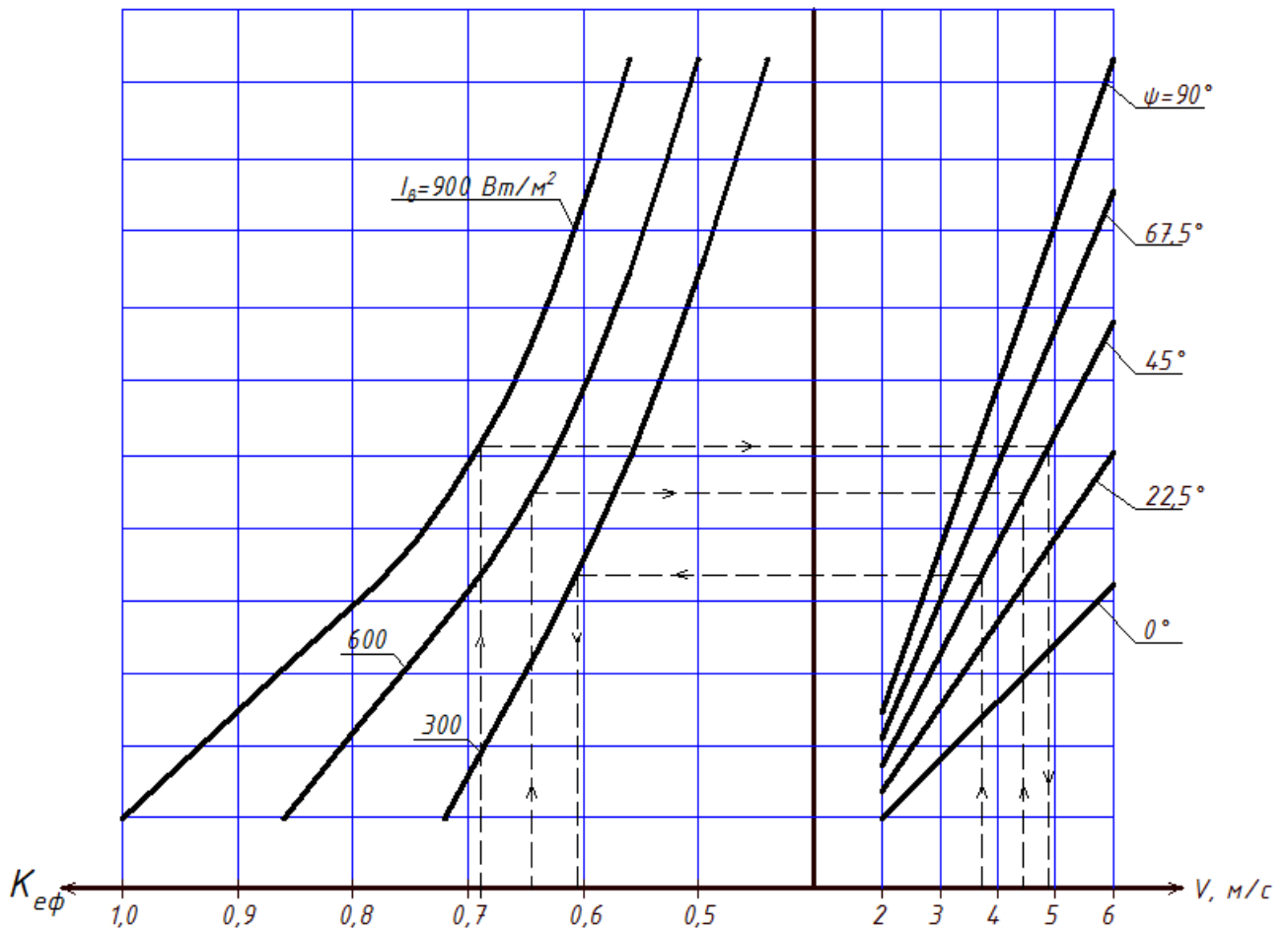


Рис. 3.24. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття $K_{\text{еф}}$ у гравітаційній системі тепlopостачання від швидкості V , напрямку ψ повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку I_B

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності більша довірчого інтервалу, отже рівняння (3.33) не змінюється.

3.2. Ефективність геліопокрівлі у протічній системі сонячного тепlopостачання

Дослідження ефективності геліопокрівлі при зміні кутів падіння теплового потоку. Доцільним є дослідження ефективності геліопокрівлі у протічній системі сонячного тепlopостачання. Експериментальна установка складалася із геліопокрівлі з верхнім розташуванням трубок для теплоносія, ємності з водою, бака-акумулятора, джерела випромінювання та вимірювальних приладів. Схема експериментальної установки зображена на рис. 3.25.

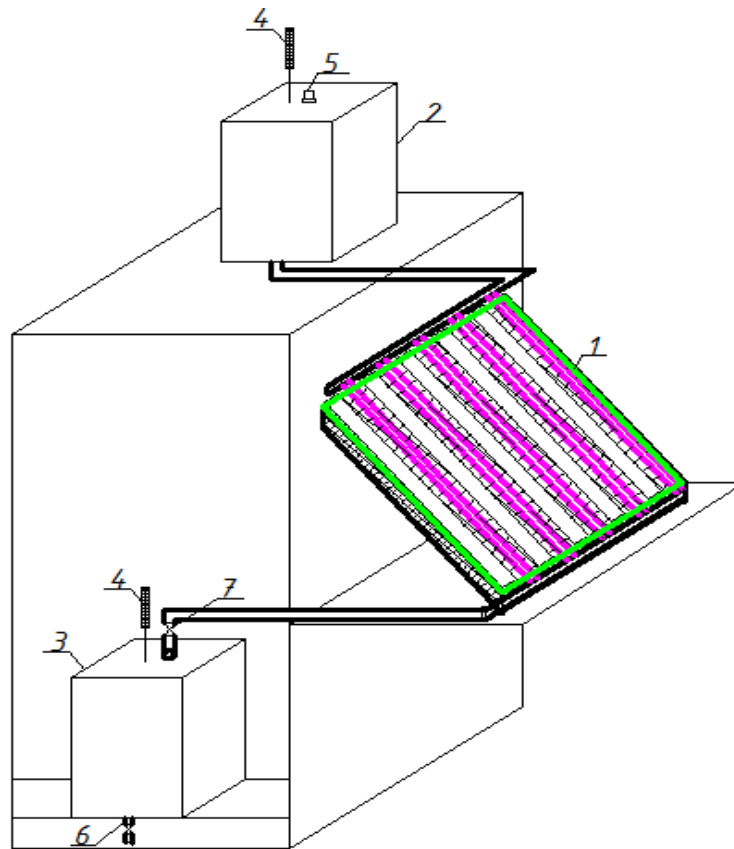


Рис. 3.25. Схема експериментальної установки:
 1 – геліопокрівля; 2 – ємність з холодною водою; 3 – бак-акумулятор; 4 – термометри; 5 – патрубок подачі холодної води; 6 – патрубок відбору теплоносія; 7 – запірний вентиль.

Експериментальна установка працює наступним чином. Холодна вода через патрубок подачі холодної води 5 поступає у ємність з холодною водою 2. При відкритті запірного вентиля 7, з певною витратою вода проходить через геліопокрівлю 1, в якій нагрівається, та поступає у бак-акумулятор 3. Відбір нагрітого теплоносія здійснюється через патрубок 6. Заміри температури води в нижньому та верхньому баках-акумуляторах здійснювались термометрами 4.

Планування експерименту та методика його проведення. У табл. 3.1 подано дані про рівні факторів та інтервали варіювання.

Було складено матрицю планування ПФЕ із врахуванням взаємодії факторів, табл. 3.14. Параметром оптимізації вибрано коефіцієнт ефективності геліопокрівлі $K_{\text{еф}}$, за яким можна оцінити вплив зміни кутів падіння променів на ефективність геліопокрівлі у протічній системі сонячного теплопостачання.

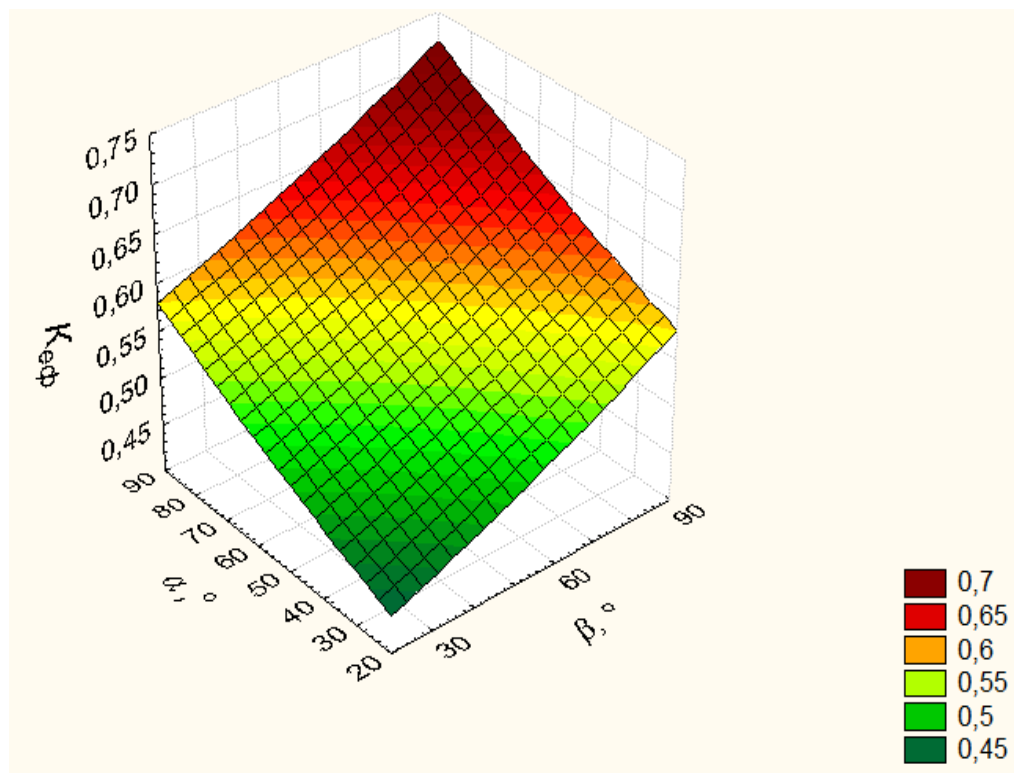
Витрата теплоносія становила $1\text{л}/(\text{хв}\cdot\text{м}^2)$, що відповідає оптимальному значенню для плоских сонячних колекторів, по аналогії з відомими системами сонячного теплопостачання [6].

Таблиця 3.14

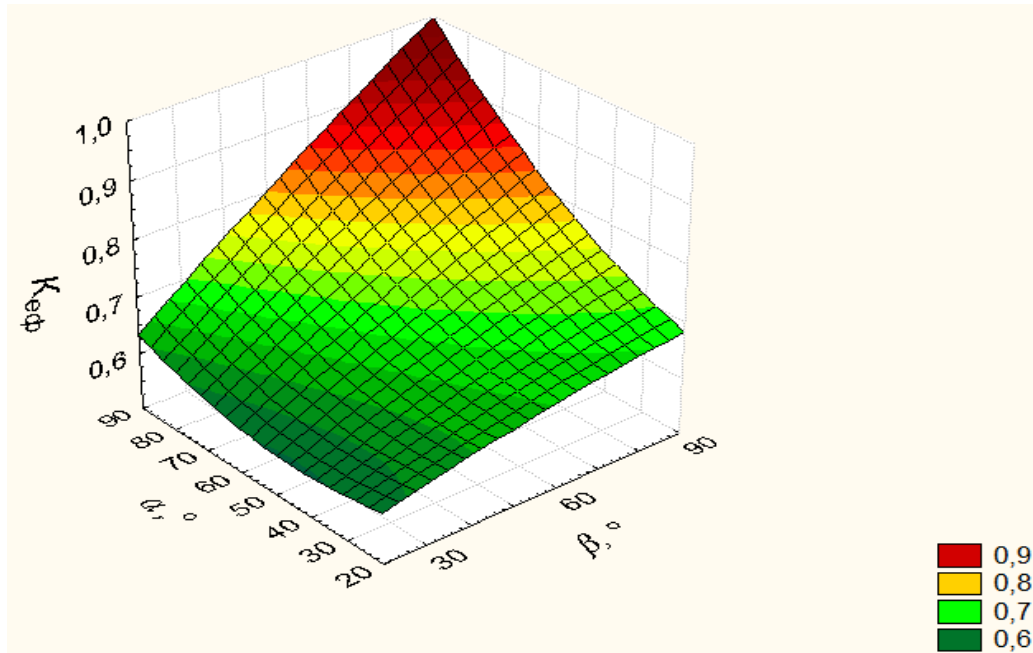
Матриця планування експерименту

№	x_0	α	β	I_B	$\alpha \beta$	αI_B	βI_B	$\alpha \beta I_B$	$K_{\text{эф}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,47
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,60
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,53
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,73
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,60
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,77
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,67
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,00

Результати експериментальних вимірювань. Результати експериментальних вимірювань подані у графічній формі (рис. 3.26) при інтенсивності теплового потоку $300; 900 \text{ Вт}/\text{м}^2$.



а)



б)

Рис. 3.26. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання за інтенсивності теплового потоку $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_B = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

З графіків (рис. 3.26) видно, що ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі сонячного теплопостачання при зміні кутів падіння теплового потоку α і β від 90° на 30° зменшується на 40%.

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ із геліопокрівлею з прозорим покриттям у протічній систем теплопостачання впродовж експерименту зображено на рис. 3.27.

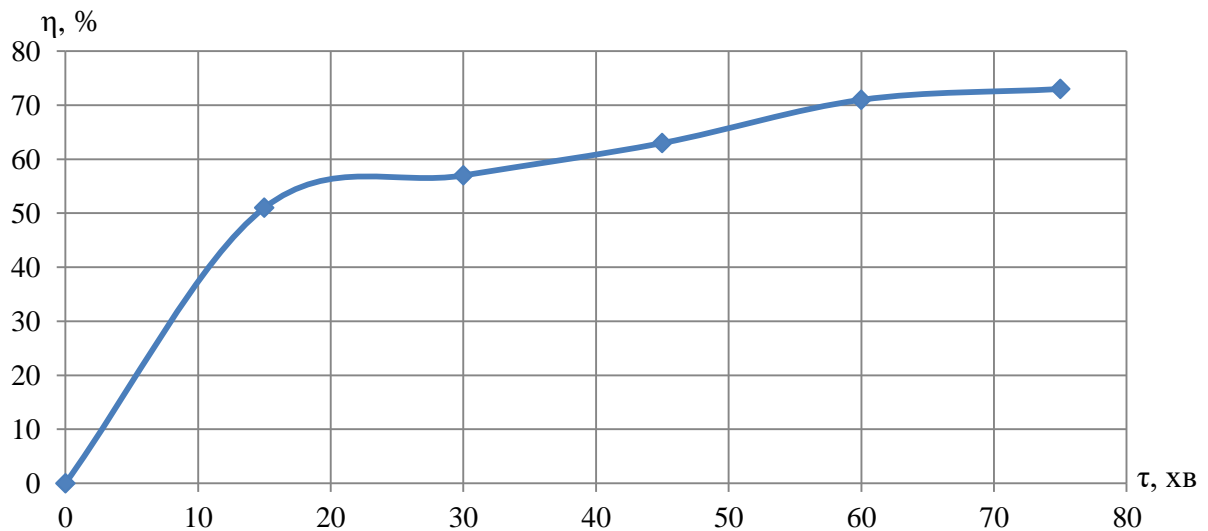


Рис. 3.27. Зміна ККД протічної ССТ з геліопокрівлею з прозорим покриттям впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт/м}^2$ та кутах падіння теплового потоку $\alpha = 90^\circ$ та $\beta = 90^\circ$

Як видно з графіку на рис. 3.27 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання змінюється від 51% до 73%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 63%.

Опрацювання результатів дослідження. Оскільки проводились дослідження по визначенню ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання залежно від кутів падіння теплового потоку та його інтенсивності, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.15).

Таблиця 3.15

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання

№	α	β	I_B	Серії дослідів						U_{cp}	s^2
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			
				№ пров.дос.	$y'_{i,}$ %	№ пров.дос.	$y''_{i,}$ %	№ пров.дос.	$y'''_{i,}$ %		
1	30	30	300	4	0,499	15	0,441	24	0,47	0,47	0,000841
2	90	30	300	16	0,57	8	0,63	18	0,6	0,6	0,000900
3	30	90	300	12	0,512	22	0,529	5	0,549	0,53	0,000343
4	90	90	300	2	0,691	9	0,73	6	0,769	0,73	0,001521
5	30	30	900	21	0,586	23	0,614	19	0,6	0,6	0,000196
6	90	30	900	3	0,735	13	0,798	17	0,777	0,77	0,001029
7	30	90	900	7	0,7	1	0,67	20	0,64	0,67	0,000900
8	90	90	900	14	1	11	1	10	1	1	0,000000

$$F = \frac{0,001521}{0,000196} = 7,76 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001521}{0,005730} = 0,265 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,01146}{16} = 0,00072$$

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{эф}} = 0,67 + 0,1\alpha + 0,06\beta + 0,09I_{\text{в}} + 0,03\alpha\beta + 0,02\alpha I_{\text{в}} + 0,01\beta I_{\text{в}} + 0,01\alpha\beta I_{\text{в}} \quad (3.34)$$

Коефіцієнти регресії показують наскільки сильно впливає фактор на функцію відгуку та як зміна фактора вплине на зміну параметра оптимізації.

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Для рівняння регресії ефективності геліопорківлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00072}{16}} = \pm 0,014$$

Отже, факторами, які є не значимі можна знехтувати і рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{эф}} = 0,67 + 0,1\alpha + 0,06\beta + 0,09I_{\text{в}} + 0,03\alpha\beta + 0,02\alpha I_{\text{в}} \quad (3.35)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що більший вплив на ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання має кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напряму теплового потоку у горизонтальній площині геліопокрівлі α , а кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напряму теплового потоку у вертикальній площині геліопокрівлі β та інтенсивність теплового потоку $I_{\text{в}}$ впливає в меншій мірі.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{эф}}$ у протічній системі теплопостачання від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку $I_{\text{в}}$ (рис. 3.28).

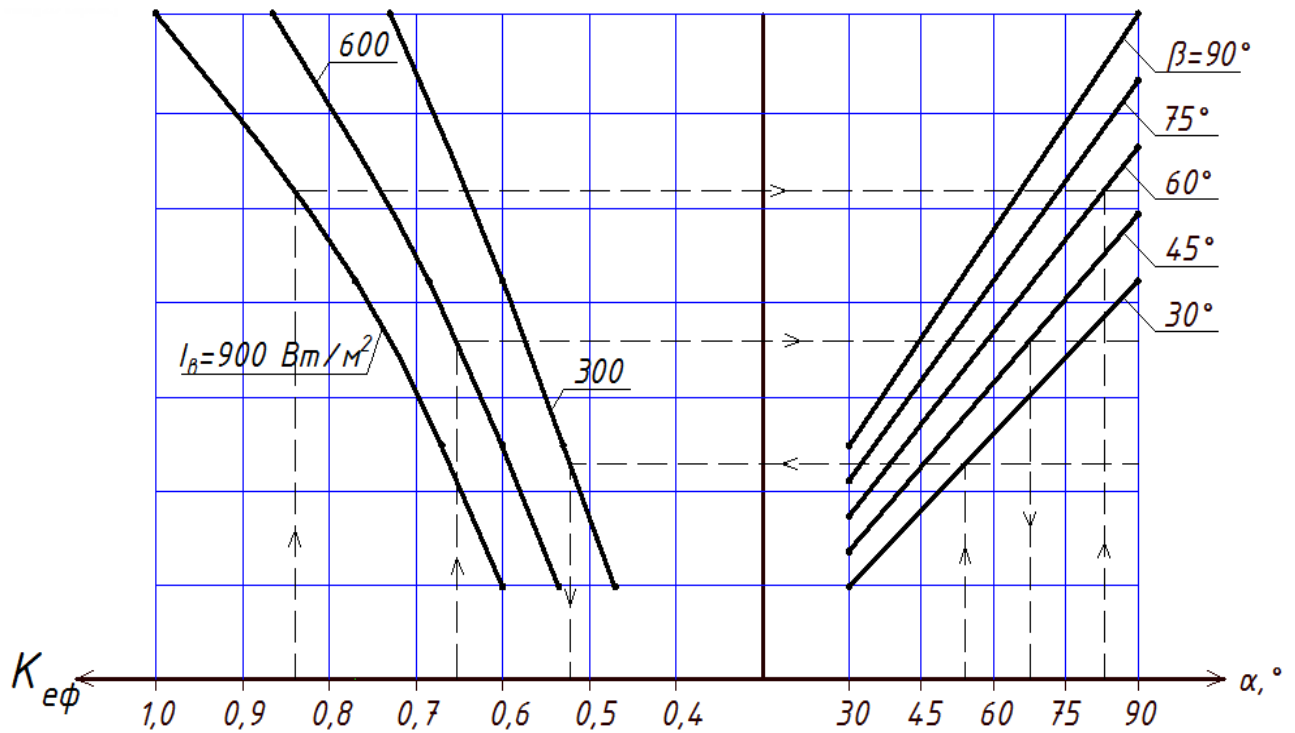


Рис. 3.28. Номограма залежності ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у протічній системі теплопостачання від кутів падіння теплового потоку α і β та інтенсивності теплового потоку I_B

Номограма (рис. 3.28) апроксимується емпіричною залежністю (3.36) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі $K_{\text{еф}}$ від від кутів падіння теплового потоку α , β та інтенсивності теплового потоку I_B :

$$K_{\text{еф}} = \left(\begin{aligned} &((3288 + 2 \cdot I_B) + (5 - 0,003 \cdot I_B) \cdot \beta + (18 - 0,003 \cdot I_B) \cdot \alpha + \\ &+ (0,049 + 0,0004 \cdot I_B) \cdot \beta \cdot \alpha \end{aligned} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.36)$$

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності більша довірчого інтервалу, отже рівняння (3.36) не змінюється.

Дослідження впливу вітру на геліопокрівлю. Експериментальні дослідження проводились на експериментальній установці, зображеній на рис. 3.21.

Для максимального виявлення впливу факторів на функцію відгуку була складена матриця планування ПФЕ із врахуванням ефекту взаємодії факторів, табл. 3.15.

У табл. 3.10 подано дані про рівні факторів та інтервали варіювання.

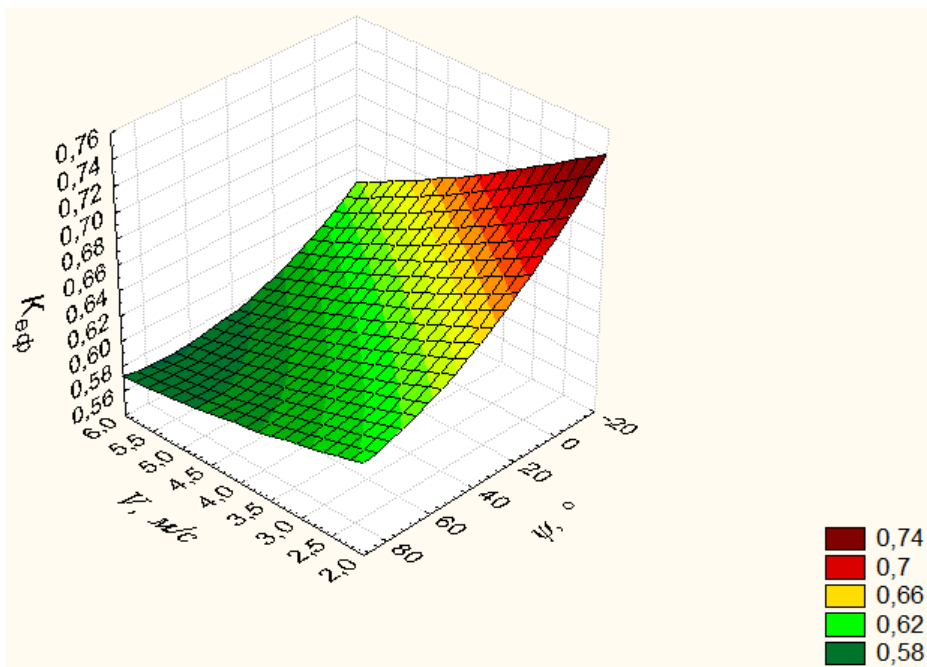
Параметром оптимізації було вибрано $K_{\text{эф}}$, який визначається як відношення кількості тепла, що отримала геліопокрівля при різних швидкостях і напрямку повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку до кількості тепла, що отримала геліопокрівля при найменшому впливі вітру.

Таблиця 3.15

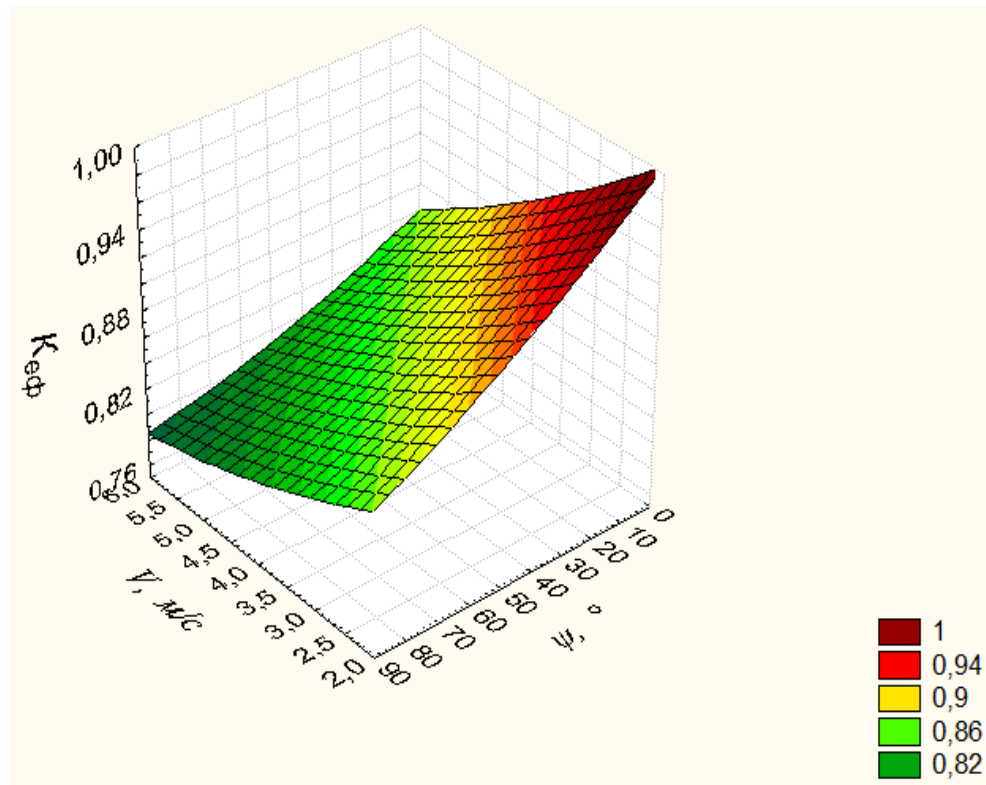
Матриця планування експерименту

№	x_0	V	ψ	I_B	$V\psi$	$V I_B$	ψI_B	$V\psi I_B$	$K_{\text{эф}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,71
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,61
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,69
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,57
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,00
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,86
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,93
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,79

Результати експериментів подані у графічній формі у тривимірному вигляді при інтенсивності теплового потоку 300; 900 Вт/м² (рис. 3.29).



а)



б)

Рис. 3.29. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання при впливі на неї повітряного потоку за інтенсивності теплового потоку $I_b = 300 \text{ Вт/м}^2$ (а), $I_b = 900 \text{ Вт/м}^2$ (б)

З графіку (рис. 3.29) видно, що ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання при зміні швидкості повітряного потоку від 2 до 6 м/с та напрямку повітряного потоку від 0° до 90° знижується на 21%, що свідчить про важливість захисту геліопокрівлі від вітру.

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ із геліопокрівлею з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання при впливі на неї вітру впродовж експерименту зображено на рис. 3.30.

Як видно з графіку на рис. 3.30 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання впродовж експерименту при впливі на неї вітру змінюється від 38% до 54%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 47%.

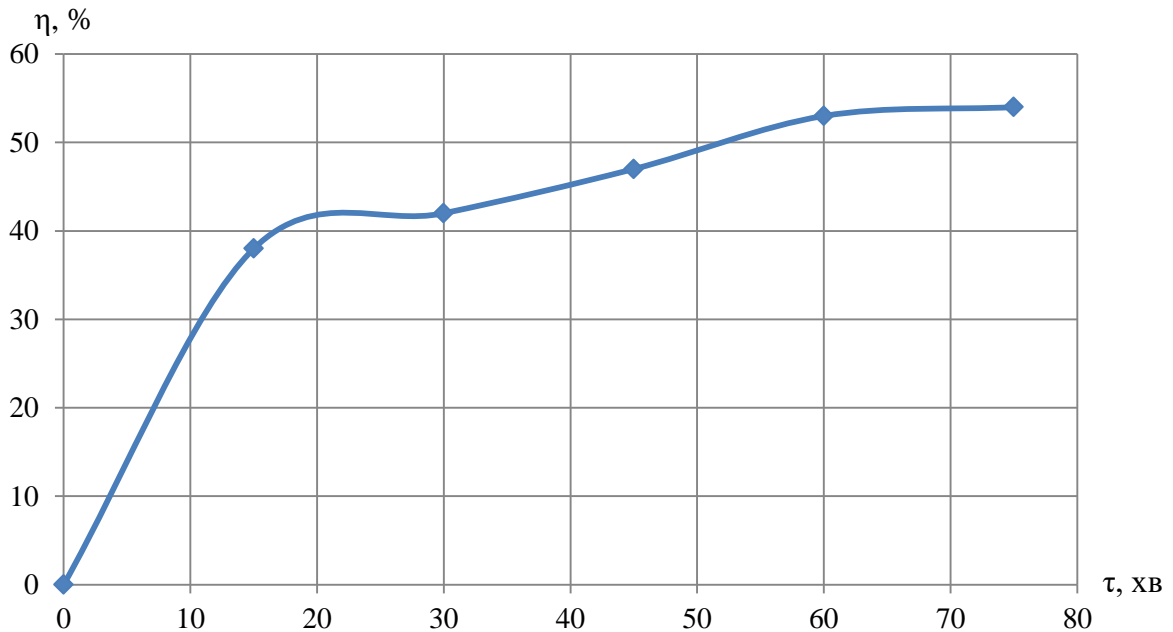


Рис. 3.30. Зміна ККД ССТ з геліюпокрівлею з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання впродовж експерименту при інтенсивності теплового потоку $I_B = 600 \text{ Вт/м}^2$, швидкості повітряного потоку $V = 4 \text{ м/с}$ та напрямку повітряного потоку $\psi = 90^\circ$

Оскільки проводились дослідження по визначенню ефективності геліюпокрівлі з прозорим покриттям у протічній системі теплопостачання залежно від швидкості та напрямку повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку, то необхідно провести статистичну обробку даних за відповідними критеріями Стьюдента, Фішера та Кохрена за границі довірчого інтервалу 0,95. (табл. 3.16).

У результаті опрацювання експериментальних даних було отримано рівняння регресії:

$$K_{\text{эф}} = 0,77 - 0,063V - 0,025\psi + 0,125I_B - 0,0031V\psi - 0,008VI_B - 0,018\psi I_B + 0,003V\psi I_B \quad (3.37)$$

Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться перевірка їх значимості. Перевірка значимості кожного коефіцієнта проводилась незалежно. Її можна здійснювати побудовою довірчого інтервалу та за t -критерієм Стьюдента. У проведенні повного факторного експерименту із ефектом взаємодії факторів, довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Таблиця 3.16

Визначення похибок при дослідженні геліопокрівлі з прозорим покриттям при впливі на неї повітряного потоку у протічній системі сонячного теплопостачання

№	V	ψ	I _в	Серії дослідів						Уср, %	s ²
				1-а серія		2-а серія		3-а серія			
				№ пров.дос.	y' ₁ , %	№ пров.дос.	y'' ₁ , %	№ пров.дос.	y''' ₁ , %		
1	30	30	300	27	0,705	32	0,685	56	0,749	0,71	0,001086
2	90	30	300	16	0,598	40	0,615	64	0,621	0,61	0,000145
3	30	90	300	3	0,611	28	0,635	63	0,583	0,61	0,000678
4	90	90	300	7	0,51	29	0,49	74	0,53	0,51	0,000400
5	30	30	900	11	1	35	1	79	1	1	0,000000
6	90	30	900	18	0,825	48	0,894	78	0,861	0,86	0,001191
7	30	90	900	17	0,86	39	0,83	55	0,89	0,86	0,000900
8	90	90	900	10	0,779	54	0,825	81	0,765	0,79	0,000985

$$F = \frac{0,001191}{0,000145} = 8,21 < F_{\text{табл}} = 19,2;$$

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{0,001191}{0,005385} = 0,221 < G_{\text{табл}} = 0,515;$$

$$s^2(y) = \frac{0,011}{16} = 0,00067.$$

Для рівняння регресії ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі теплопостачання:

$$\Delta b = \pm 2,12 \sqrt{\frac{0,00067}{16}} = \pm 0,014$$

Отже, факторами, які є не значимі, можна знехтувати і рівняння регресії набуде вигляду:

$$K_{\text{еф}} = 0,77 - 0,063V - 0,025\psi + 0,125I_{\text{в}} - 0,018\psi I_{\text{в}} \quad (3.38)$$

Проаналізувавши коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що більший вплив на ефективність геліопокрівлі має інтенсивність теплового потоку $I_{\text{в}}$ та швидкість повітряного потоку V , а напрям повітряного потоку

впливає ψ менше. При цьому, при збільшенні швидкості та напрямку повітряного потоку, кількість тепла, що отримала геліопокрівля, зменшується.

За результатами експериментальних досліджень побудовано номограму залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у протічній системі тепlopостачання від швидкості повітряного потоку V , напрямку повітряного потоку ψ та інтенсивності теплового потоку I_B (рис. 3.31).

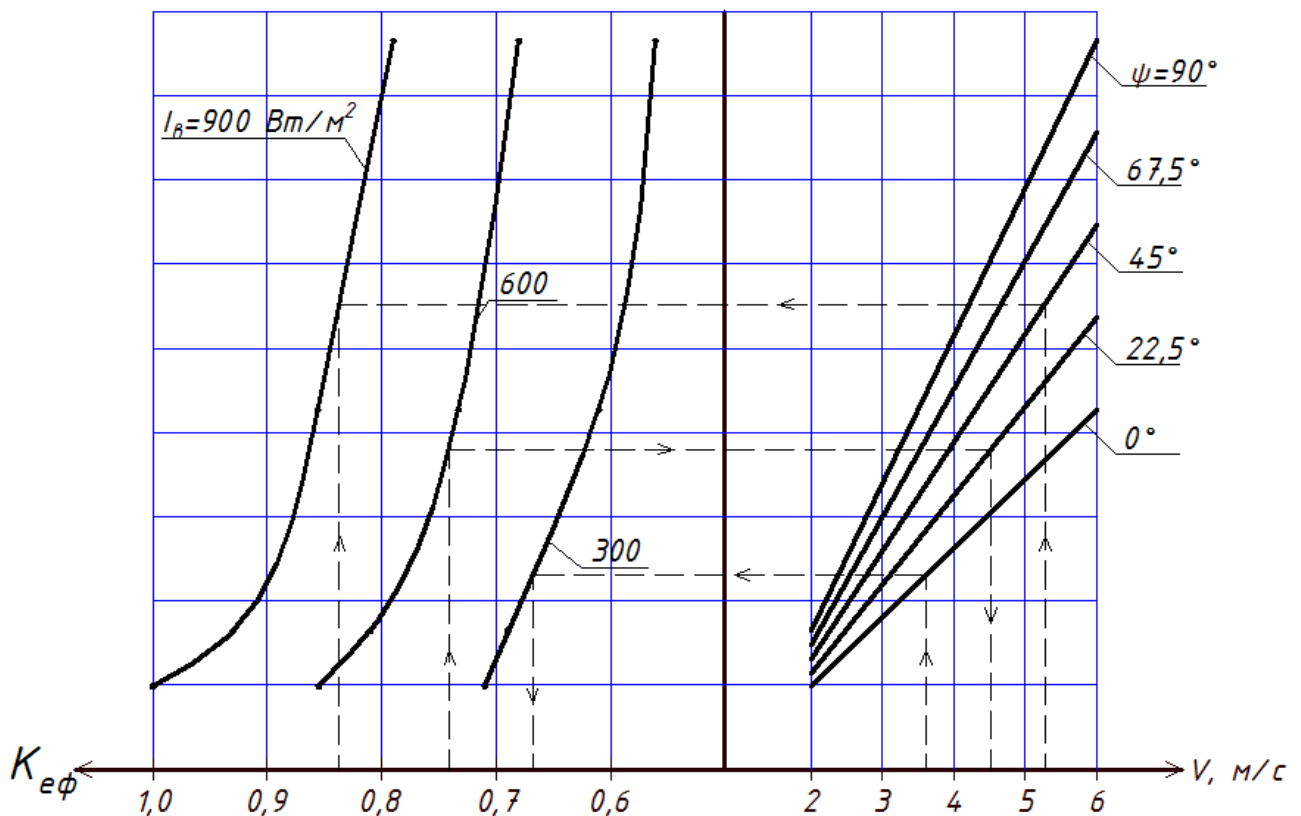


Рис. 3.31. Номограма залежності коефіцієнта ефективності геліопокрівлі без прозорого покриття $K_{\text{еф}}$ у протічній системі тепlopостачання при впливі на неї повітряного потоку від швидкості V , напрямку ψ повітряного потоку та інтенсивності теплового потоку I_B

Номограма (рис. 3.31) апроксимується емпіричною залежністю (3.39) коефіцієнта ефективності геліопокрівлі з прозорим покриттям $K_{\text{еф}}$ у протічній системі тепlopостачання від швидкості повітряного потоку V , напрямку повітряного потоку ψ , інтенсивності теплового потоку I_B :

$$K_{\text{еф}} = \left(\begin{aligned} &((605 + 5 \cdot I_B) - 0,0033 \cdot I_B \cdot \psi + (-200 - 0,167 \cdot I_B) \cdot V + \\ &+ (-0,832 + 9,204 \cdot 10^{-4} \cdot I_B) \cdot \psi \cdot V \end{aligned} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.39)$$

Абсолютна величина коефіцієнтів емпіричної залежності більша довірчого інтервалу, отже рівняння (3.39) не змінюється.

3.3. Натурні дослідження ефективності геліопокрівлі

Для підтвердження результатів лабораторних досліджень важливим є виконання натурних досліджень [87], які проводились на експериментальній установці зображеній на рисунку 3.8 (а), в Національному університеті «Львівська політехніка». Фото експериментальної установки зображено на рисунку 3.32.

Натурні дослідження проводились 27 липня 2015 року. Кут нахилу геліопокрівлі до горизонту становив 45° . Температура навколишнього середовища в тіні становила 23°C . Середня швидкість вітру впродовж дня – 1 м/с. Небо було безхмарним.



Рис. 3.32. Фото експериментальної установки для натурних досліджень

Перед проведенням досліджень система заповнювалась свіжою порцією води, видалялось повітря із системи. Впродовж дня проводились наступні заміри: температура води на вході в геліопокрівлю, температура води на виході з геліопокрівлі, температура води в баку-акумуляторі (в трьох точках по висоті баку), інтенсивності потоку повної та розсіяної сонячної радіації.

Інтенсивність потоку повної сонячної радіації впродовж дня зображено на рисунку 3.33.

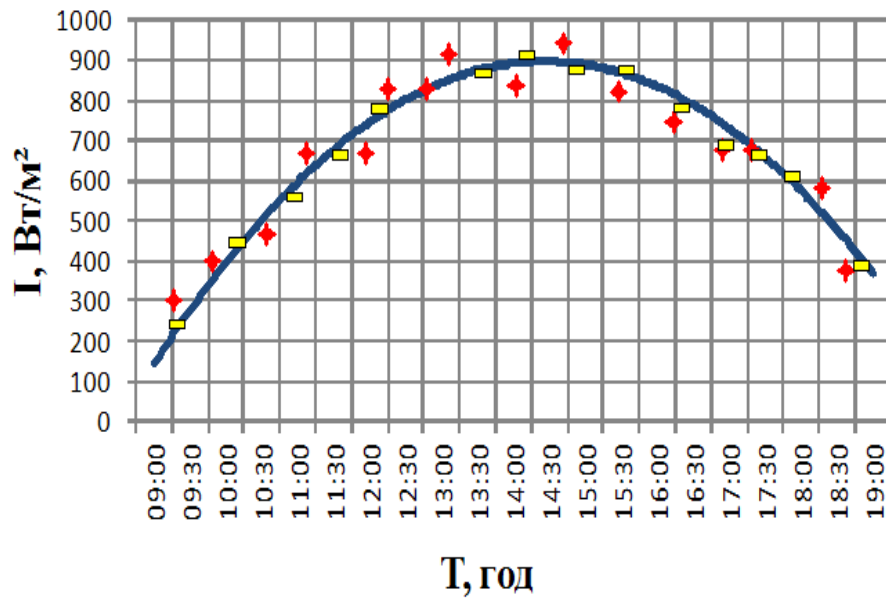


Рис. 3.33. Інтенсивність потоку сонячної енергії на площину геліопокрівлі впродовж експерименту (27 липня 2015 р.)

Результати експериментальних досліджень зображено у графічній формі та наведені на рис. 3.34.

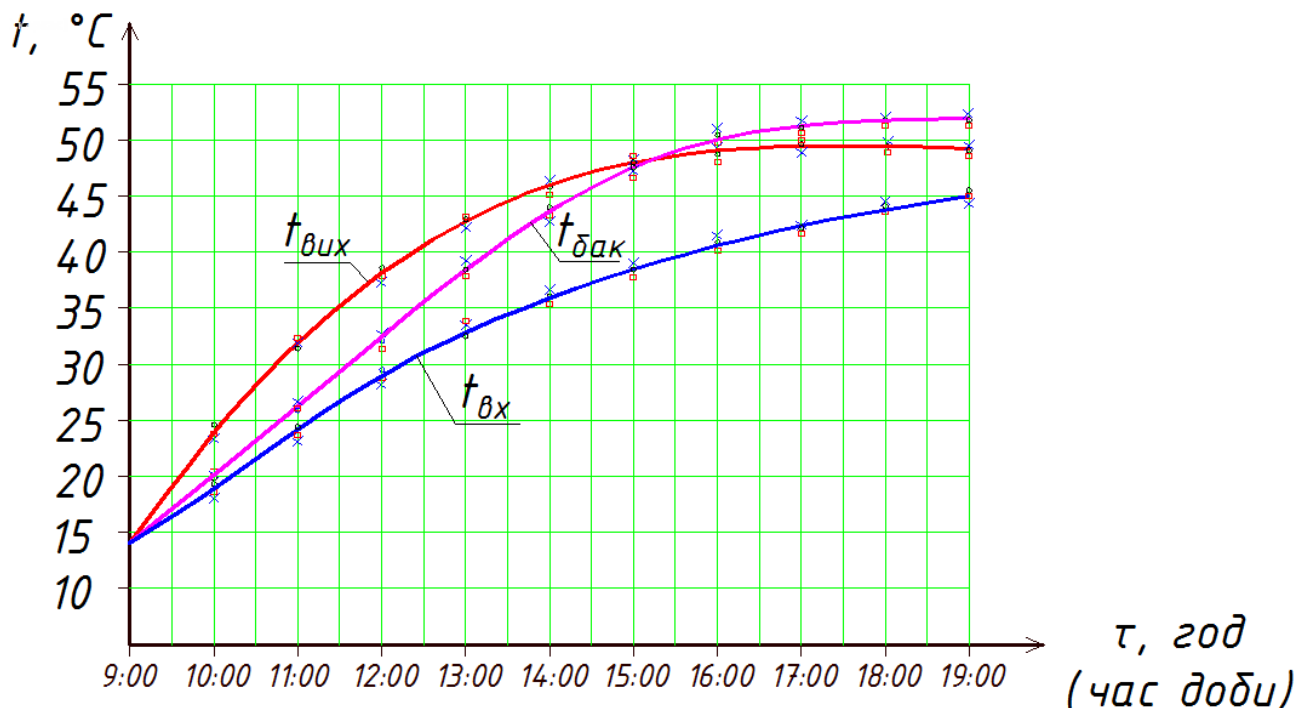


Рис. 3.34. Температура теплоносія, °C, на вході у геліопокрівлю $t_{вх}$, на виході з геліопокрівлі $t_{вих}$ та в баку-акумуляторі $t_{бак}$ залежно від часу τ

Як видно з графіку (рис. 3.34), наприкінці дня температура води в баку-акумуляторі досягнула 52 °C, що забезпечує досягнення термоаккумуляційної здатності розробленої ССТ на рівні 9950 кДж/м².

Для перевірки достовірності результатів натурних досліджень – їх було порівняно з результатами, отриманими математичним моделюванням. Згідно математичного моделювання (рис. 2.2) при швидкості вітру 1 м/с температура теплоносія в баку-акумуляторі в 19:00 становить 54,5°C. Похибка між результатами математичного моделювання і експериментальними дослідженнями становить 4,6%, що є в межах допустимого значення.

На основі експериментальних результатів отримано аналітичну залежність температури нагріву теплоносія у баку-акумуляторі впродовж дня:

$$t_{\text{бак}} = -27,3 - 0,09 \cdot I_{\text{в}} + 0,003 \cdot \tau + 7,72 \cdot 10^{-2} \cdot I_{\text{в}}^2 - 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot I_{\text{в}} \cdot \tau - 3,025 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^2 \quad (3.40)$$

Зміна коефіцієнту корисної дії ССТ з геліопокрівлею впродовж дня зображено на рис. 3.35.

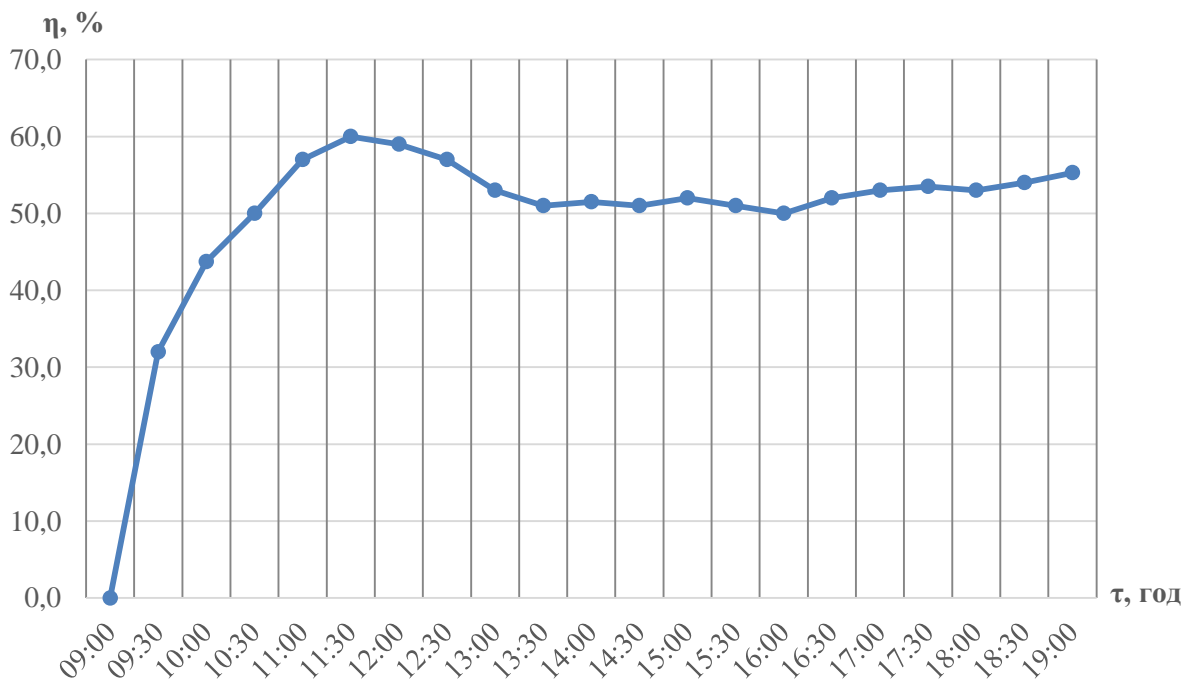


Рис. 3.35. Зміна ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею впродовж дня (27 липня 2017 р.)

Як видно з графіку на рис. 3.35 ККД системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею змінюється від 32% до 60%. При цьому середнє значення ККД геліосистеми становить 52%, що свідчить про ефективну роботу геліопокрівлі.

3.4. Висновки до розділу 3

1. Проведено лабораторні та натурні дослідження геліопокрівлі в гравітаційній та протічній системах теплопостачання залежно від кутів падіння та інтенсивності теплового потоку, швидкості та напрямку повітряного потоку. Отримано емпіричні та графічні залежності ефективності геліопокрівлі від дії цих факторів.

2. Встановлено, що ефективність геліопокрівлі, при зміні кутів падіння теплового потоку α та β від 90° до 30° та інтенсивності теплового потоку від 300 Вт до 900 Вт, зменшується на 40%, тоді як ефективність звичайного плоского сонячного колектора зменшується на 60%.

3. Ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям, при впливі на неї повітряного потоку, знижується на 35%, а ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття – на 45%. На ефективність геліопокрівлі, при впливі на неї повітряного потоку, найбільший вплив має швидкість повітряного потоку, а напрям повітряного потоку впливає менше.

4. При проведенні натурних досліджень температура теплоносія в баку-акумуляторі досягла 52°C , а середній ККД системи теплопостачання з геліопокрівлею становить 52%

Наукові результати розділу 3 висвітлено у публікаціях автора: [11, 84, 85, 88, 89, 90, 142, 143, 146].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕЛІОПОКРІВЛІ

Цей розділ присвячений розробці основних напрямків можливого застосування результатів досліджень, виконаних в дисертаційній роботі та визначенні економічної ефективності застосування геліопокрівлі у ССТ. Запропоновано схемні рішення ССТ із використанням геліопокрівлі. Розроблено методичку розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею. Представлено техніко-економічне обґрунтування використання різних систем сонячного теплопостачання із геліопокрівлею. Визначено термін окупності геліопокрівлі у системі сонячного теплопостачання.

4.1. Опис та принцип роботи геліопокрівлі в якості сонячного колектора

4.1.1. Геліопокрівля з трубками для теплоносія, розташованими під теплопоглиначем. Звичайний плоский сонячний колектор має високу вартість та складну конструкцію.

Тому було запропоновано сонячний колектор суміщений із покриттям будівлі (геліопокрівля), особливістю якого є те, що верхнє покриття колектора виконано з гофрованого покрівельного матеріалу будівлі [80]. Це дає змогу знизити вартість сонячного колектора, підвищити його міцність та спростити конструкцію. Схему геліопокрівлі зображено на рис. 4.1.

Геліопокрівля містить верхнє 1 та нижнє 2 гофровані покриття, між якими розташовані трубки контуру циркуляції 3, прикріплені до верхнього покриття 1 та з'єднані з вхідними 4 та вихідними 5 патрубками для подачі теплоносія. Верхнє гофроване покриття 1 виконане з покрівельного матеріалу, на внутрішню поверхню якого нанесено шар селективного матеріалу 6. На внутрішній поверхні нижнього гофрованого покриття 4 нанесено дзеркальний шар 7. Під нижнім гофрованим покриттям розташовано теплоізоляційний шар 8. На фіг. також зображено крокви 9.

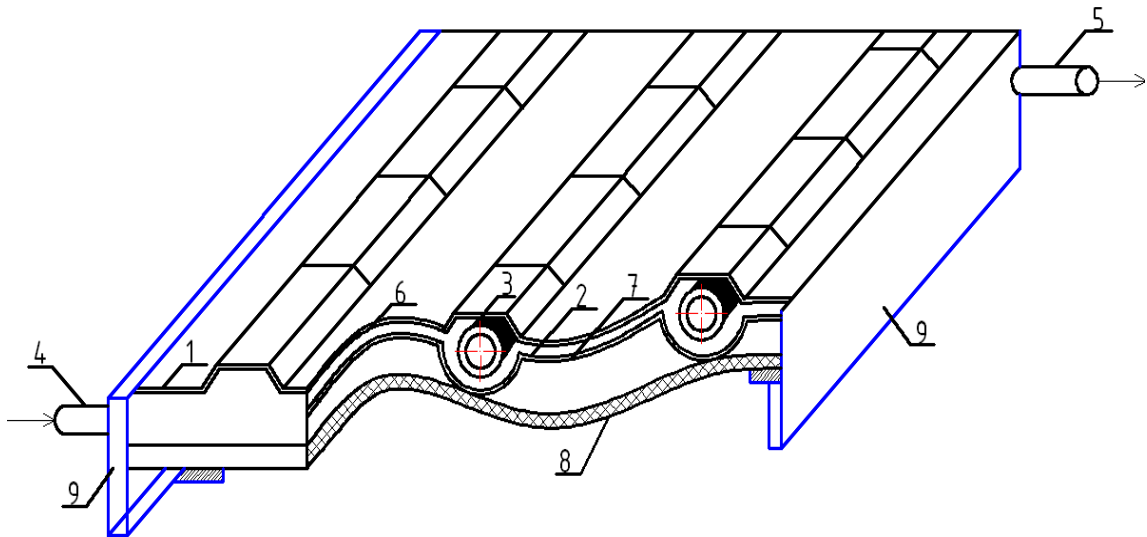


Рис. 4.1. Схема геліюпокрівлі (патент України на корисну модель № 84945)
 1 – верхнє гофроване покриття; 2 – нижнє гофроване покриття; 3 - трубки контуру циркуляції; 4 – вхідний патрубков; 5 – вихідний патрубков; 6 – шар селективного матеріалу; 7 – дзеркальний шар; 8 – теплоізоляційний шар; 9 – кроква

Геліюпокрівля працює наступним чином.

Верхнє 1 та нижнє 2 гофровані покриття кріпляться до крокв 9, наприклад, за допомогою кронштейнів. Сонячне проміння попадає на зовнішню поверхню верхнього гофрованого покриття 1, виконаного з покрівельного матеріалу, на внутрішній поверхні якого нанесено шар селективного матеріалу 6, який забезпечує максимальне поглинання сонячного тепла при мінімальному рівні відбиття сонячних променів назад у атмосферу. При цьому відбувається нагрівання покрівельного матеріалу, від якого тепло передається трубкам контуру циркуляції 3, в яких циркулює теплоносій. За рахунок різниці температур, та, відповідно, різниці густин теплоносія, в зоні вхідного 4 і вихідного 5 патрубків створюється циркуляція теплоносія. Нагрітий теплоносій через патрубков 5 подається до споживача. Частина сонячного випромінювання, в тому числі інфрачервоне випромінювання, яке не сприйнялось трубками контуру циркуляції 3, відбивається дзеркальним шаром 7 назад на поверхню, що дає змогу вловлювати сонячне випромінювання, яке, зазвичай, в інших типах колекторів втрачається. Таким чином, використовується практично вся

теплова енергія сонячного випромінювання. Теплоізоляційний шар 8 забезпечує зменшення тепловтрат.

4.1.2. Геліюпокрівлі з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем. Розташування трубок для теплоносія над поглиначем сонячної енергії та виконання теплопоглинача сонячної енергії гофрованим забезпечує підвищення ефективності геліосистеми за рахунок збільшення площі поглинання сонячної енергії.

Схема геліюпокрівлі з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем, зображено на рисунку 4.2.

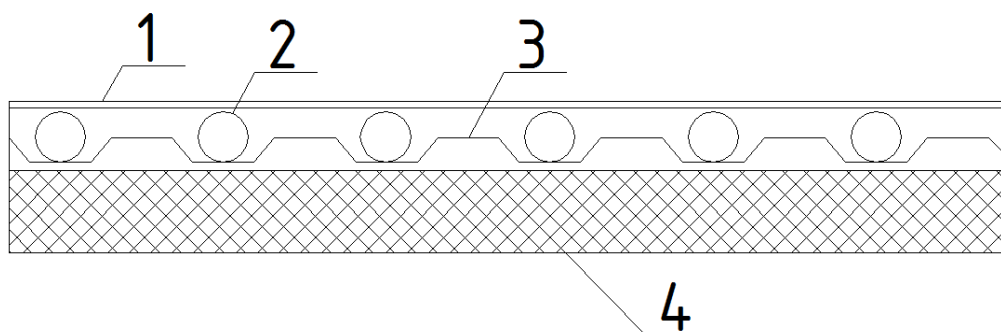


Рис. 4.2. Схема геліюпокрівлі з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем:

1 – прозоре покриття; 2 – трубки для теплоносія; 3 – гофрований теплопоглинач (покрівельний матеріал); 4 – теплоізоляційний шар

Геліюпокрівля з трубками для теплоносія, розташованими над теплопоглиначем, працює наступним чином.

Сонячне проміння через прозоре покриття 1 попадає на поглинач сонячної енергії 3 та трубки для теплоносія 3. При цьому відбувається їх нагрівання. За рахунок різниці температур, та відповідно різниці густин теплоносія, в зоні вхідного і вихідного патрубків створюється циркуляція теплоносія. Теплоізоляційний шар 4 забезпечує зменшення тепловтрат.

4.2. Застосування геліюпокрівлі у системах сонячного теплопостачання

Запатентована гравітаційна геліосистема із використанням геліюпокрівлі [82] (рис. 4.3).

Сонячне проміння через прозоре покриття 5 попадає на поглинач сонячної енергії 7 та трубки для теплоносія 8. При цьому відбувається їх нагрівання. За рахунок різниці температур, та, відповідно, різниці густин теплоносія в зоні вхідного і вихідного патрубків, створюється циркуляція теплоносія. Нагрітий теплоносій через подаючий трубопровід 2 подається у бак-акумулятор гарячої води 1. Нагріта вода через патрубок 10 подається споживачу. Охолоджений теплоносій по зворотньому трубопроводу 3 повертається у сонячний колектор 4, і нагрівається. Спуск води з бака-акумулятора відбувається через патрубок 9. Випуск повітря – через повітровипускник 11. Теплоізоляційний шар 6 забезпечує зменшення тепловтрат.

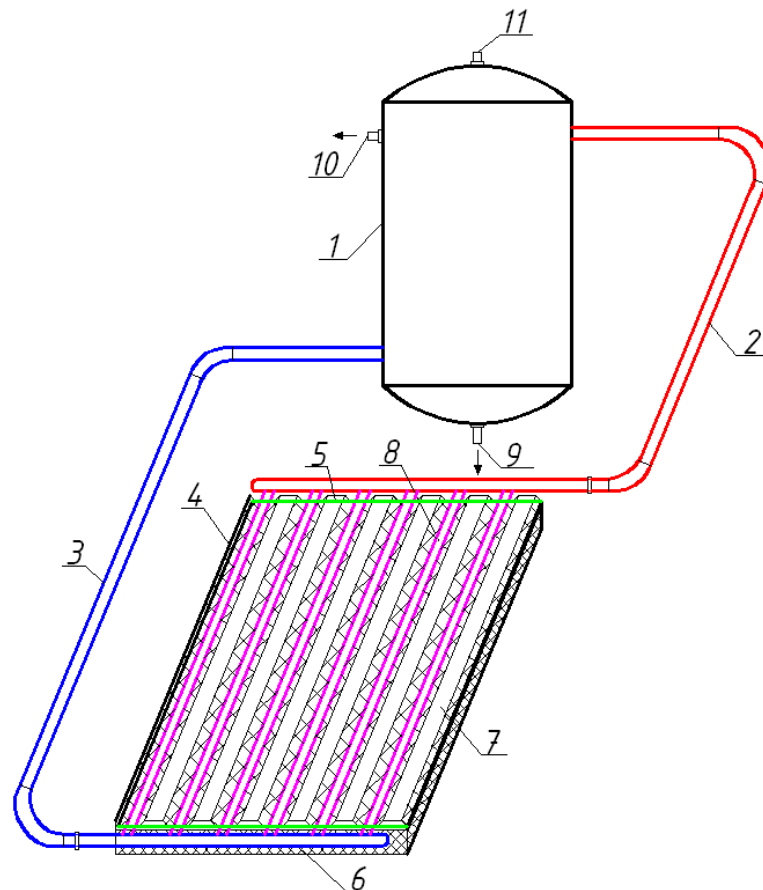


Рис. 4.3. Схема гравітаційної геліосистеми із використанням геліопокрівлі (Патент України на корисну модель № 92010):

- 1 – бак-акумулятор гарячої води; 2 – подаючий трубопровід; 3 – зворотній трубопровід; 4 – геліопокрівля; 5 – прозоре покриття; 6 – теплоізоляційний шар; 7 – гофрований поглинач сонячної енергії; 8 – трубки для теплоносія; 9 – патрубок для спуску води; 10 – патрубок для відбору води; 11 – повітровипускник.

Запропонована система для сонячного теплопостачання (рис. 4.4), яка складається з геліопокрівлі, бака-акумулятора та електричного водонагрівача для покриття пікових навантажень.

Сонячний колектор використовується на нагрівання води на систему гарячого водопостачання. В холодний період року, коли енергії Сонця не вистачає на нагрівання води, блок керування системою підключає електричний водонагрівач, який догріває воду до заданої температури.

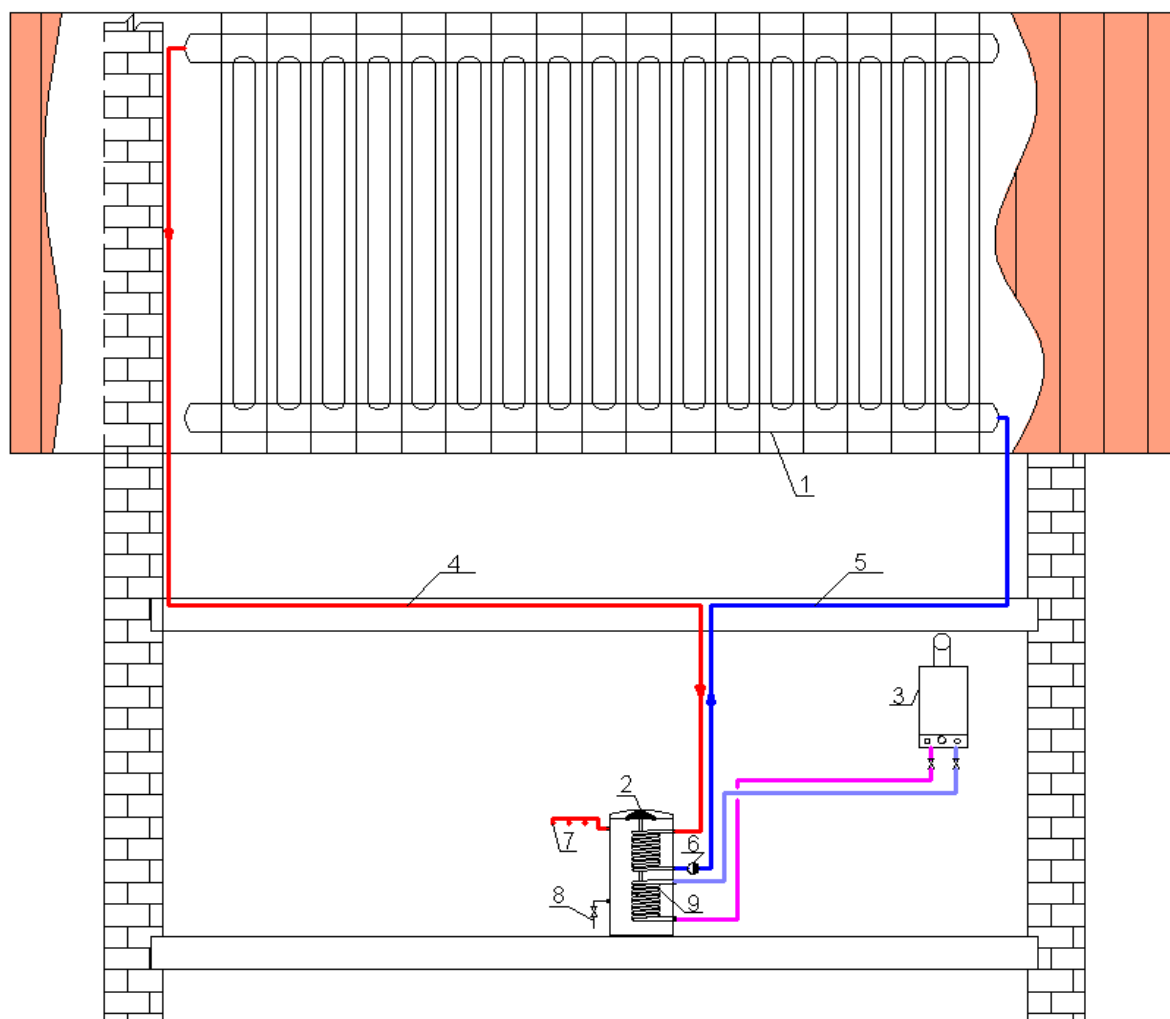


Рис. 4.4. Система гарячого водопостачання (СГВ) з використанням геліопокрівлі:

- 1 – геліопокрівля; 2 – бак-акумулятор; 3 – електричний водонагрівач;
- 4,5 – трубопроводи геліосистеми; 6 – циркуляційний насос; 7 – подача води на систему гарячого водопостачання; 8 – патрубок зливу теплоносія;
- 9 – теплообмінник від електричного водонагрівача

Також геліопокрівлю можна використовувати для підігріву теплоносія на систему опалення (рис. 4.5). В цьому випадку використовують буферну ємність. Буферні ємності для системи опалення мають визначені розміри, тому вони не підходять для підігріву води на систему гарячого водопостачання. Для них діють ті ж правила проектування, що і для ємнісних водонагрівачів системи гарячого водопостачання.

Застосування буферних ємностей обмежене, також тому, що їх об'єм великий, а потужність догрівання значно нижча, ніж в ємнісних водонагрівачів системи гарячого водопостачання.

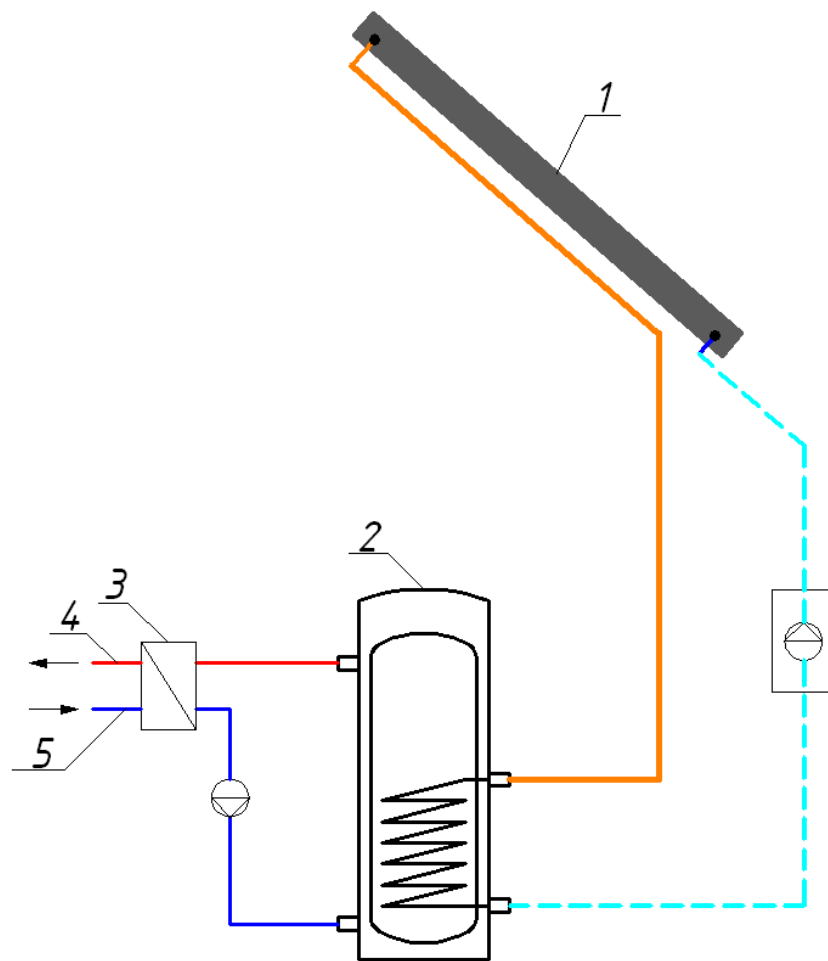


Рис. 4.5. Система опалення (СО) з геліопокрівлею:
 1 – геліопокрівля; 2 – буферна ємність; 3 – електричний котел;
 4 – подавальний трубопровід системи опалення; 5 – зворотний
 трубопровід системи опалення

Можливе поєднання системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею та тепловим насосом [67, 81]. Дана система може використовуватись в системі теплопостачання з тепловим насосом та

рекуператором. Також геліюпокрівлю запропоновано встановлювати не лише на даху, а й на південній стіні. На рис. 4.6 схематично зображений енергоефективний будинок.

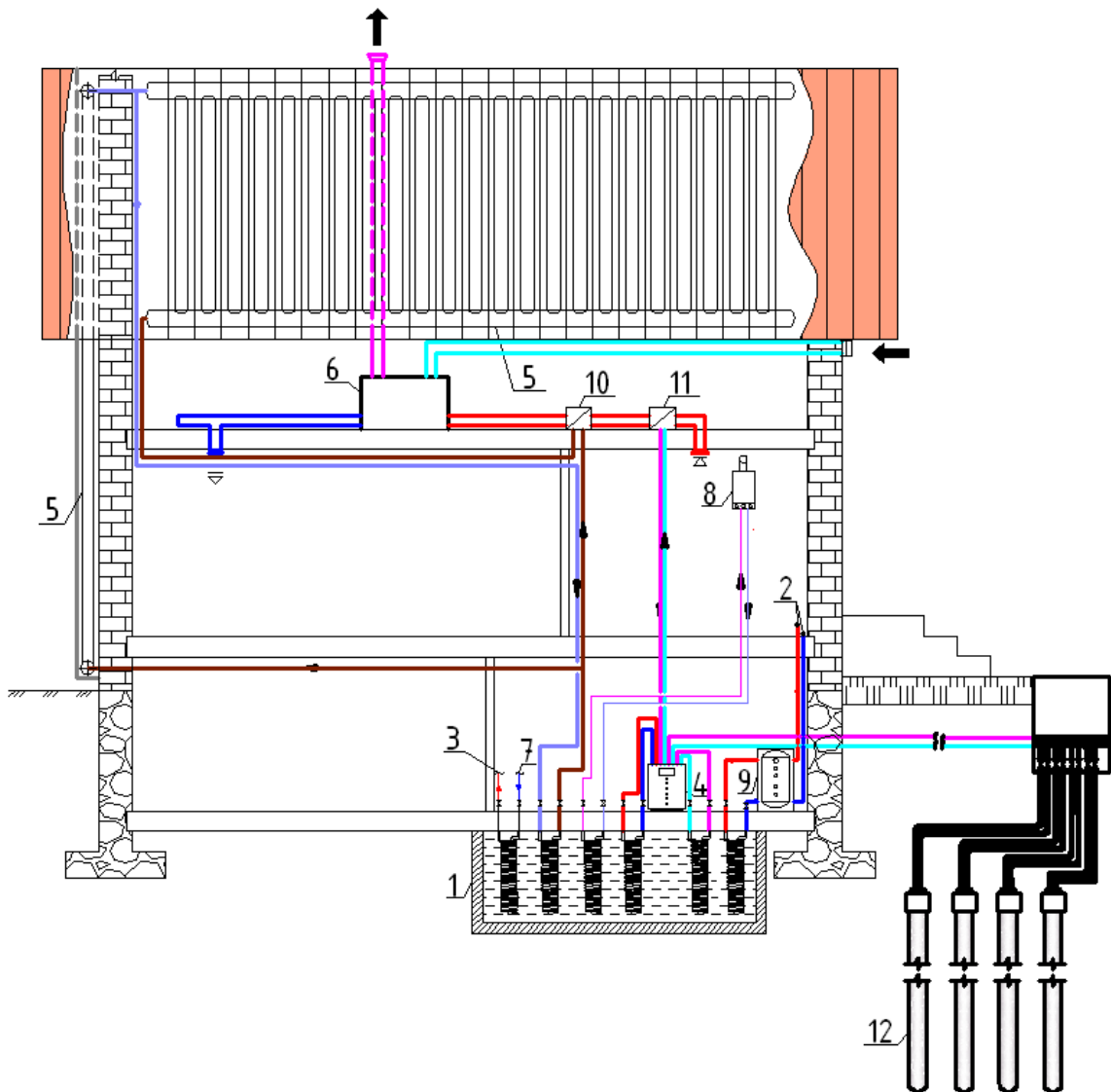


Рис. 4.6. Схема енергоефективного будинку (патент України на корисну модель № 92009):

- 1 – бак-акумулятор теплоти; 2 – СО; 3 – СГВ; 4 – тепловий насос; 5 – геліюпокрівля; 6 – рекуператор;
 7 – трубопровід подачі холодної води на систему гарячого водопостачання;
 8 – електричний котел; 9 – буферна ємність; 10 – теплообмінник;
 11 – теплообмінник; 12 – теплообмінник

Енергоефективний будинок містить розташований під ним бак-акумулятор теплоти 1, до якого під'єднані системи опалення 2 та гарячого водопостачання 3, сполучені з тепловим насосом 4 та геліюпокрівлею 5, розміщеною на даху будинку та його південній стіні. Тепловий насос з'єднаний

з теплообмінником 11 та теплообмінником 12. Система вентиляції оснащена утилізатором теплоти 6. Для подачі холодної води на систему гарячого водопостачання передбачено трубопровід 7. З системою опалення бак-акумулятор з'єднується через буферну ємність 9. Для підвищення ефективності роботи геліопокрівлі 5 додатково встановлений теплообмінник 10 для теплоносія між геліопокрівлею 5 та баком-акумулятором 1. Енергоефективний будинок додатково оснащений електричним котлом 8 з'єднаним з баком-акумулятором 1.

Енергоефективний будинок працює наступним чином.

Сонячне проміння попадає на геліопокрівлю 5, виконану з покрівельного матеріалу, розташовану на даху будинку та його південній стіні. При цьому відбувається нагрівання покрівельного матеріалу, від якого тепло передається трубкам для теплоносія. За рахунок різниці температур, та, відповідно, різниці густин теплоносія в зоні вхідного і вихідного патрубків створюється циркуляція теплоносія. Нагрітий теплоносій подається в бак-акумулятор теплоти 1, який розташований під будинком. Віддавши тепло, частина теплоносія поступає на нагрівання в геліопокрівлю 5, розташовану на південній стіні, а частина спочатку поступає в теплообмінник 10, в якому нагрівається за рахунок витяжного повітря з будинку, а потім подається в геліопокрівлю 5, розташовану на даху будинку, в якому догрівається за рахунок сонячної енергії. Тепловий насос 4 забирає тепло від трьох джерел: з ґрунту через теплообмінник 12, від витяжного повітря через теплообмінник 11 та з баку-акумулятора 1. Нагрітий теплоносій поступає в бак-акумулятор теплоти 1. З нього тепло подається на систему опалення 2 та систему гарячого водопостачання 3. подача холодної води для системи гарячого водопостачання здійснюється через трубопровід 7. З системою опалення 2 бак-акумулятор 1 з'єднується через буферну ємність 9. Для зменшення енергії на нагрівання вентиляційного повітря на горищі розміщений утилізатор тепла 6. Витяжне повітря, яке видаляється з приміщення, проходить через теплообмінник 11, де віддає тепло тепловому насосу 4, теплообмінник 10, в якому нагріває

теплоносії з геліопокрівлі та поступає в утилізатор теплоти 6, в якому, віддавши своє тепло притічному повітрю, видаляється назовні, а нагріте повітря поступає в приміщення. Коли енергії Сонця та енергії надр землі не вистачає для нагрівання теплоносія, додатковим джерелом тепла є електричний котел 8.

4.3. Метод розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання із геліопокрівлею

Для використання результатів, отриманих при виконанні дисертаційної роботи, пропонується метод розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання із використанням геліопокрівлі.

Питома теплова потужність 1 м^2 геліопокрівлі, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_{\text{г}} = E_{\text{г}} \cdot \eta_0 \cdot (1 - a \cdot G + b \cdot G^2) \cdot K_{\text{эф}} \quad (4.1)$$

де, $E_{\text{г}}$ – інтенсивність сонячної енергії, яка поступає на 1 м^2 площі поверхні ГП, $\text{Вт}/\text{м}^2$; a і b – довідкові поправні коефіцієнти [19]; $K_{\text{эф}}$ – коефіцієнт ефективності геліопокрівлі; η_0 – оптичний ККД геліопокрівлі; G – розрахунковий параметр, який враховує середньомісячний коефіцієнт ясності атмосфери, температуру води на вході в геліопокрівлю та температуру навколишнього середовища.

Коефіцієнти ефективності різних конструкцій ГП визначаються за відповідними емпіричними залежностями, отриманими експериментально та наведеними в розділі 3.

Оптичний ККД ГП з прозорим покриттям визначається за формулою [19]:

$$\eta_0 = \tau \cdot h \quad (4.2)$$

де τ – коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання прозорим покриттям; h – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання теплопоглиначем.

Оптичний ККД для геліопокрівлі без прозорого покриття:

$$\eta_0 = h \quad (4.3)$$

Параметр G визначається за формулою [127]:

$$G = \frac{(t_{\text{вх}} - t_{\text{з}})}{K_{\text{я}}} \quad (4.4)$$

де, $t_{\text{вх}}$ і t_3 – відповідно температура теплоносія на вході у геліопокрівлю та температура навколишнього середовища, °С; $K_{\text{я}}$ – середньомісячний коефіцієнт ясності атмосфери.

$$K_{\text{я}} = \frac{E}{E_0} \quad (4.5)$$

де E – інтенсивність сонячної енергії, яка надходить на горизонтальну поверхню на Землі, Вт; E_0 – інтенсивність сонячної енергії, яка поступає за межами земної атмосфери, Вт.

Кількість сонячної енергії, яка поступає на 1 м² площі поверхні геліопокрівлі, визначається за формулою, Вт/м² [19]:

$$E_{\text{г}} = R \cdot E \quad (4.6)$$

де E – інтенсивність сонячної радіації, яка поступає на горизонтальну поверхню геліопокрівлі, Вт/м²; R – відношення середньомісячної денної інтенсивності сонячної радіації, яка надходить на похилу та горизонтальну поверхні.

Коефіцієнт перерахунку інтенсивності сонячної енергії з горизонтальної поверхні на похилу поверхню ГП рівний сумі трьох складових: прямого, розсіяного і відбитому сонячному випромінюванню [100]:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_{\text{п}} + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4.7)$$

де E_p – інтенсивність розсіяного сонячного випромінювання, яка поступає на горизонтальну поверхню, Вт/м²; $R_{\text{п}}$ – середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню; β – кут нахилу геліопокрівлі, °; ρ – коефіцієнт відбиття (альbedo) поверхні Землі і навколишніх тіл, який приймається рівним 0,7 для зими і 0,2 – для літа.

Середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню, визначається за формулою [100]:

$$R_{\text{п}} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_{\text{з.н}} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\text{з.н}} \cdot \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_{\text{з}} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\text{з}} \sin \varphi \sin \delta} \quad (4.8)$$

де φ – широта місцевості, °; δ – схилення Сонця в середній день місяця, °.

Часовий кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної поверхні [100]:

$$\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (4.9)$$

В якості часового кута заходу Сонця для похилої поверхні приймають меншу з двох величин: ω_3 або $\omega_{3,н}$, яка визначається за формулою [100]:

$$\omega_{3,н} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \delta) \cdot \operatorname{tg} \delta] \quad (4.10)$$

Інтенсивність потоку сонячної радіації, яка поступає на горизонтальну поверхню геліопокрівлі, визначалася за формулою:

$$E = F_1 \cdot E_1 + F_2 \cdot E_2 + F_3 \cdot E_3 \quad (4.11)$$

де F_i – площа поглинання відповідної грані гофрованого покрівельного матеріалу будівлі, м²; E_i – інтенсивність сонячного випромінювання, яке надходить на відповідну грань гофрованого покрівельного матеріалу будівлі, Вт/м².

Інтенсивність сонячного випромінювання E , Вт/м², яке надходить на горизонтальну поверхню геліопокрівлі, визначається як сума прямої та розсіяної сонячної радіації впродовж дня [100]:

$$E = \int (E_b \cdot \cos \theta + E_d) dt \quad (4.12)$$

де E_b , E_d – відповідно кількість прямої та розсіяної сонячної радіації, Дж/м²; θ – кут між напрямком потоку випромінювання та нормаллю до поверхні теплопоглинача, °.

Оптимальний кут нахилу ГП до горизонту для теплого періоду року розраховувався за формулою (4.13), а для холодного – за формулою (4.14) [12]:

$$\beta = \varphi + \frac{\delta}{2} \quad (4.13)$$

$$\beta = \varphi + \delta \quad (4.14)$$

де δ – значення сонячного схилення за розрахунковий період, °.

Сонячне схилення δ розраховувалось за формулою, °:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin \left(\frac{284 + m}{365} \cdot 360 \right) \quad (4.15)$$

де m – порядковий номер дня в році станом на 15 число кожного місяця.

Теплова потужність геліопокрівлі, Вт, визначалась за формулою:

$$Q_{\Gamma} = q_{\Gamma} \cdot F \quad (4.16)$$

де F – площа геліопокрівлі, м².

Річна доля сонячної енергії в покритті теплового навантаження визначалась за формулою (4.17):

$$f = 1 - Q_{\text{д}} / Q_{\text{м}} \quad (4.17)$$

де $Q_{\text{д}}$ – річна кількість теплоти, яка забезпечується сонячною установкою і додатковим джерелом енергії, Дж; $Q_{\text{м}}$ – річна величина теплового навантаження, Дж.

Втрати тиску в геліопокрівлі визначаються за формулою:

$$P = 125 \cdot (\sum l / d + 940) \cdot V^2 \quad (4.18)$$

де, l – довжина трубок контуру циркуляції теплоносія в геліопокрівлі, м; d – діаметр трубок контуру циркуляції теплоносія в геліопокрівлі, м; V – швидкість руху теплоносія в трубках контуру циркуляції, м/с.

Загальне теплове навантаження за рік визначалось за формулою:

$$Q_{\text{м}} = Q_0 + Q_{\text{ГВ}} \quad (4.19)$$

де Q_0 – теплове навантаження на опалення, Вт; $Q_{\text{ГВ}}$ – теплове навантаження на гаряче водопостачання, Вт.

Теплове навантаження на опалення визначалось за формулою:

$$Q_0 = \sum K_i \cdot F_i \cdot \Delta t \cdot \tau + Q_{\text{інф}} - Q_{\text{в.т}} \quad (4.20)$$

де K_i – розрахунковий коефіцієнт тепловтрат для даного елемента огорожуючих конструкцій (стіни, вікна, підлоги, стелі), Вт/(м²·К); F_i – площа поверхні елемента огорожуючих конструкцій, м²; Δt – розрахункова різниця температур, °С; τ – тривалість розрахункового періоду, діб; $Q_{\text{інф}}$ – тепловтрати зумовлені інфільтрацією холодного повітря, Вт; $Q_{\text{в.т}}$ – внутрішні теплонадходження від людей, обладнання, освітлення, Вт.

Теплове навантаження на гаряче водопостачання, визначалось за формулою:

$$Q_{\text{ГВ}} = 1,2 \cdot \xi \cdot C_p \cdot \rho \cdot (t_{\text{ГВ}} - t_{\text{ХВ}}) N \cdot n \quad (4.21)$$

де N – кількість жителів; ζ – норма витрати води на гаряче водопостачання, л/добу; C_p – питома теплоємність води, Дж/(кг·°C); ρ – густина води, кг/м³; $t_{гв}$ і $t_{хв}$ – відповідно температура гарячої та холодної води, °C; n – кількість днів в розрахунковому періоді, діб.

На рис. 4.7 зображено алгоритм розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання.

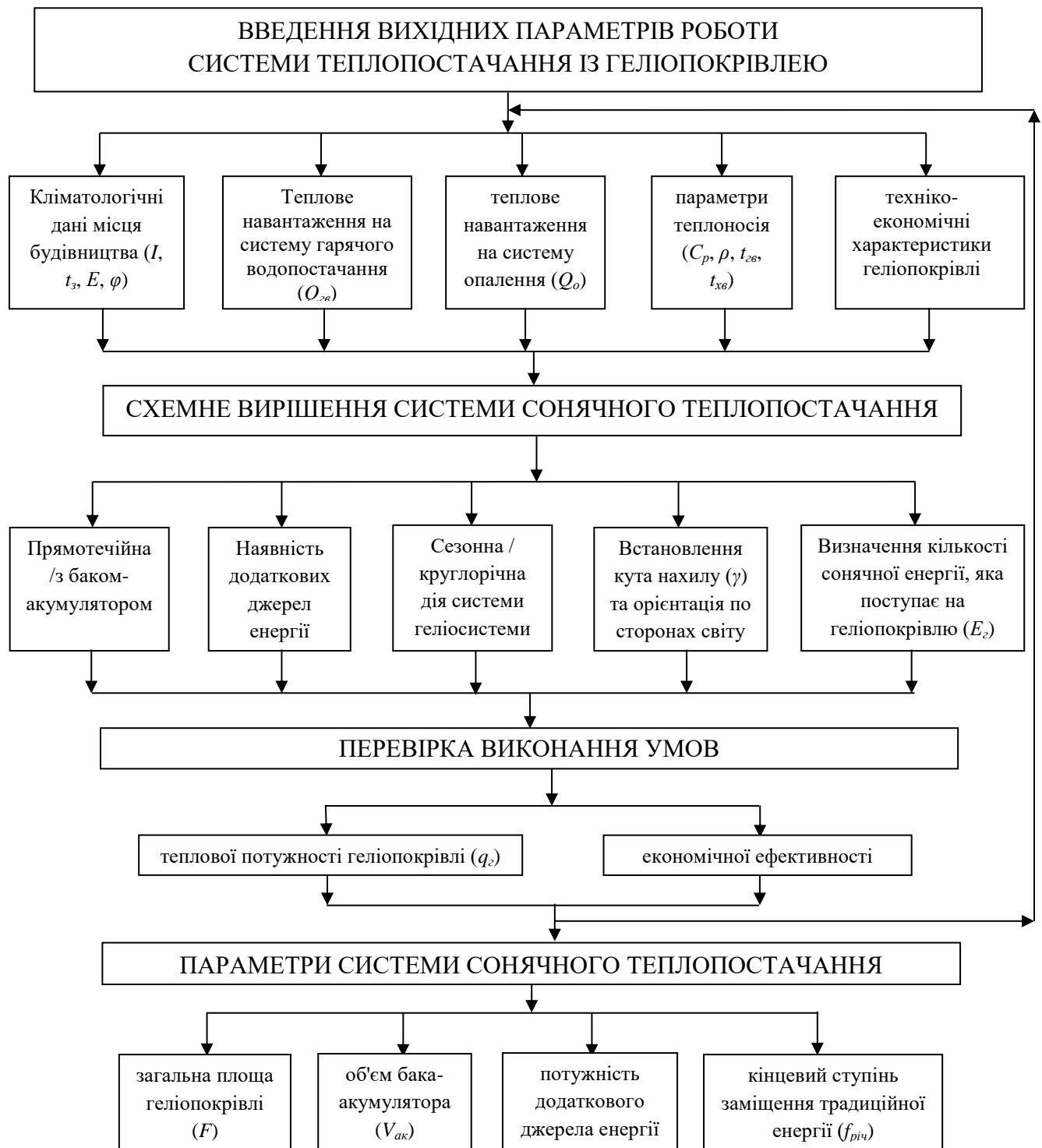


Рис. 4.7. Алгоритм розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання

На основі вищенаведеного методу розрахунку складено комп'ютерну програму (додаток А) для розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею (рис. 4.8). Результати розрахунків за допомогою комп'ютерної програми зображено у графічній формі на рис. 4.9.

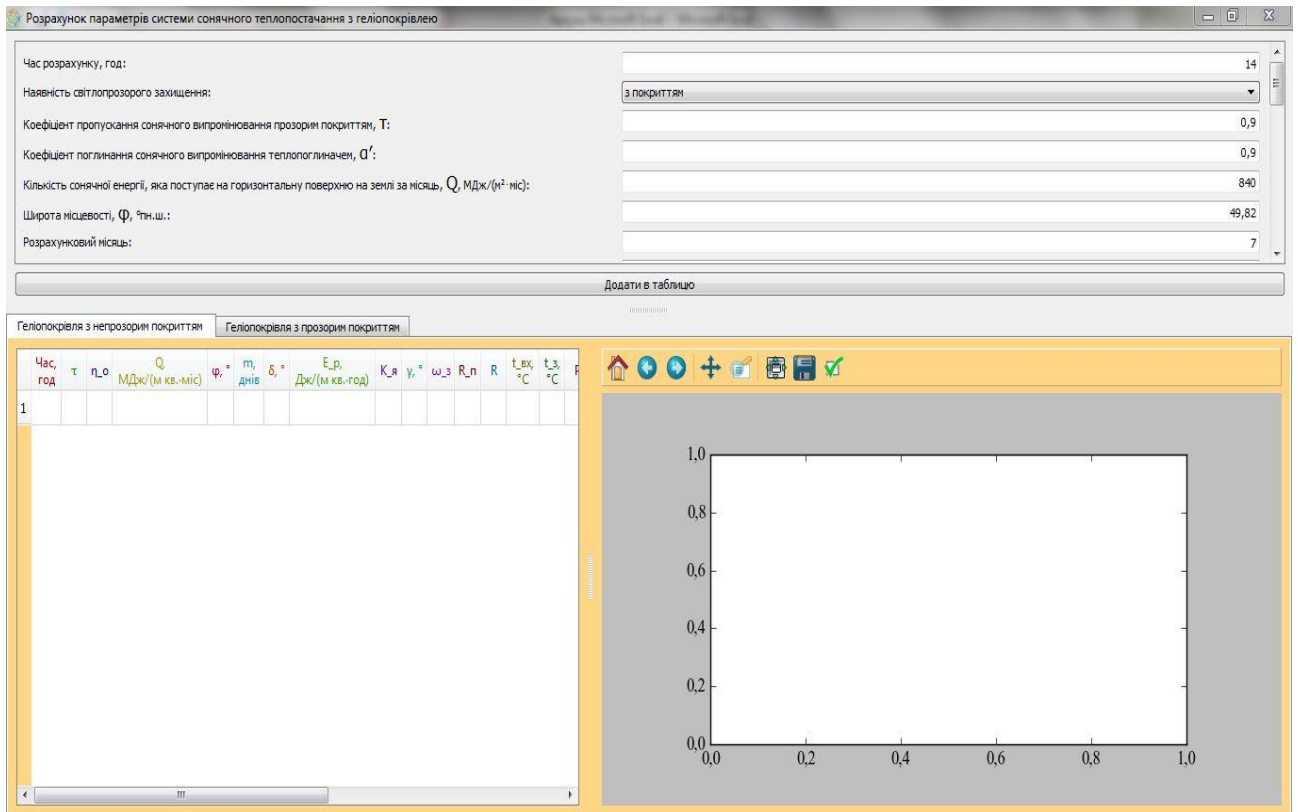


Рис. 4.8. Робоче вікно програми

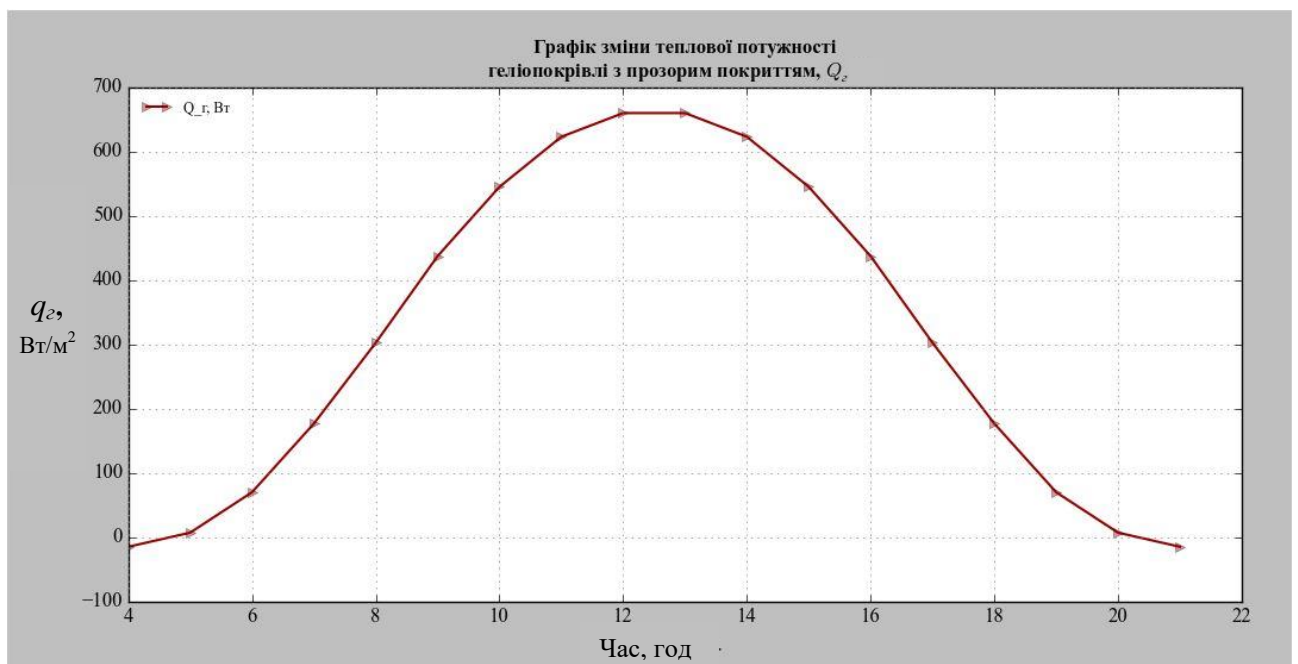


Рис. 4.9. Зміна питомої теплової потужності геліопокрівлі з прозорим покриттям протягом дня

Розрахунок проводився для м. Львова для умов липня місяця. Коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання прозорим покриттям $\tau = 0,9$. Коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання теплопоглиначем $h = 0,9$. Розрахунок проводився для липня місяця. Початкова температура теплоносія приймалась рівною 14°C .

З рис. 4.9 встановлено, що питома теплова потужність геліопокрівлі з прозорим покриттям протягом дня досягає 660 Вт/м^2 . Розрахунковий ККД самої геліопокрівлі становить 72% .

4.4. Техніко-економічні показники геліопокрівлі та сонячних колекторів

Поставлено завдання зменшити вартість та термін окупності геліосистем. Це здійснюється завдяки тому, що теплопоглинаючий матеріал геліопокрівлі є одночасно покрівельним матеріалом будівлі, що дає змогу знизити вартість, підвищити міцність та спростити конструкцію сонячного колектора [90]. Геліопокрівля дає змогу ефективно використовувати тепло покрівельного матеріалу будівлі.

Геліоустановки, основним елементом яких є геліопокрівля, в холодний період року, коли температура зовнішнього повітря і густина потоку сонячного випромінювання низькі, не можуть самостійно забезпечити потреби гарячої води. Тому доцільним є підключати їх до додаткового джерела тепла, наприклад газових чи електричних котлів, теплових насосів, тощо. Використання таких комбінованих систем є конкурентним, порівняно з традиційними системами теплопостачання.

Для економічного порівняння геліопокрівлі із звичайним сонячним колектором було обрано 2-х поверховий громадський будинок розташований у м. Львові (додаток В).

Середній тепловий потік на гаряче водопостачання, Вт, визначається за формулою:

$$Q_{hm} = 1,163 \cdot q_T^h \cdot \rho_t \cdot (55 - t_c) \cdot (1 + k^t) \quad (4.22)$$

де $\rho_t = 985,73 \text{ кг/м}^3$ густина води при $t_r = 55^\circ \text{ C}$ (для закритої системи теплопостачання); k^t – коефіцієнт, який враховує тепловтрати в трубопроводах системи ГВ, $k^t = 0,2$ (якщо в системі ГВ є сушарки для рушників); q_T^h – середня годинна витрата гарячої води за добу, $\text{м}^3/\text{год}$, визначається за формулою:

$$q_T^h = \frac{q_{um}^h \cdot U}{24 \cdot 1000} \quad (4.23)$$

де q_{um}^h – норма витрати гарячої води за добу на одного споживача, [6]; U – кількість споживачів, яку можна обчислити за формулою:

$$U = \frac{F_{\text{заг}}}{f_3} \cdot n \quad (4.24)$$

де $F_{\text{заг}}$ – загальна площа громадського будинку, м^2 ; f_3 – норма загальної площі, $\text{м}^2/\text{людину}$; n – кількість поверхів у будинку.

Максимальний тепловий потік на гаряче водопостачання, Вт , визначався за формулою:

$$Q_{h \text{ max}} = 1,163 \cdot (q_T^h \cdot k^t + q_{hr}^h) \cdot \rho_t \cdot (55 - t_c) \quad (4.25)$$

де q_{hr}^h – максимальна годинна витрата гарячої води, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$q_{hr}^h = 0,005 \cdot q_{0,hr}^h \cdot \alpha_{hr} \quad (4.26)$$

де $q_{0,hr}^h$ – годинна витрата гарячої води санітарно-технічним приладом; для цього випадку, виходячи з заданого рівня благоустрою $q_{0,hr}^h = 200 \text{ л/год}$; $\alpha_{hr} = f(N \cdot P_{hr})$ – величина, яка залежить від загальної кількості водорозбірних приладів N , шт., які обслуговуються цією системою ГВ та імовірності їхнього використання в системі ГВ.

Імовірність дії водорозбірних приладів системи ГВ визначалась за формулою:

$$P = \frac{q_{hr,u}^h \cdot U}{3600 \cdot q_0^h \cdot N} \quad (4.27)$$

де $q_{hr,u}^h$ – норма витрати гарячої води одним споживачем за годину найбільшого споживання; q_0^h – секундна витрата гарячої води водорозбірним приладом, віднесена до одного приладу.

Імовірність використання водорозбірних приладів системи ГВ:

$$P_{hr} = \frac{3600 \cdot P \cdot q_0^h}{q_{0,hr}^h} \quad (4.28)$$

Величину α_{hr} визначаємо за величиною добутку $N \cdot P_{hr}$. Теплове навантаження на гаряче водопостачання громадського будинку становило $Q = 1,73$ кВт. Річна доля сонячної енергії в покритті навантаження прийнята 60% від теплового навантаження на гаряче водопостачання [6]. За рік це становить $Q = 32,71$ ГДж/рік. Доцільно розглянути три варіанти систем гарячого водопостачання:

- I варіант – СГВ з використанням сонячних колекторів фірми Viessmann: «Vitosol 100F», які є одними із найдорожчих і ефективних сонячних колекторів виробництва Німеччини;

- II варіант – СГВ з використанням сонячних колекторів фірми Atmosfera: «SPK-F2 Plus», які є одними із найдешевших, але менш ефективних сонячних колекторів вітчизняного виробництва;

- III варіант – пропонується СГВ з використанням геліопокрівлі.

Забезпечення потреб гарячого водопостачання у кількості 2,9 кВт вимагає встановлення 15,07 м² сонячних колекторів фірми Viessmann: «Vitosol 100F» або 16,18 м² сонячних колекторів фірми Atmosfera: «SPK-F2 Plus» або 20,0 м² геліопокрівлі.

Розрахунок проводився станом на липень 2017 р. Курс долара до гривні в цей період становив 26,3 грн за 1 долар.

Порівняння варіантів здійснювалось за приведеними річними затратами. Найкращим з них є той варіант, в якому приведені річні затрати є мінімальними.

Приведені річні затрати визначались за формулою [96]:

$$П = C + E_n \cdot K \quad (4.29)$$

де P – річні приведені затрати, тис. грн/рік; C – експлуатаційні річні затрати, тис. грн/рік; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень: $E_n = 0,15$, 1/рік; K – капітальні затрати на систему сонячного теплопостачання, тис. грн.

Капітальні затрати K_i на систему сонячного теплопостачання:

$$K_i = (C_k + C_{об} + C_d + C_m) \cdot A + C_{ак} \cdot V \quad (4.30)$$

де C_k – питома вартість СК, грн/м²; $C_{ак}$ – питома вартість акумулятора сонячної енергії, грн/м³; $C_{об}$ – вартість допоміжного обладнання, грн/м²; C_d – вартість доставки компонентів системи сонячного теплопостачання, грн/м²; C_m – вартість монтажу системи сонячного теплопостачання, грн/м²; A – загальна площа сонячних колекторів, м²; V – об'єм бака-акумулятора, м³.

Капітальні затрати на системи гарячого водопостачання з використанням сонячних колекторів фірми Viessmann: «Vitosol 100F» становлять $K_1 = 55,98$ тис.грн., фірми Atmosfera: «SPK-F2 Plus» $K_2 = 45,12$ тис.грн., а вартість системи гарячого водопостачання з використанням геліопокрівлі $K_3 = 29,34$ тис.грн.

Річні експлуатаційні затрати визначались за формулою:

$$C = A + P + I + Z \quad (4.31)$$

де A – амортизаційні відрахування, тис. грн/рік; P – затрати на поточний ремонт, тис. грн/рік; Z – заробітна плата обслуговуючого персоналу, тис. грн/рік; I – інші затрати, тис. грн/рік.

Сумарні відрахування на амортизацію ($A_{ам}$), капітальний ремонт ($A_{кр}$) і повне відновлення ($A_{пв}$) усереднено були прийняті в розмірі 8% річних від капітальних затрат для внутрішнього водопостачання, тис. грн/рік:

$$A = 0,08 \cdot K_i \quad (4.32)$$

Затрати на поточний ремонт залежать від змінності роботи систем, агресивності середовища, в якому вони працюють.

Усереднено затрати на поточний ремонт були прийняті в розмірі 8% річних від капітальних затрат, тис. грн/рік:

$$P = 0,03 \cdot K_i \quad (4.33)$$

Визначення затрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховувались за формулою, тис. грн/рік:

$$Z = C_{\text{роб}} \cdot C_{\text{год}} \cdot G \quad (4.34)$$

де $C_{\text{роб}}$ – середня кількість робітників, які обслуговують систему гарячого водопостачання; $C_{\text{год}}$ – середньогодинна заробітна плата одного робітника з нарахуваннями 13,6 грн/год; G – кількість годин, які працює робітник в місяць ($G = 8,0 \cdot 24 = 192$ год);

Величина інших витрат була прийнята в розмірі 30% від суми амортизаційних відрахувань, витрат на поточний ремонт і заробітну плату обслуговуючого персоналу, тис. грн/рік:

$$I = 0,3 \cdot (A + P + Z) \quad (4.35)$$

При порівнянні з допомогою приведених затрат було вбрано варіант з найменшим їх значенням:

$$P_i = C_i + E_n \cdot K_i \Rightarrow \min, \quad (4.36)$$

Доцільно розглянути питомі приведені річні затрати як відношення приведених затрат, до кількості тепла отриманої від кожної геліоустановки за рік:

$$P_{\text{п}} = \frac{P_i}{Q_i} \quad (4.37)$$

де Q_i - кількість тепла отримана системою сонячного теплопостачання за рік, ГДж/рік.

При порівнянні з допомогою питомих приведених річних затрат був вибраний варіант із найменшим їх значенням:

$$P_{\text{п}} = \frac{P}{Q} \Rightarrow \min, \quad (4.38)$$

Отримані результати показано у таблиці 5.1.

Отже, найменші питомі приведені річні затрати має ССТ із використанням геліопокрівлі. Тому доцільно визначити термін її окупності.

Термін окупності системи сонячного теплопостачання визначався за формулою:

$$S = \frac{K_i}{h_i} \quad (4.39)$$

де K_i – інвестиційні кошти на систему сонячного теплопостачання, тис. грн; h_i – ощадність коштів, тис. грн/рік.

Ощадність коштів визначалось як добуток кількості тепла, отриманої з геліоустановки, на вартість 1 Гкал теплоти (згідно постанови НКРЕ № 1101 від 09.06.2016 року 1345,12 грн за 1 Гкал).

Таблиця 5.1

Техніко-економічні показники систем теплопостачання із використанням сонячних колекторів та геліопокрівлі

Показник	Сонячні колектори		Геліопокрівля
	Viessmann: Vitosol 100F	Atmosfera: SPK-F2	
Необхідна площа геліополя, м ²	15,07	16,11	20,07
Капітальні затрати, тис.грн/м²	7,88	5,94	3,10
Відрахування на амортизацію, капітальний ремонт і повне відновлення A , тис.грн/(рік·м ²)	0,63	0,48	0,25
Затрати на поточний ремонт P , тис.грн/(рік·м ²)	0,24	0,18	0,09
Затрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу Z , тис.грн/(рік·м ²)	2,08	1,94	1,56
Інші затрати I , тис.грн/(рік·м ²)	0,88	0,78	0,57
Експлуатаційні затрати C, тис.грн/(рік·м²)	3,83	3,38	2,47
Приведені річні затрати Π, тис.грн/(рік·м²)	5,01	4,27	2,94
Річна кількість теплоти з геліоустановки Q , ГДж/м ²	2,17	2,03	1,63
Питомі приведені річні затрати Π_n, тис.грн/(рік·ГДж)	2,31	2,10	1,80
Термін окупності, років	11,3	9,1	5,9

Визначено термін окупності системи сонячного теплопостачання із використанням геліопокрівлі, який становить 5,9 років.

Отже, результати засвідчили високу економічну ефективність системи сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі у порівнянні із сонячними колекторами. Так, питомі приведені затрати системи сонячного теплопостачання з геліопокрівлею становлять 1,80 тис.грн/(ГДж·рік), що є в середньому на 18 % меншими, ніж затрати на систему гарячого водопостачання з використанням сонячних колекторів. Термін окупності системи сонячного теплопостачання із геліопокрівлею є майже удвічі меншим, ніж термін окупності геліосистеми із сонячними колекторами. Ці дані свідчать про високу ефективність геліопокрівлі та можливість її широкого застосування у системах сонячного теплопостачання.

4.5. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування геліопокрівлі

Для економічного обґрунтування доцільності використання геліопокрівлі доцільно співставити значущість і вартість установки альтернативної енергії та енергоощадність. Економічний позитивний «у прибуток» розрахунок буде своєрідним поштовхом для актуалізації у напрямку використання додаткових джерел (цільових фондів енергоощадності), залучення додаткових інвестиційних та власних коштів суб'єктів підприємницької діяльності.

Було проаналізовано ринок плоских сонячних колекторів, їхня марка, ККД, підраховано орієнтовані ціни плоских сонячних колекторів.

Розрахунок проводився для двохповерхового будинку розташованого у м. Львові.

За вихідні дані було прийнято:

- житлова площа приміщення 120 м²;
- проживання в приміщенні 4 осіб;
- витрата гарячої води однією особою 89,25 л/добу;
- наявність газового лічильника;

- роздрібна ціна на природній газ згідно постанови НКРЕКП № 2496 від 30.09.2015 року 6,879 гривні за 1 м³.

В основі розрахунку поставлена задача порівняння різних систем джерел енергії за класичною системою.

За класичну схему, для порівняння, вибрано газовий котел фірми Viessmann: Vitosol 200 F.

Необхідна площа геліополя визначалась за формулою, м²:

$$F = \frac{Q}{Q_{\text{пад}} \cdot \eta}, \quad (4.40)$$

де Q – потрібна кількість теплоти на гаряче водопостачання; $Q_{\text{пад}}$ – величина сонячної радіації на 1 м² похилої поверхні геліополя; η – ККД геліосистеми.

Потрібну кількість теплоти на гаряче водопостачання визначалась за формулою:

$$Q_{\text{ГВ}} = \frac{m \cdot n \cdot c \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{п}})}{3600 \cdot 24}, \quad (4.41)$$

де $m = 60$ л/добу – норма споживання води на побутові потреби; $n = 4$ – кількість людей, що користуються гарячою водою; $t_{\text{п}} = 5^{\circ}\text{C}$, – температура холодної води в опалювальний період; $t_{\text{к}} = 55^{\circ}\text{C}$, – кінцева температура води.

Зважаючи на сталі навантаження на систему гарячого водопостачання протягом року, можемо отримати загальну річну витрату природного газу $Q_{\text{рік}}$, (м³/рік), що при вищенаведених вихідних даних становитиме 1039 м³/рік.

Загальна річна вартість газу P , витраченого на потреби системи гарячого водопостачання визначалась за формулою, грн/рік:

$$P = Q_{\text{рік}} \cdot 6,879 \quad (4.42)$$

де 6,879 грн/м³ – ціна природнього газу.

Економія коштів, що підраховується для певної сонячної системи, розраховувалась за формулою, грн/рік:

$$h = \frac{\eta_i}{100} \cdot P, \quad (4.43)$$

де η_i – ККД системи сонячного теплопостачання.

Економію коштів на природний газ кожною системою сонячного теплопостачання за рік зображено на рис. 4.10.

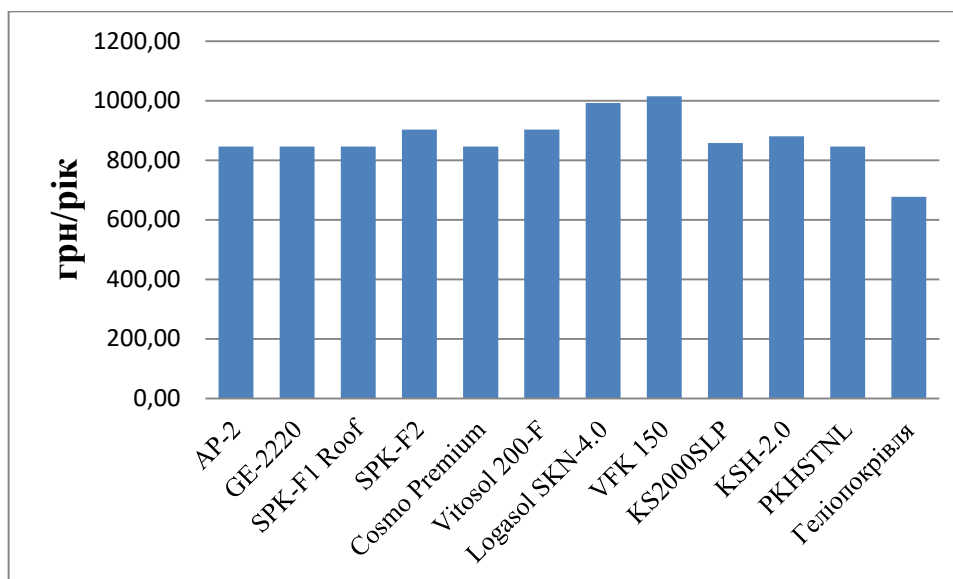


Рис. 4.10. Економія коштів на природний газ кожною системою сонячного теплопостачання за рік

Знаючи необхідну кількість інших видів джерел енергії для класичної системи теплопостачання й вартісної економії переходу з традиційних на альтернативний вид палива була підрахована економія енергоресурсів системою сонячного теплопостачання із геліопокрівлею (рис. 4.11).

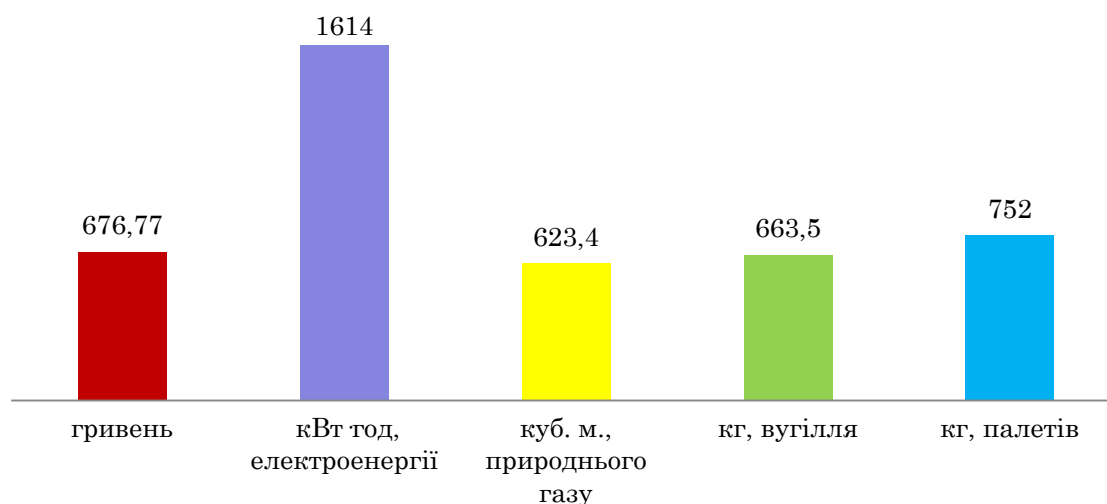


Рис. 4.11. Економія енергоресурсів системою сонячного теплопостачання із геліопокрівлею

З рис. 4.11 бачимо, що система сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі є економічно ефективною не тільки в грошовому

еквіваленті, але й в плані збереження різних видів енергоресурсів. Так, ССТ з використанням геліопокрівлі дає змогу економити до 670 гривень/рік, або ~1614 кВт·год електроенергії.

Термін окупності кожної системи сонячного теплопостачання зображено на рис. 4.12.

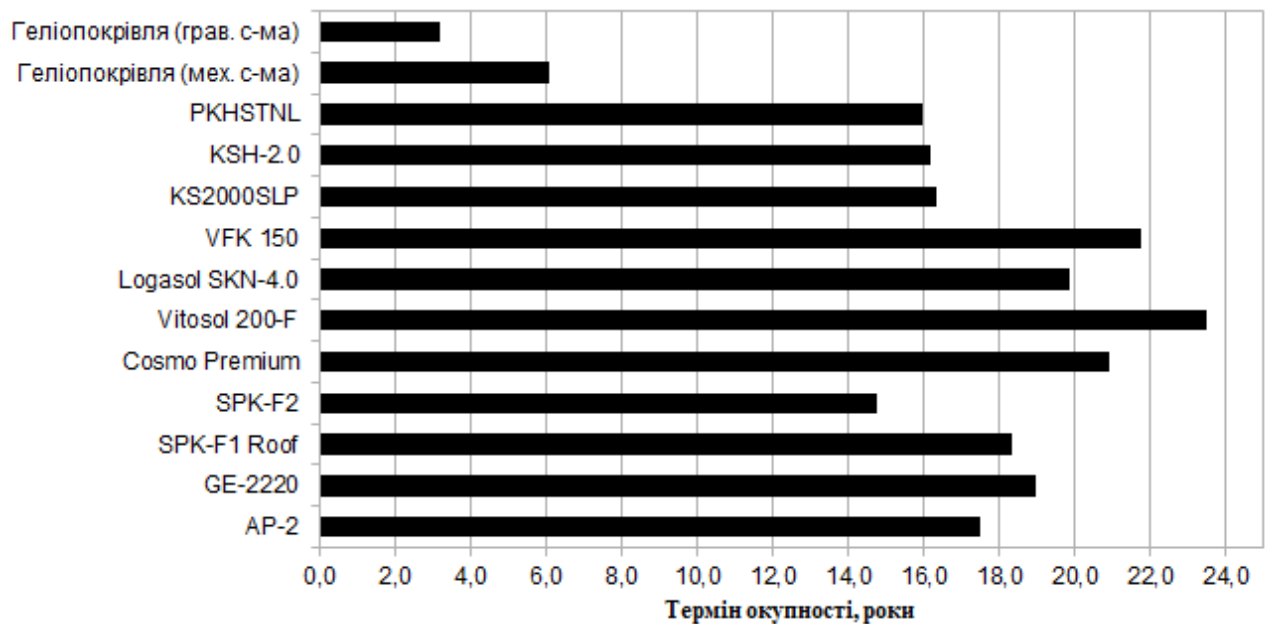


Рис. 4.13. Термін окупності окремих систем сонячного теплопостачання

Встановлено, що термін окупності геліопокрівлі для будинку, в якому проживає 4 особи, становить 6,1 рік – для геліопокрівлі з механічним побудженням та всього лише 3,2 роки – для пасивної системи сонячного теплопостачання.

Система сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі має найменший термін окупності, внаслідок зниження собівартості обладнання, проте витримуватиме математично обумовлене навантаження на гаряче водопостачання аналогічно до інших плоских сонячних колекторів.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Запропоновано способи використання геліопокрівлі в різних системах сонячного теплопостачання та показано, що можна ефективно використовувати тепло покрівельного матеріалу будівлі.

2. Запропоновано гравітаційну систему із використанням геліопокрівлі, систему гарячого водопостачання та систему опалення із використанням геліопокрівлі та схему енергоефективного будинку.

3. Розроблено методику інженерного розрахунку параметрів системи сонячного теплопостачання із геліопокрівлею.

4. Встановлено економічну доцільність використання геліопокрівлі у системах сонячного теплопостачання. Питомі приведені затрати системи сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі становлять 1,80 тис.грн/(ГДж·рік), що є в середньому на 18 % меншими, ніж затрати на систему теплопостачання з використанням сучасних сонячних колекторів.

5. Система сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі має найменший термін окупності, порівняно із іншими сонячними колекторами. Термін окупності системи сонячного теплопостачання із використанням геліопокрівлі є удвічі меншим, ніж термін окупності геліосистеми із сонячними колекторами.

6. Встановлено, що система сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі, дає змогу економити до 670 гривень/рік, або ~1614 кВт·год електроенергії.

Наукові результати розділу 2 висвітлено у публікаціях автора: [67, 80, 81, 82, 90].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел і патентних досліджень встановлено переваги та недоліки існуючих ССТ та доведено економічну доцільність комбінованих систем теплопостачання, зокрема сонячного колектора, суміщеного зі скатною покрівлею будинку.

2. Розроблено конструкції геліопокрівлі, як складової ССТ, з використанням в ролі теплопоглинача профільно гофрованого металевого матеріалу покрівлі, що забезпечить зниження їх вартості та високу енергетичну ефективність.

3. Запропоновано удосконалену математичну модель вловлювання сонячної енергії з геліопокрівлею, що дало змогу визначити термоаккумуляційні властивості геліосистеми та отримати взаємозв'язок температури нагріву теплоносія в баці-аккумуляторі залежно від інтенсивності теплового потоку впродовж світлового дня та швидкості вітру. При цьому встановлено, що збільшення швидкості вітрового потоку до 6 м/с змінює коефіцієнт тепловіддачі від 1,76 до 8,1 Вт/(м²·К). Розрахована для липня денна термоаккумуляційна здатність геліопокрівлі при дії вітру зі швидкістю 1-6 м/с характеризується показниками питомої теплоти в межах від 10755 до 5712 кДж/м².

4. Встановлено вплив визначальних факторів на ефективність геліопокрівлі та експериментально отримано залежність зміни ефективності ССТ з використанням різних конструкцій геліопокрівлі від кутів падіння теплового потоку α , β та його інтенсивності. Встановлено, що ефективність геліопокрівлі при зміні кутів падіння теплового потоку α та β від 90° до 30° та інтенсивності теплового потоку від 900 Вт до 300 Вт зменшується в середньому на 40%, тоді як ефективність звичайного плоского сонячного колектора зменшується на 60%.

5. Встановлено, що в ССТ з геліопокрівлею розташування трубок контуру циркуляції теплоносія поверх гофрованого теплопоглинача забезпечує на 8-10%

вищий ККД, ніж під ним, а влаштування прозорого покриття збільшує ККД ще на 12-20%.

6. За реалізації експерименту отримано залежності зміни ефективності ССТ від швидкості та напрямку повітряного потоку, на основі чого встановлено, що ефективність геліопокрівлі з прозорим покриттям при впливі на неї повітряного потоку знижується на 35%, а ефективність геліопокрівлі без прозорого покриття – на 45%. На ефективність геліопокрівлі при дії на неї повітряного потоку більший вплив має швидкість повітряного потоку, а його напрям впливає в меншій мірі. При вітровому впливі із збільшенням швидкості повітряного потоку до 6 м/с ККД ССТ з геліопокрівлею зменшується на 16-19%.

7. Розроблено методику і комп'ютерну програму інженерного розрахунку параметрів ССТ з геліопокрівлею, а також способи її ефективного використання для комбінованого теплопостачання.

8. Проведено техніко-економічне порівняння геліопокрівлі та сонячних колекторів у ССТ. Питомі приведені затрати системи сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі становлять 1,80 тис.грн/(ГДж·рік), що є в середньому на 18% меншими, ніж затрати на систему теплопостачання з використанням плоских сонячних колекторів. Термін окупності системи теплопостачання з геліопокрівлею є майже відвічі меншим, ніж термін окупності геліосистеми з традиційними геліоколекторами. Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень та методику розрахунку параметрів ССТ з геліопокрівлею впроваджено в НВ ТзОВ «Кокер» у селі Кліцко Городоцького району Львівської обл., що дозволило на 25% зменшити енергозатрати в технології виготовлення керамічних виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
2. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / [О. Адаменко, В. Височанський, В. Лютко, М. Михайлів]. – Івано-Франківськ : Полум'я, 2000. – 208 с.
3. Бекман У. А. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. А. Бекман, С. А. Клейн, Дж. А. Даффи; пер. с англ. – М. : Энергоиздат. – 1982. – 80 с.
4. Белал Брахим. Сонячні системи тепло- і холодопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.03 "Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування" / Белал Брахим – О., 2002. – 17 с.
5. Будівельна кліматологія: ДСТУ – Н Б В. 1.1-27:2010. – [Чинний від 2011-11-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123с.
6. Віссман. Книга о «солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. К.: «Злато-Граф», 2010 – 191с.
7. Возняк О. Т. Combined solar collector / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"]. – Л. : В-во НУ «ЛП», 2014. – № 781. – С. 212-215.
8. Возняк О. Т. Вплив вітру на роботу сонячного колектора з гофрованим теплопоглиначем / О.Т. Возняк, О.М. Пона, С.П. Шаповал // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – №18 (1061). С. 32-38.
9. Возняк О. Т. Дослідження ефективності комбінованого сонячного колектора / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона // Науковий вісник

Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. праць / гол. ред. Д. Л. Дудюк. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2013. – Вип.23.13. – с. 171-174.

10. Возняк О. Т. Основи наукових досліджень у будівництві : навч. посібн. / О. Т. Возняк, В. М. Желих. – Л. : В-во НУ "ЛП", 2003. – 176 с.

11. Возняк О.Т. Вплив напрямку та швидкості повітряного потоку на роботу сонячного колектора без прозорого покриття / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин //Строительство и техногенная безопасность // Сборник научных трудов. – Симферополь. – 2014 – Выпуск № 50. С. 49-52.

12. Гальчак В. Альтернативні джерела енергії : навч. посіб. / В. Гальчак, В. Боярчук. – Л.: Арал, 2008. – 135 с.

13. Гершкович В. Ф. Теплова помпа у багатоповерховому житловому будинку. Це на перспективу чи вже сьогодні? / В. Ф. Гершкович // Ринок інсталяцій. – 2009. – № 1. – С. 32-33.

14. Голицын М. В. Альтернативные энергоносители / М. В. Голицын, А. М. Голицын, Н. М. Пронина. – М.: Наука, 2004. – 159 с.

15. Горін О. М. Альтернативні системи охолодження і кондиціонування повітря з використанням випарного охолодження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук: спец. 05.04.03 "Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування" / О. М. Горін. – О., 2007. – 39 с.

16. Гурин В. Н. Разработка эффективного селективного покрытия и конструкции солнечного теплового коллектора с рекомендациями по его использованию / В. Н. Гурин, И. О. Яшков, Д. В. Гурин // АСУ и приборы автоматики : всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х. : Изд-во ХНУРЭ, 2012. – Вып. 158. – С. 68–72.

17. Гурин В.Н. Разработка конструкции солнечного теплового коллектора и рекомендации по его использованию / В.Н Гурин, Д.В Гурин// т. XI, Вісник МСУ, технічні науки. – 2008. – №1 – С. 15-20.

18. Даковскі М. Про енергетику для споживачив та скептиків / М. Даковскі, С. Вянцковскі. – Львів : ЕКОінформ, 2007. – 212 с.

19. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман; пер. с англ. под. ред Ю. Н. Малевского. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
20. Денисова А. Є. Геліосистеми теплохолодопостачання для енергозберігаючих технологій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.04 "Промислова теплоенергетика" / А. Є. Денисова– О., 1997. – 16 с.
21. Денк С. О. Возобновляемые источники энергии: на берегу энергетического океана / С. О. Денк. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 288 с.
22. Джамаль Камаль Хусейн. Комбіновані системи тригенерації з використанням сонячної енергії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / Джамаль Камаль Хусейн. – О., 2008. – 20 с.
23. Дорошенко А. В. Теплофизические основы многофункциональных солнечных систем. Часть I. / Дорошенко А. В. Джамал Камал Хусейн, Хассан Сади Ибрагим, Глауберман М.А. // Физика аэродисперсных систем, Выпуск 48. – Одесса. – 2011 – С. 5-15.
24. Дорошенко А.В. Солнечные плоские коллекторы из полимерных материалов / Дорошенко, А. В., Глауберман, М. А., Роговская, Э. Т. // Физика аэродисперсных систем, Вып. 42. – 2005. – С. 32 - 46.
25. Дорошенко О.В. Сонячні плоскі металополімерні колектори / О.В. Дорошенко, С.С. Титар, Б.Є. Молчанський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №4. – С.32-35.
26. Дубковский В.А., Денисова А.Е. Целесообразность использования тепловых солнечных электростанций// Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – №1. – С. 3-8.
27. Дудюк Д. Л. Нетрадиційні (відновні) джерела енергії / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа. – Львів : РВВ Укр ДЛТУ, 2004. – 68 с.

28. Екологізація енергетики / [В. Я. Шевчук, Ю. М. Білявський, Ю. М. Саталкін, В. М. Навроцький]. – К.: Вища освіта, 2002. – 111 с.
29. Енергозбереження. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Колектори сонячні плоскі. Методи випробування: ДСТУ 4034 – 2001. – К.: Держстандарт України, 2001. – 27 с.
30. Ермуратский В.В. Определение коэффициента тепловых потерь коллектора солнечной энергии с абсорбером из полимерных труб. Проблемы региональной энергетики. – 2009. – №3.
31. Жуковський С. С. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: навч. посіб. для ВЗО / С. С. Жуковський, В. Й. Лабай. – Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. – 259 с.
32. Закалик Л. Технології для енергоощадного будинку / Л. Закалик // Ринок інсталяцій. – 2010. – № 1-2. – С. 59-63.
33. Золотько К. Є. Розробка методик розрахунку та вибір раціональних параметрів систем теплопостачання з плоскими сонячними колекторами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.04 "Промислова теплоенергетика" / К. Є. Золотько. – Дніпропетровськ, 1998. – 19 с.
34. Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT) : ДСТУ ISO 9806-1:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 56 с. – (Національний стандарт України).
35. Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 2. Кваліфікаційні випробування (ISO 9806-2:1995, IDT) : ДСТУ ISO 9806-2:2005. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с. – (Національний стандарт України).
36. Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995,

IDT) : ДСТУ ISO 9806-3:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с. – (Національний стандарт України).

37. Комбинированная гелиоустановка круглогодичного действия / [О. С. Комилов, М. Р. Назаров, А. Адинаев и др.] // Гелиотехника. – 1991. – № 4. – С. 9-12.

38. Кондратьев К. Я. Актинометрия / К. Я. Кондратьев – Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 690 с.

39. Концов М.М. Солнечные коллекторы с алюминиевым и полимерным абсорберами / М.М. Концов, Ж.Ф. Дорошенко, О.В. Корейша // Труды Одесского политехнического университета, вып. 2(20). – 2003. – С. 1-5.

40. Корчемний М. А. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. А. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.

41. Кувшинов В. В. Комбинированный фотогелиоколлектор с плоскими концентраторами / Кувшинов В. В., Сафонов В. А. // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2009 – С. 124-129.

42. Кудря С. О. Основы конструирования энергоустановок з відновлюваними джерелами енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. М. Головка. – Ніжин : ТОВ Вид-во Аспект-Поліграф, 2005. – 131 с.

43. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.

44. Лантух Н. Н. Комбинированная солнечно-электрическая система теплоснабжения [Электронный ресурс] / Н. Н. Лантух, В. С. Щербатый, Г. Н. Агеева. – 2006. – Режим доступа до матеріалу: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/487/>

45. Ляшенко М. Б. Математическое моделирование и оптимальное проектирование некоторых хозяйственных гелиотехнических систем / М. Б. Ляшенко, Ш. Р. Реджепова. – Ашхабад : Ылым, 1989. – 124 с.

46. Магомедов М. А. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / М. А. Магомедов. – Махачкала: Юпитер, 1996. – 245 с.

47. Максимова Н. А. Енергозберігаючі системи на основі абсорбційних термотрансформаторів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.03 "Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання" / Н. А. Максимова. – Макіївка, 2007. – 19 с.
48. Метод подання даних по сонячній радіації для розрахунку системи сонячного теплопостачання / [Н. А. Швачко, О. В. Приймак, Ю. М. Кольчик та ін.] // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. збірник / гол. ред. Е. С. Малкін. – К. : КНУБА, 2002. – Вип. 4. – С. 85-87.
49. Мисак Й. С. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія / Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 340 с.
50. Мойсеєнко В. В. Системна розробка сонячного колектора для децентралізованого теплопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.03 "Теплопостачання, газопостачання, вентиляція, кондиціонування повітря та освітлення" / В. В. Мойсеєнко – К., 1992. – 17 с.
51. Недбайло А. Н. Использование солнечного коллектора для отопления помещения / А. Н. Недбайло, Н. Е. Ляшенко // Промышленная теплотехника. Т. 35 /. – 2010. – № 4. – С. 66-70.
52. Недбайло А.Н. Экспериментальная установка по исследованию грунтового аккумулирования теплоты // Промышленная теплотехника. Т. 26 /. – 2004. – № 6. – С. 183-185.
53. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії / [О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен та ін.]. – Черкаси : ЧДТУ, 2007. – 483 с.
54. Никифорович Є. І. Моделювання та оптимізація систем теплопостачання будівель з використанням відновлювальних джерел енергії (тепловий насос та сонячний колектор). Розрахунок потоку сонячної радіації / Є. І. Никифорович, М. І. Кідрук // Нова тема. – 2008. – № 2. – С. 11-13.
55. Новаківський Є. В. Підвищення ефективності використання сонячної енергії в комбінованих системах промислового теплопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06

"Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / Є. В. Новаківський. – Одеса, 2004. – 22 с.

56. Новаковский Е. В. Анализ эффективности солнечных коллекторов типа "дельта-система" для альтернативных систем теплоснабжения. / Е. В. Новаковский, А. Е. Денисова, А. С. Мазуренко // Экотехнологии и ресурсосбережение : научно-технический журнал. – 2003. – № 6. – С. 14-17.

57. Одинцов А.Н. Целесообразность использования вертикальных солнечных коллекторов для терморегуляции помещений // Вісник СевДТУ, вип. 97: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. – С.204-209.

58. Одунламі Толулопе. Удосконалення систем опалення шляхом використання пасивного сонячного теплонадходження : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.03 "Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання" / Одунламі Толулопе. – Х., 2007. – 17 с.

59. Озарків І. М. Особливості розрахунку температурних полів у геліосушарці / І. М. Озарків, В. С. Козар // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : зб. наук.- техн. праць / гол. ред. Д. Л. Дудюк. – Львів : ВВ НЛТУ України, 2010. – Вип. 20.10. – С. 58-62.

60. Олексюк А.О. Створення енергоресурсозберігаючих систем геотермального теплопостачання з використанням сонячної енергії та теплових насосів / Олексюк А.О., Челапко С.О., Горделюк А.А. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2011. – №1(12) – С. 143 – 150.

61. Паламарчук О. Ю. Підвищення ефективності використання сонячної енергії за допомогою колекторів з концентраторами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.03 "Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання" / О. Ю. Паламарчук – Х., 2007. – 20 с.

62. Палатник Й. Л. Розробка і дослідження геліосистем з плоскими сонячними колекторами для теплохолодопостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.03 "Холодильна та кріогенна техніка, системи кондиціонування" / Й. Л. Палатник. – О., 1998. – 16 с.

63. Паранчич С. Ю. Використання енергії сонця / С. Ю. Паранчич. – Чернівці: Рута, 2002. – 47 с.
64. Паранчич С. Ю. Відновлювальні джерела енергії / С. Ю. Паранчич. – Чернівці : Рута, 2002. – 68 с.
65. Пасічник П.О. Проблеми застосування повітряних геліосистем/ П.О. Пасічник, О.В. Приймак// Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 6. – К.: КНУБА, 2014 р. – С. 322 - 327.
66. Патент № 103003 UA МПК (2006), F24J 2/26, F24J 2/52. Геліопрофіль / Страшко В.В., Собків Д.І., Головченко В.К. // Промислова власність. – 2006. – № 17.
67. Патент № 111910 UA МПК E04D 13/18 (2014.01), F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/24 (2006.01), F24J 2/46 (2006.01). Система теплопостачання із геліопокрівлею / С.П. Шаповал, О.М. Пона // Промислова власність. – 2016. – № 14; заявл. 10.03.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 14.
68. Патент № 18978 UA МПК F24J 2/00. Сонячний тепловий колектор/ С. Г. Соловьев // Промислова власність. – 2006. – №11.
69. Патент № 2 224 188 Российская Федерация, F24J 2/04. Солнечный коллектор / Б. И. Казанджан, А. М. Масс, А. С. Дьячишин – опубл. 20.02.2004.
70. Патент № 26650 UA МПК (2006), F24J 2/00. Сонячний колектор / Чулков Д. В. // Промислова власність. – 2006. – № 15.
71. Патент № 31494 UA 6 F23J 3/02. Спосіб випробувань сонячних колекторів / К. І. Луданов // Промислова власність. – 2000. – №7.
72. Патент № 34037 UA МПК (2006), C09K 5/00. Рідкий теплоносій для геліоустановок і геліосистем / Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., Руденко О.В. // Промислова власність. – 2008. – № 14.
73. Патент № 38231 UA МПК F24J 2/34 (2008.01). Геліоводонагрівник / О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал // Промислова власність. – 2008. – № 24.

74. Патент № 41789 UA МПК(2009) F24J 2/00. Геліонагрівник / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, О. С. Дацько // Промислова власність. – 2009. – №11.
75. Патент № 42846 UA МПК (2009) F24J 2/00. Сонячний водонагрівач/ В. П. Гончаренко // Промислова власність. – 2009. – №14.
76. Патент № 51760 UA МПК (2009) F24J 2/00 (2010.07). Сонячний колектор / Б. Х. Драганов, А. М. Божок // Промислова власність. – 2010. – №8.
77. Патент № 53370 UA МПК F24J 2/34 (2006.01). Комбінована система сонячного теплопостачання / С. П. Шаповал // Промислова власність. – 2010. – № 19.
78. Патент № 57733 UA МПК (2011) F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/24 (2006.01). Плоский сонячний колектор / А. А. Смердов, О. М. Лисенко, // Промислова власність. – 2011. – № 7.
79. Патент № 73587 UA МПК (2012), F24J 2/00, F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/06 (2006.01). Сонячний колектор / В. А. Істратов, Д. М. Раус // Промислова власність. – 2012. – № 7.
80. Патент № 84945 UA МПК F24J 2/04 (2006.01), F24J 2/24 (2006.01). Сонячний колектор / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона // Промислова власність. – 2013. – № 21; заявл. 02.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.
81. Патент № 92009 UA МПК F24J 2/34 (2006.01). Комбінована система сонячного теплопостачання / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, О.М. Пона // Промислова власність. – 2014. – №14; заявл. 24.02.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.
82. Патент № 92010 UA МПК(2014) F24J 2/00. Гравітаційна геліосистема / В.М. Желих, О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, Б.І Гулай, О.М.Пона // Промислова власність. – 2014. – №14; заявл. 24.02.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.
83. Подгуренко В. С. Нетрадиційні джерела енергії : навч. посіб. / В. С. Подгуренко. – Миколаїв : НУК, 2007. – 116 с.

84. Пона О. М. Вплив прозорого покриття на ефективність геліопокрівлі / О.М. Пона // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, науково-технічний збірник – Вінниця, №2(17), 2014. – с.165-168.

85. Пона О. М. Порівняння ефективності комбінованого сонячного колектора / О. М. Пона, Б. І. Гулай // «Східно-Європейський журнал новітніх технологій, №2/8(74), 2015, с.53-57.

86. Пона О.М. Аналітичне моделювання впливу повітряного потоку на роботу геліоколектора з прозори покриттям / О.М. Пона // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник.- Вип. 18/відповідальний редактор Е.С. Малкін.-К.:КНУБА, 2015.-с. 101-105.

87. Пона О.М. Визначення енергетичних властивостей геліопокрівлі впродовж дня / О.М. Пона, Й.С. Мисак // Вісник інженерної академії України – Випуск 3: Київ, 2016. – с. 257-260.

88. Пона О.М. Ефективність використання сонячного колектора суміщеного з покрівлею будинку в системі сонячного теплопостачання / О.М. Пона, Й.С. Мисак, С.П. Шаповал, О.С. Дацько // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2016. – № 844. – с. 164-168.

89. Пона О.М. Ефективність геліопокрівлі в гравітаційній системі теплопостачання / О.М. Пона, О.Т. Возняк // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сборник научных трудов. Вып. 76. – ГВУЗ ПГАСА. Днепропетровск: ЧМП «Эконномика» 2014. – с. 231-235.

90. Пона О.М. Оцінка економічного ефекту від використання геліопокрівлі / О. М. Пона, О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, М.Є. Касинець // Вісник національного університету водного господарства та природокористування, збірник наукових праць, вип. 1(69) – Рівне, 2015. – с.282-287.

91. Рассемакин Б.М., Хайрмасов С.М., Зарипов В.К., Рассемакин А.Б. Солнечная водонагревательная установка с высокоэффективными типами

коллекторов на основе алюминиевых тепловых труб // Нова тема. – 2010. – №3 (26). – С. 27-29. Возобновляемая энергетика

92. Результаты опытной эксплуатации солнечной установки для подъема и нагрева жидкости / [И. Т. Аладьев, О. С. Дробязгина, В. И. Табаков и др.] // Возобновляемые источники энергии : сб. науч. трудов / под. ред. Б. И. Казанджан. – М. : Московский энергетический институт, 1990. – № 233. – С. 85 - 92.

93. Сацик В.О. Моделювання систем теплопостачання на основі відновлювальних джерел енергії / В.О. Сацик, Б.М. Дідай // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/7 (46). –С. 26-29.

94. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. – М. : ИП РадиоСофт, 2008. – 228 с.

95. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / [Р. Р. Аvezов, М. А. Барский-Зорин, И. М. Васильева и др.]; под ред. Э. В. Сарнацкого, С. А. Чистовича. – М. : Стройиздат, 1990. – 328 с.

96. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – Государственный комитет СССР по делам строительства, 1987. – № 229. – 52 с.

97. Солнечная энергетика / [В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.

98. Сонячний колектор з штампозварним абсорбером / [В. А. Огородник, Б. П. Коробко, О. С. Глущенко и др.] // Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: зб. наук. статей та доповідей VII наук.-практ. конф. Міністерства енергетики України, 31 серпня-5 вересня 1998 р. АР Крим / М-во енергетики України, Держ. ком. України з енергозбереження [та ін.]. – К.: ДНДІ НEE, 1998. – С. 84-86.

99. Страшко В.В. Методика експериментального определения среднеинтегральной температуры теплопоглощающей поверхности

гелиопрофиля ТЕПС // Экотехнологии и ресурсосбережения. – 2005. – №6 – С. 68-71.

100. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробкова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 391 с.

101. Туяхов А. И. Возобновляемые и альтернативные источники энергии : учеб.-метод. пособие для вузов / А. И. Туяхов. – Донецк: Вебер, Донец. отд-ние, 2007. – 184 с.

102. Фаренбрух А. Солнечные элементы : теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб ; пер. с англ. И. Гавриловой, А. Даревского. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 278 с.

103. Фрид С. Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов / С. Е. Фрид. – Москва : ИВТАН АН СССР, 1988. – 57с. – (Препринт № 3-248).

104. Хаврус В., Шелевицкий І.: Забуге право на Сонце, або тепло в Твоїй оселі / В. Хаврус, І.Шелевицкий // Электронный журнал энергосервисной компании "Экологические системы". – 2008. – № 2. – Режим доступа до журн.: http://esco-ecosys.narod.ru/2008_2/art140.htm.

105. Харченко В.В. Режимы работы когенерационного фотоэлектрического теплового модуля / В.В. Харченко, Б.А. Никитин, П.В. Тихонов // Материалы международной научно-технической конференции – Минск, 10-11 октября 2012 г. – Том 3. – С. 72-77.

106. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.

107. Чайковська Є. Є. Техніко-економічна оцінка енергозберігаючої технології комбінованого теплопостачання / Є. Є. Чайковська, Н. Ф. Іщук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/8 (52). – с. 45-48

108. Чорна Н. О. Метод розрахунку оптико-геометричних параметрів «зональних» фоклінів. / Світлотехніка та електроніка. – №2. – 2011 – С. 43-49.

109. Шаповал С. П. Ефективність "дельта-системи" плоских сонячних колекторів за різних кутів їх встановлення / С. П. Шаповал // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"]. – Л. : В-во НУ "ЛП", 2010. – № 664. – С. 331-335.

110. Шаповал С. П. Ефективність геліоустановки за різних кутів падіння теплового потоку на сонячний колектор / С. П. Шаповал // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. праць / гол. ред. Д. Л. Дудюк. Вип. 19.6. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2009. – С. 117-120.

111. Шаповал С. П. Ефективність системи тепlopостачання на основі сонячного колектора при зміні кута надходження теплового потоку / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, О. С. Дацько // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"]. – Л. : В-во НУ "ЛП", 2009. – № 655. – С. 299-302.

112. Шаповал С. П. Підвищення ефективності комбінованих геліонагрівників / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: матеріали III Міжнародної конференції молодих учених ГАС-2010, 25-27 листопада 2010 р. – Л.: В-во НУ "ЛП", 2010. – С. 116-117.

113. Шаповал С.П. Вплив кута падіння теплового потоку на ефективність роботи геліоустановки // С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, М. Є. Янів // Міжнародна науково-технічна конференція ГАС. – 14-16 травня 2009. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 2009. – С. 111-112.

114. Швачко Н. А. Геліоколектори - концентратори для систем сонячного опалення / Н. А. Швачко, Н. О. Чорна // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник / гол. ред. Е. С. Малкін. – К. : КНУБА, 2007. – Вип. 11. – С. 89-95.

115. Швец Е. Я. Технологии и материалы солнечной энергетики / Е. Я. Швец. – Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2007. – 240 с.
116. Шнерх О. С. Підвищення ефективності геліосистем теплопостачання дискретною орієнтацією сонячних колекторів: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 11.00.11 "Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів" / О. С. Шнерх.–К., 1994.– 165 с.
117. Щербина О. М. Энергия для всех / О. М. Щербина. – Ужгород : Вид. В. Падяка, 2007. – 340 с.
118. Энергосбережение в Украине (оборудование, материалы, услуги): справочник / [под ред. Гололобова О. И.]. – К., 2000. – 252 с.
119. Duffie J. A. Solar engineering of thermal processes. Second Edition / John A. Duffie, William A. Beckman. – NY : A Wiley-Interscience Publication, 1980. – 919 p.
120. Fabio Struckmann. Analysis of a Flat-plate Solar Collector. – Heat and Mass Transport. – Lund, Sweden. – 2008. – P. 4.
121. Freris L. Renewable Energy in Power Systems / Freris L, Infield D. – UK : A John Wiley & Sons, Ltd, Publication. – 2008. – 284 p.
122. Hantula R. Science in the Real World: How Do Solar Panels Work? / Hantula R. – NY : Chelsea House Publishers, 2010. – 32 p.
123. ISO 9060:1990 Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.
124. ISO 9459-1:1993 Solar heating – Domestic water heating systems – Part 1 : Performance rating procedure using indoor test methods.
125. ISO 9806-2 Test methods for solar collectors – Part 2 : Qualification test procedures.
126. ISO 9806-3 Test methods for solar collectors – Part 3 : Thermal performance of unglazed liquid heating collectors (sensible heat transfer only) including pressure drop.

127. Julian Chen. *Physics of Solar Energy*// JOHN WILEY & SONS, INC. – New Jersey. – 2011. – P. 312.
128. Kolektorz Słoneczne : energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle / [G. Wiśniewski, S. Gołębiowski, M. Grzciuk and other]. – Warszawa : Medium, 2008. – 201 s.
129. Lorenz P. The economics of solar power / P. Lorenz, D. Pinner, T. Seitz. – *The McKinsey Quarterly*, June 2008. – P. 19.
130. Maczulak A. E. *Renewable energy : Sources and Methods* / Anne Maczulak. – NY : Infobase Publishing, 2010. – 206 p.
131. Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan. Review of solar air collectors with thermal storage units// *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15. – 2011. – Pp. 1476–1490.
132. Mamlok R. A. Programmable Logic Controller to Control Two Axis Sun Tracking System / Rustom Mamlok, Salem Nijmeh, Salah M. Abdallah // *Information Technology Journal*. – 2006. – № 5 (6). – P. 1083-1087.
133. Mohamad Kharsef. Energy Balance of Solar Collector// Lulela University of Technology. – 2012. – Pp. 27.
134. Mysak Y. Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research / Y. Mysak, O. Pona, S. Shapoval, M. Kuznetsova, T. Kovalenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №3/8(87), 2017, c.26-32.
135. *Ogrzewnictwo : podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji budynków* / [pod. red. Haliny Kocyzk]. – Poynañ : Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2000. – 268 s.
136. Perers B. Dynamic method of solar collector testing // *Solar Energy Engng* 2.P.1149-1154, 1992.
137. Piotrowski R. *Katalog Projektów Domów Pasywnych i Energooszczędnych* / Ryszlan Piotrowski. – Warszawa, 2006. – № 1 (1). – 71 s.
138. Pluta Z. *Słoneczne instalacje energetyczne* / Z. Pluta. – Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007. – 246 s.

139. Renewables Global Status Report. – Paris: Global Status Report, 2009. – 32 p.
140. Śliwowski L. Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach / Lech Śliwowski. – Wrocław : Oficyna Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, 2000. – 128 s.
141. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning / [Mejdi Hazami, Sami Kooli, Meriam Lazaar, Abdelhamid Farhat, Ali Belghith] // American Journal of Environmental Sciences. – 2005. – № 1 (4). – P. 270-277.
142. Voznyak O. Effectiveness of helioroof with the top location of pipes of circulation contour / O. Voznyak, O. Pona, S. Shapoval // Teoretická a experimentálna analýza sústav techniky prostredia v súvislosti s ich mikrobiologickým znečistením pri efektívnom využití obnoviteľných zdrojov. Nekonferenčný zborník vedeckých prác - VEGA 1/0748/11.– Košice, 2014. – s. 339-343.
143. Voznyak O. Efficiency of Solar roof with transparent cover for heating supply of buildings / O. Voznyak, O. Pona, S. Shapoval, M. Kasynets // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Construction of optimized energy potential. – Częstochowa, 2014. – 2(14), s. 117-124.
144. Voznyak O. Method of determining the efficiency of heliocollector in system with forced circulation of coolant / O. Voznyak, O. Pona, A. Eltman, S. Shapoval, N. Spodyniuk // Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 7-К: КНУБА, 2015. – с. 10-16.
145. Vožnyak O. Rise of use effectiveness of solar energy in annual solar systems / O. Vožnyak, S. Shapoval, O. Dacko // Budownictwo i inżynieria środowiska. – Rzeszow, 2009. – S. 91-98.
146. Voznyak O. Vplyv prúdenia vzduchu na energetickú účinnosť solárneho kolektora / O. Vožnyak, O. Pona, S. Shapoval, P. Kapalo // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2014. – № 3.– s. 14-15.

147. Vožnyak O. Zvýšenie efektívnosti využívania plošných slnečných kolektorov / O. Vožnyak, V. Zelich, S. Shapoval // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2010. – № 1. – S. 8-9.

148. Zhelykh V. Perspectives of using heliosystems and their research in solar heating system / V. Zhelykh, O. Pona, A. Eltman, S. Shapoval // XV International Scientific Conference: Current issues of civil and environmental engineering and architecture, Rzeszów – Lviv – Kosice, 9-10 September 2015.- c. 1-8.

ДОДАТКИ

Додаток А

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ГЕЛІОПОКРІВЛЕЮ

```
# -*- coding: utf-8 -*-

from __future__ import division
import sys, os
import datetime as dt
import math

from PyQt4 import __path__ as pyqt_path
from PyQt4 import QtCore, QtGui

from controls import ChMColors, HStaticLine, GChNumLabel, GChNumEdit, \
    GChGraphWidget, toolbar_type, ChStaticMplCanvas

import locale
locale.setlocale(locale.LC_ALL, "")
#
=====
=====
class SolarRoof(QtGui.QWidget):
# -----
    def __init__(self, parent=None):
        super(SolarRoof, self).__init__(parent=parent)

        main_vbox = QtGui.QVBoxLayout(self)
        main_splitter = QtGui.QSplitter(QtCore.Qt.Vertical, self)
        main_splitter.setStyle(QtGui.QStyleFactory.create('Cleanlooks'))
        self.__calc_controls_widget = QtGui.QWidget(main_splitter)
        main_vbox.addWidget(main_splitter)
        main_vbox.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
        calc_vbox = QtGui.QVBoxLayout(self.__calc_controls_widget)
        #main_grid = QtGui.QGridLayout(self)
        #main_grid.setSizeConstraint(QtGui.QLayout.SetFixedSize)

        self.__new_calcButton = QtGui.QPushButton(u'Новий розрахунок')
        self.__new_calcButton.clicked.connect(self.create_calc)
        calc_vbox.addWidget(self.__new_calcButton, alignment=QtCore.Qt.AlignBottom)
        #main_grid.addWidget(self.__new_calcButton, 0, 0, 1, 2)
```

```

main_splitter.addWidget(self.__calc_controls_widget)
tableTabWidget = QtGui.QTabWidget(self)
#tableTabWidget.setFixedHeight(400)

self.__out_content = dict()

header_1 = [u'Час,\nгод', u'\u03C4', u'\u03B1\u00B4', u'\u03B7_o',
            u'Q,\nМДж/(м кв.\u00B7mic)', u'\u03C6, \u00B0', u'm,\nднів',
            u'\u03B4, \u00B0', u'E_p,\nДж/(м кв.\u00B7год)', u'K_я',
            u'\u03B3, \u00B0', u'\u03C9_з', u'R_п', u'R',
            u't_вх,\n\u00B0C', u't_з,\n\u00B0C', u'P', u'E,\nВт/м кв.',
            u'E_г,\nВт/м кв.', u'\u03B1, \u00B0', u'\u03B2, \u00B0',
            u'K_эф', u'q_г,\nВт/м кв.', u'K_г,\nВт/(м кв.\u00B7К)',
            u'F, м кв.', u'Q_г, Вт']

header_2 = header_1[:]; header_2.pop(2)

for coating in ('opaque', 'transparent'):
    outdataSplitter = QtGui.QSplitter(QtCore.Qt.Horizontal, tableTabWidget)
    outdataSplitter.setStyle(QtGui.QStyleFactory.create('Cleanlooks'))
    outdataSplitter.setAutoFillBackground(True)

    contentWidget = QtGui.QWidget(outdataSplitter)
    vbox = QtGui.QVBoxLayout(contentWidget)
    #vbox.setMargins(0, 0, 0, 0)

    tView = QtGui.QTableView(contentWidget)
    #print tView.selectionBehavior
    tView.setSelectionBehavior(QtGui.QAbstractItemView.SelectRows)
    tView.setAlternatingRowColors(True)
    vbox.addWidget(tView)

    self.__remove_currowButton = QtGui.QPushButton(u'Видалити виділений запис')
    self.__remove_currowButton.hide()
    #self.__remove_currowButton.clicked.connect(self.removeSelectedRow)
    vbox.addWidget(self.__remove_currowButton)

    outdataSplitter.addWidget(contentWidget)

    graphWidget = GChGraphWidget(ChStaticMplCanvas(),
                                  toolbar=toolbar_type.NAVIGATION_TOOLBAR, parent=outdataSplitter)
    outdataSplitter.addWidget(graphWidget)

    self.__out_content[coating] = ([], tView, graphWidget.canvas)

    palette = outdataSplitter.palette()

```

```

if coating == 'opaque':
    tView.setModel(CalcTableModel([[u" for h in header_2],],
                                header_2, tView))
    palette.setColor(QtGui.QPalette.Background, QtGui.QColor('#ffd685'))
    #outdataSplitter.setStyleSheet(ur'QSplitter {background-color: ;}')
    tableTabWidget.addTab(outdataSplitter,
                           u'Геліопокрівля з непрозорим покриттям')
if coating == 'transparent':
    tView.setModel(CalcTableModel([[u" for h in header_1],],
                                header_1, tView))
    palette.setColor(QtGui.QPalette.Background, QtGui.QColor('#b8e6b8'))
    #outdataSplitter.setStyleSheet(ur'QSplitter {background-color: #b8e6b8;}')
    tableTabWidget.addTab(outdataSplitter,
                           u'Геліопокрівля з прозорим покриттям')

tView.resizeColumnsToContents()
outdataSplitter.setPalette(palette)

#main_grid.addWidget(tableTabWidget, 3, 0, 1, 2)
main_splitter.addWidget(tableTabWidget)

self.setWindowTitle(u'Розрахунок параметрів системи сонячного \
теплопостачання з геліопокрівлею')
# -----
def create_calc(self):

    self.__newCalcWidget = NewCalcWidget(self)

self.__areaWidget = QtGui.QScrollArea(self)
#self.__areaWidget.setHorizontalScrollBarPolicy(QtCore.Qt.ScrollBarAlwaysOff)
self.__areaWidget.setWidgetResizable(True)
self.__areaWidget.setMinimumHeight(200)
self.__areaWidget.setWidget(self.__newCalcWidget)
self.__areaWidget.setMinimumWidth(self.__newCalcWidget.frameSize().width()+\
self.__areaWidget.verticalScrollBar().width())

self.__calc_controls_widget.layout().addWidget(self.__areaWidget)
#self.layout().addWidget(self.__areaWidget, 1, 0, 1, 2)

self.__new_calcButton.hide()
self.__add_tableButton = QtGui.QPushButton(u'Додати в таблицю')
self.__newCalcWidget.calcCompletedEvent[bool].connect(
    self.__add_tableButton.setEnabled)
self.__add_tableButton.setEnabled(self.__newCalcWidget.isCalcSuccessfully())
self.__add_tableButton.clicked.connect(self.add_record)

```

```

self.__calc_controls_widget.layout().addWidget(self.__add_tableButton)
#self.layout().addWidget(self.__add_tableButton, 2, 0, 1, 2)
# -----
def removeSelectedRow(self):

    cover_type = str(self.__newCalcWidget.activeCoverType())
    content_list, content_tView, content_graph = self.__out_content[cover_type]
    print dir(content_tView)
    #content_list.remove()
    # -----

def data_table(self, data, header):
    self.__tdata_model = CalcTableModel(data, header,
                                       self.__dataTableView)
    self.__dataTableView.setModel(self.__tdata_model)
    self.__dataTableView.resizeColumnsToContents()

    self.__graphMplCanvas.to_plot(data, header)
# -----
def add_record(self):
    data = self.__newCalcWidget.values()
    cover_type = str(self.__newCalcWidget.activeCoverType())
    content_list, content_tView, content_graph = self.__out_content[cover_type]
    content_list.append(data)
    header_names = content_tView.model().headerColumnNames()
    content_tView.setModel(CalcTableModel(content_list, header_names,
                                       content_tView))
    content_tView.resizeColumnsToContents()

    if cover_type == 'opaque':
        cover_type_title = u'з непрозорим покриттям'
    elif cover_type == 'transparent':
        cover_type_title = u'з прозорим покриттям'
    content_graph.to_plot([(d[0], d[-1]) for d in content_list],
                        [header_names[-1]],
                        cover_type_title)

self.__calc_controls_widget.layout().removeWidget(self.__newCalcWidget)
self.__newCalcWidget.deleteLater()
self.__calc_controls_widget.layout().removeWidget(self.__areaWidget)
self.__areaWidget.deleteLater()
self.__calc_controls_widget.layout().removeWidget(self.__add_tableButton)
self.__add_tableButton.deleteLater()

self.__new_calcButton.show()

```

```

#
=====
=====
class NewCalcWidget(QtGui.QWidget):

    calcCompletedEvent = QtCore.pyqtSignal([bool], name='calcCompletedEvent')
    # -----
    def isCalcSuccessfully(self):
        return self.__isCalcSuccessfully
    # -----
    def activeCoverType(self):
        return self.__selected_cover_type
    # -----
    def cover_typeChanged(self, event):
        self.__selected_cover_type = self.sender().itemData(self.sender().\
            currentIndex()).toString()

        if self.__selected_cover_type == 'opaque':
            self.__prime_alphaGChNumEdit.setEnabled(False)
        if self.__selected_cover_type == 'transparent':
            self.__prime_alphaGChNumEdit.setEnabled(True)

        self.calculation()
    # -----
    def __init__(self, parent):
        super(NewCalcWidget, self).__init__(parent=parent)

        self.__isCalcSuccessfully = False

        main_flt = QtGui.QFormLayout(self)

        self.__hourGChNumEdit = GChNumEdit()
        main_flt.addRow(u'Час розрахунку, год:', self.__hourGChNumEdit)

        self.__cover_typeComboBox = QtGui.QComboBox()
        self.__cover_typeComboBox.addItem(u'з покриттям', 'transparent')
        self.__cover_typeComboBox.addItem(u'без покриття', 'opaque')

    self.__cover_typeComboBox.currentIndexChanged[int].connect(self.cover_typeChanged)
        main_flt.addRow(u'Наявність світлопрозорого захищення:',
            self.__cover_typeComboBox)

        self.__tauGChNumEdit = GChNumEdit()
        self.__tauGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
        main_flt.addRow(u'Коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання \
прозорим покриттям, <font size="+2">&tau;</font>:', self.__tauGChNumEdit)

```

```

self.__prime_alphaGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__prime_alphaGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання \
теплопоглиначем, <font size="+2">&alpha;&prime;</font>:',
self.__prime_alphaGChNumEdit)

```

```

self.__Q_hor_earthGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__Q_hor_earthGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Кількість сонячної енергії, яка поступає на \
горизонтальну поверхню на землі за місяць, <font size="+2">Q</font>, \
МДж&frac!;(м<sup>2</sup>&sdot;міс):', self.__Q_hor_earthGChNumEdit)

```

```

self.__phiGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__phiGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Широта місцевості, <font size="+2">&phi;</font>, \
&deg;пн.ш.:', self.__phiGChNumEdit)

```

```

self.__monthGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__monthGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Розрахунковий місяць:', self.__monthGChNumEdit)

```

```

self.__E_rGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__E_rGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Кількість розсіяного сонячного випромінювання, \
яка поступає на горизонтальну поверхню, <font size="+2">E<sub>p</sub></font>, \
МДж&frac!;(м<sup>2</sup>&sdot;год):', self.__E_rGChNumEdit)

```

```

self.__t_inGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__t_inGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Температура теплоносія на вході в геліопокрівлю, \
<font size="+2">t<sub>вх</sub></font>, &deg;C:', self.__t_inGChNumEdit)

```

```

self.__t_zGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__t_zGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Температура зовнішнього повітря, \
<font size="+2">t<sub>з</sub></font>, &deg;C:', self.__t_zGChNumEdit)

```

```

self.__E_GChNumEdit = GChNumEdit()
self.__E_GChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
main_flt.addRow(u'Сумарна кількість сонячної енергії, яка поступає \
на горизонтальну поверхню геліопокрівлі за годину, <font size="+2">E</font>, \
Вт&frac!;м<sup>2</sup>:', self.__E_GChNumEdit)

```

```

self.__alphaGChNumEdit = GChNumEdit()
self.__alphaGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)

```



```

    main_flt.addRow(u'кут падіння теплового потоку по горизонталі, \
<font size="+2">&alpha;</font>, &deg;:', self.__alphaGChNumEdit)

    self.__betaGChNumEdit = GChNumEdit()
    self.__betaGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
    main_flt.addRow(u'Кут падіння теплового потоку по вертикалі, \
<font size="+2">&beta;</font>, &deg;:', self.__betaGChNumEdit)

    self.__F_GChNumEdit = GChNumEdit()
    self.__F_GChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
    main_flt.addRow(u'Площа поверхні геліопокрівлі, <font size="+2">F</font>, \
м<sup>2</sup>:', self.__F_GChNumEdit)

    self.__K_gGChNumEdit = GChNumEdit()
    self.__K_gGChNumEdit.valueChanged[float].connect(self.calculation)
    main_flt.addRow(u'Загальний коефіцієнт тепловтрат геліопокрівлі, \
<font size="+2">K<sub>г</sub></font>, Вт&fracl;(м<sup>2</sup>&sdot;K):',
    self.__K_gGChNumEdit)

    main_flt.addRow(HStaticLine(self))

    self.__eta_roofGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
    main_flt.addRow(u'Оптичний ККД геліопокрівлі з прозорим покриттям, \
<font size="+2">&eta;<sub>о</sub></font>:', self.__eta_roofGChNumLabel)

    self.__K_jGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
    main_flt.addRow(u'Коефіцієнт ясності, <font size="+2">K<sub>я</sub></font>:',
    self.__K_jGChNumLabel)

    self.__mGChNumLabel = GChNumLabel('%d')
    main_flt.addRow(u'Порядковий номер дня в році станом на 15 число \
кожного місяця, <font size="+2">m</font>:', self.__mGChNumLabel)

    self.__deltaGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
    main_flt.addRow(u'Схилення Сонця в середній день місяця, \
<font size="+2">&delta;</font>, &deg;:', self.__deltaGChNumLabel)

    self.__gammaGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
    main_flt.addRow(u'Кут нахилу геліопокрівлі, <font size="+2">&gamma;</font>, \
&deg;:', self.__gammaGChNumLabel)

    self.__omega_zGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
    main_flt.addRow(u'Часовий кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної \
поверхні, <font size="+2">&omega;<sub>з</sub></font>, &deg;:',
    self.__omega_zGChNumLabel)

```

```

self.__R_pGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого \
сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню, \
<font size="+2">R<sub>п</sub></font>:', self.__R_pGChNumLabel)

self.__R_GChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Відношення середньомісячної денної кількості сонячної \
радіації, яка надходить на горизонтальну та похилу поверхню, \
<font size="+2">R</font>:', self.__R_GChNumLabel)

self.__P_GChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Параметр, <font size="+2">P</font>:', self.__P_GChNumLabel)

self.__E_gGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Кількість сонячної енергії, яка поступає \
на 1 м<sup>2</sup> площі геліопокрівлі за годину, <font
size="+2">E<sub>г</sub></font>, \
Вт&frac;м<sup>2</sup>:', self.__E_gGChNumLabel)

self.__K_efGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Коефіцієнт ефективності геліопокрівлі, \
<font size="+2">K<sub>еф</sub></font>:', self.__K_efGChNumLabel)

self.__qGChNumLabel = GChNumLabel('% .2f')
main_flt.addRow(u'Питома теплопродуктивність геліопокрівлі, \
<font size="+2">q<sub>г</sub></font>, Вт&frac;м<sup>2</sup>:',
self.__qGChNumLabel)

self.__Q_gGChNumLabel = GChNumLabel('% d')
main_flt.addRow(u'Теплова потужність геліопокрівлі, \
<font size="+2">Q<sub>г</sub></font>, Вт:', self.__Q_gGChNumLabel)

self.__cover_typeComboBox.setCurrentIndex(1)
# -----
def values(self):
data = [self.__hourGChNumEdit.value(), self.__tauGChNumEdit.value(),
self.__eta_roofGChNumLabel.value(), self.__Q_hor_earthGChNumEdit.value(),
self.__phiGChNumEdit.value(), self.__mGChNumLabel.value(),
self.__deltaGChNumLabel.value(), self.__E_rGChNumEdit.value(),
self.__K_jGChNumLabel.value(), self.__gammaGChNumLabel.value(),
self.__omega_zGChNumLabel.value(), self.__R_pGChNumLabel.value(),
self.__R_GChNumLabel.value(), self.__t_inGChNumEdit.value(),
self.__t_zGChNumEdit.value(), self.__P_GChNumLabel.value(),
self.__E_GChNumEdit.value(), self.__E_gGChNumLabel.value(),
self.__alphaGChNumEdit.value(), self.__betaGChNumEdit.value(),
self.__K_efGChNumLabel.value(), self.__qGChNumLabel.value(),

```

```

        self.__K_gGChNumEdit.value(),self.__F_GChNumEdit.value(),
        self.__Q_gGChNumLabel.value()]

if self.__selected_cover_type == 'transparent':
    data.insert(2, self.__prime_alphaGChNumEdit.value())

return data
# -----
def calculation(self):
    ur""Розрахунок значень
    ""
    try:

        #cover_type = self.__cover_typeComboBox.itemData(
        # self.__cover_typeComboBox.currentIndex()).toString()
        #self.__calc_hour = self.__hourGChNumEdit.value()
        tau = self.__tauGChNumEdit.value()
        if self.__selected_cover_type == 'opaque':
            eta_o = tau
        elif self.__selected_cover_type == 'transparent':
            prime_alpha = self.__prime_alphaGChNumEdit.value()
            eta_o = tau * prime_alpha

        self.__eta_roofGChNumLabel.setNum(eta_o)

        Q_hor_earth = self.__Q_hor_earthGChNumEdit.value()
        K_j = Q_hor_earth / 1353
        self.__K_jGChNumLabel.setNum(K_j)
            phi = self.__phiGChNumEdit.value()
            rad = 180 / math.pi

        m_values = (15, 46, 74, 105, 135, 166, 196, 227, 258, 288, 319, 349)
        delta_x = lambda m_x: 23.5*math.sin((284+m_x)/365*360/rad)
        delta_m = sum([delta_x(m_x) for m_x in m_values[2:10]]) / 8

        month = int(self.__monthGChNumEdit.value())
        m = m_values[month-1]
        self.__mGChNumLabel.setNum(m)

        delta = delta_x(m)
        self.__deltaGChNumLabel.setNum(delta)

        gamma = phi - delta_m
        self.__gammaGChNumLabel.setNum(gamma)

        omega_z_1 = rad * math.acos(-math.tan(phi/rad)*math.tan(delta/rad))

```

```

omega_z_2 = rad * math.acos(-math.tan((phi-gamma)/rad)*\
    math.tan(delta/rad))
omega_z = min(omega_z_1, omega_z_2)
self.__omega_zGChNumLabel.setNum(omega_z)

R_p = (math.cos((phi-gamma)/rad)*math.cos(delta/rad)*\
    math.sin(omega_z/rad) + omega_z/rad*\
    math.sin((phi-gamma)/rad)*math.sin(delta/rad)) / \
    (math.cos(phi/rad)*math.cos(delta/rad)*math.sin(\
    omega_z/rad) + omega_z/rad*math.sin(\
    phi/rad)*math.sin(delta/rad))
self.__R_pGChNumLabel.setNum(R_p)

E_r = self.__E_rGChNumEdit.value()
rho = 0.2 if 3 < month < 11 else 0.7

R = (1-E_r/Q_hor_earth)*R_p + E_r/Q_hor_earth*\
    (1+math.cos(gamma/rad))/2 + rho*(1+math.cos(\
    gamma/rad))/2
self.__R_GChNumLabel.setNum(R)

t_in = self.__t_inGChNumEdit.value()
t_z = self.__t_zGChNumEdit.value()

P = (t_in - t_z) / K_j
self.__P_GChNumLabel.setNum(P)

E = self.__E_GChNumEdit.value()
E_g = R * E
self.__E_gGChNumLabel.setNum(E_g)

alpha = self.__alphaGChNumEdit.value()
beta = self.__betaGChNumEdit.value()

#print E_g, beta, alpha

if self.__selected_cover_type == 'opaque':
    K_ef = (0.3588-0.0001*E_g) + (-0.0007+8.5*10**(-6)*E_g)*\
        beta + (0.0003+1.1667*10**(-6)*E_g)*alpha + \
        (3.75*10**(-5)-4.1667*10**(-8)*E_g)*beta*\
        alpha
elif self.__selected_cover_type == 'transparent':
    K_ef = (0.4413-0.0002*E_g) + (-0.0006+7.1667*10**(-6)*E_g)*\
        beta + (-0.0016+7*10**(-6)*E_g)*alpha + \
        (4.0001*10**(-5)-7.7778*10**(-8)*E_g)*beta*\

```

alpha

```
if K_ef > 1.0: K_ef = 1.0
self.__K_efGChNumLabel.setNum(K_ef)
```

```
a = 10.7*10**(-3); b = 29.3*10**(-6)
q_g = E_g*eta_o*(1-a*P + b*P**2)*K_ef
self.__qGChNumLabel.setNum(q_g)
```

```
K_g = self.__K_gGChNumEdit.value()
F = self.__F_GChNumEdit.value()
Q_g = F*(E_g*eta_o - K_g*(t_in-t_z))
self.__Q_gGChNumLabel.setNum(Q_g)
```

```
self.calcCompletedEvent[bool].emit(True)
self.__isCalcSuccessfully = True
```

```
except Exception as err:
self.calcCompletedEvent[bool].emit(False)
self.__isCalcSuccessfully = False
```

```
for numLabel in self.children():
    if isinstance(numLabel, GChNumLabel): numLabel.error()
# print err
#self.incorect()
```

#

```
=====
class CalcTableModel(QQtCore.QAbstractTableModel):
```

```
# -----
def __init__(self, data, header, parent=None, *args):
    super(CalcTableModel, self).__init__(parent, *args)
    self.__data = data
    self.__header = header
```

```
# -----
def headerColumnNames(self):
    return self.__header
# -----
```

```
def rowCount(self, parent):
    return len(self.__data)
# -----
```

```
def columnCount(self, parent):
    return len(self.__data[0])
# -----
```

```
def data(self, index, role):
    if not index.isValid():
        return QtCore.QVariant()
```

```

#elif role == QtCore.Qt.BackgroundColor:
#   if index.column() % 2 == 0:
#       return QtGui.QBrush(QtGui.QColor(255, 255, 255))
#   else:
#       return QtGui.QBrush(QtGui.QColor(255, 255, 225))

elif role == QtCore.Qt.ForegroundColor:
    return QtGui.QColor(ChMColors.get_color_(index.column()))

elif role == QtCore.Qt.TextAlignmentRole:
    return QtCore.Qt.AlignCenter
elif role != QtCore.Qt.DisplayRole:
    return QtCore.QVariant()

return QtCore.QVariant(self.__data[index.row()][index.column()])
# -----
def headerData(self, index, orientation, role):
    if orientation == QtCore.Qt.Horizontal and role == QtCore.Qt.DisplayRole:
        return QtCore.QVariant(self.__header[index])
    if orientation == QtCore.Qt.Vertical and role == QtCore.Qt.DisplayRole:
        return QtCore.QVariant(index+1)

# print column.data(QtCore.Qt.UserRole).isValid()

if role == QtCore.Qt.ForegroundColor and orientation == QtCore.Qt.Horizontal:
    return QtGui.QColor(ChMColors.get_color_(index))
#for n in xrange(SENSORS_MAX_COUNT):
#   if column == n + 3:
#       pass#return QtGui.QColor(*M_COLORS[n])
    return QtCore.QVariant()
#
=====
if __name__ == '__main__':
    app = QtGui.QApplication(sys.argv)
    translator = QtCore.QTranslator()
    for pth in pyqt_path:
        if sys.exec_prefix in pth and 'site-packages' in pth:
            # Завантаження українського перекладу для стандартних системних
            # назв Qt.
            translator.load(u'qt_uk')#, os.path.join(pth , u'translations'))
            break
    app.installTranslator(translator)
    app.setWindowIcon(QtGui.QIcon(u'refresh-icon2.png'))
    main_window = SolarRoof()
    main_window.show()
    sys.exit(app.exec_())

```

Затверджую

Директор НВ ТзОВ «Кокер»
Ч. В. Солоха

« 25 » квітня 2015 р.



Акт

впровадження системи сонячного енергопостачання із використанням
геліопокрівлі

У НВ ТзОВ «Кокер» прийнято до впровадження результати досліджень аспіранта кафедри «Теплогазопостачання і вентиляції» Національного університету «Львівська політехніка» Пони Остапа Мироновича, спрямовані на зменшення енерговитрат на технологічний процес формування і сушіння кахлів пічних.

Використання розробок автора дозволяє отримати додаткову теплову енергію за рахунок сонячної радіації та, відповідно, знизити витрати, пов'язані із технологічним процесом, а також збільшує оборотність використання гіпсових форм для формування виробів.

Застосування розробленої системи сонячного енергопостачання із використанням геліопокрівлі, в умовах виробничої діяльності НВ ТзОВ «Кокер» дозволило на 25% зменшити енерговитрати на сушіння кахлів пічних.

Технічний директор

Рокита І. П.

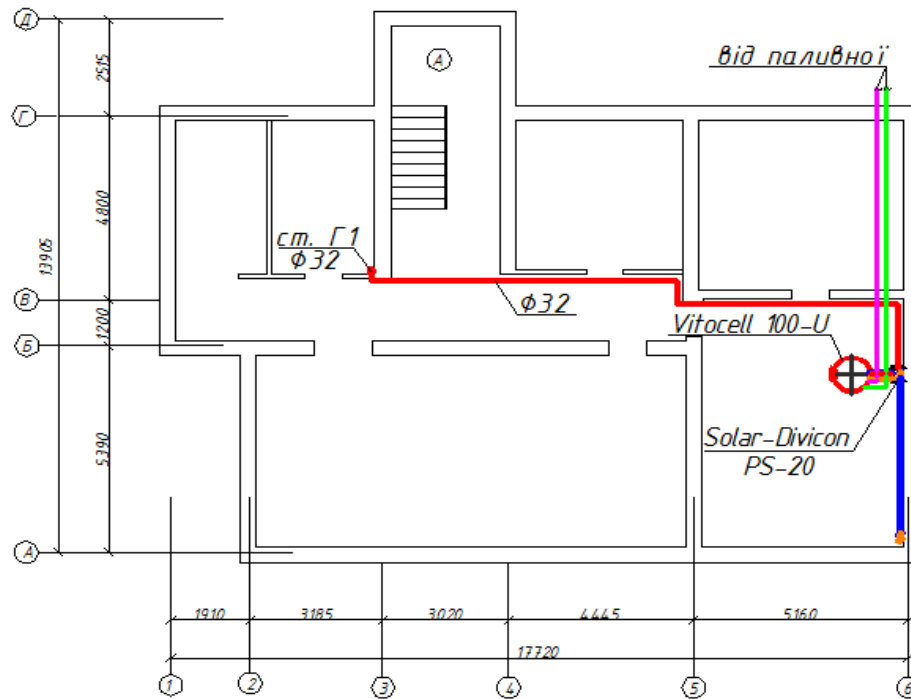
Начальник керамічного цеху

Стацак Р. В.

ПЛАНИ ГРОМАДСЬКОГО БУДИНКУ

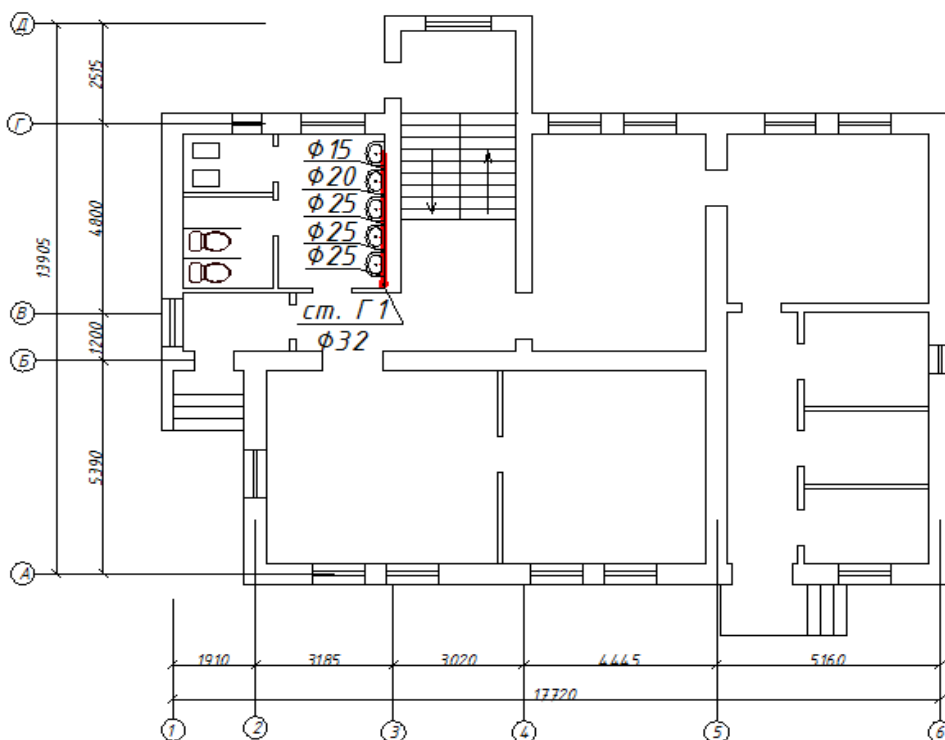
План на відм. -2.50

М 1:100

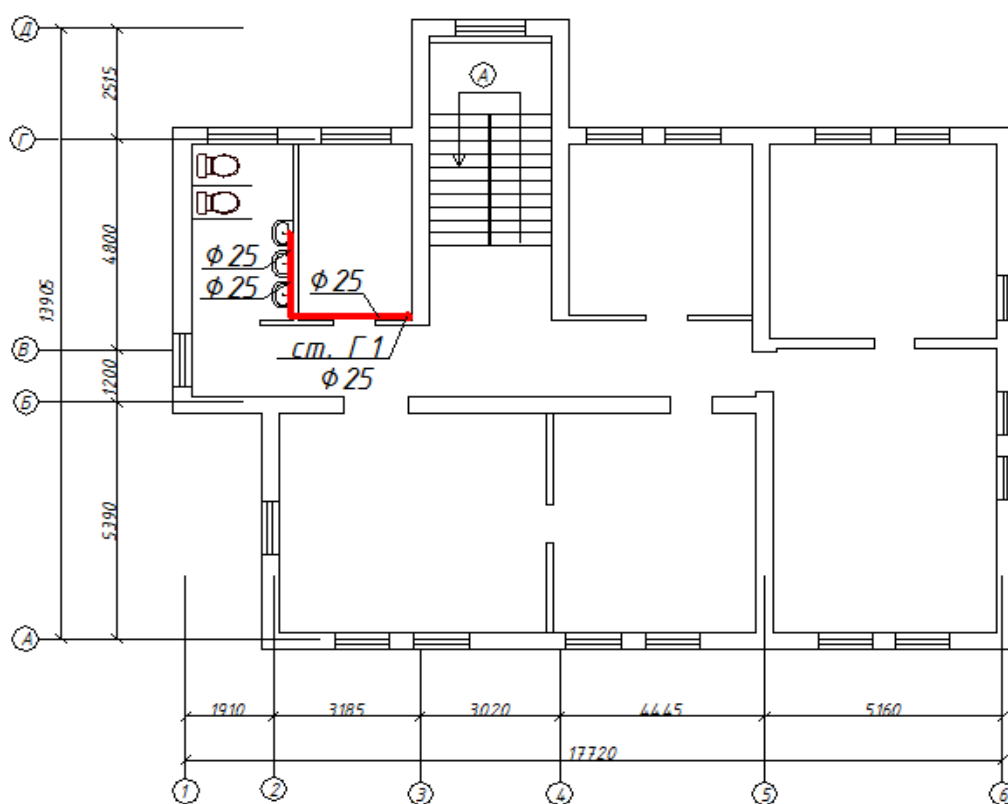


План на відм. 0.00

М 1:100



План на відм. 3.00
М 1:100



План даху
М 1:100

