

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису

ПАСІЧНИК ПАВЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 696.3; 697.5

**СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З КОМБІНОВАНИМ СОНЯЧНО-
ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОВІТРОПІДГРІВАЧЕМ**

05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Приймак Олександр Вікторович

Київ – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ПОВІТРЯНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ	
1.1 Аналіз існуючих систем.....	12
1.2 Методики розрахунку систем	16
1.3 Огляд сучасних сонячних повітропідігрівачів	19
1.4 Аналіз відомих конструкцій сонячних повітропідігрівачів та шляхи їх удосконалення.....	23
1.5 Система теплопостачання з комбінованим сонячно- електричним повітропідігрівачем	28
1.6 Висновки.....	33
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ, АЕРОДИНАМІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБІНОВАНОГО СОНЯЧНО- ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОВІТРОПІДІГРІВАЧА	
2.1 Комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач.....	34
2.2 Удосконалена фізична модель процесів теплообміну в повітропідігрівачі.....	40
2.3 Побудова математичної моделі процесів теплообміну в повітропідігрівачі	43
2.4 Теплові характеристики повітропідігрівача.....	48

2.5	Аеродинамічні характеристики повітропідігрівача з абсорбером із трикотажного полотна.....	57
2.6	Електротехнічні характеристики абсорбера із трикотажного полотна.....	61
2.5	Висновки.....	62
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ, АЕРОДИНАМІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБІНОВАНОГО СОНЯЧНО-ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОВІТРОПІДІГРІВАЧА		
3.1	Опис комплексного експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень	64
3.2	Експериментальне дослідження поглинаючої здатності вуглеграфітового трикотажного полотна	71
3.3	Експериментальне дослідження теплообміну між вуглеграфітовим трикотажним полотном та повітрям, що його омиває	75
3.4	Експериментальне визначення аеродинамічних характеристик повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна	92
3.5	Експериментальне визначення питомого електричного опору вуглеграфітового трикотажного полотна	97
3.6	Висновки.....	99
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З КОМБІНОВАНИМ СОНЯЧНО-ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОВІТРОПІДІГРІВАЧЕМ		
4.1	Використання комбінованого сонячно-електричного	

повітропідігрівача	100
4.2 Визначення частки теплового навантаження, що заміщується енергією сонця та вітру для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем	101
4.3 Тепловий акумулятор для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем ...	106
4.4 Вплив вітру на ефективність роботи КСЕП і розрахунок вітрогенератора	115
4.5 Розрахунок теплової потужності системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем .	117
4.6 Висновки.....	123
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	
5.1 Методика оцінки економічної ефективності використання сонячної та вітрової енергії для отримання тепла	124
5.2 Техніко-економічні показники комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача.....	130
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача....	132
5.4 Висновки.....	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	137
ДОДАТКИ.....	153

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- G – масова витрата теплоносія, кг/год;
 A – площа сонячного колектора, м²;
 D – дисперсія;
 $D_{екв}$ – еквівалентний діаметр;
 \dot{E} – ексергетичний рівень;
 F_q – критерій Фішера;
 F_R – коефіцієнт відведення тепла від сонячного колектора;
 H – висота, м;
 I_i – інтенсивність сонячного випромінювання Вт/м²;
 Q – тепловий потік, Вт;
 i – сила струму, А;
 u – напруга, В;
 P – електрична потужність, Вт;
 γ – кут розкриття гофри, °;
 a – відстань між піками гофр, мм;
 U – коефіцієнт теплових втрат, Вт/(м²·К);
 c – питома теплоємність, кДж/(кг·°С);
 d – діаметр, м;
 f – площа, м²;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
 k_d – коефіцієнт максимальної добової нерівномірності;
 l – довжина, м;
 o – коефіцієнт світлопропускання, %;
 s – середнє квадратичне відхилення;
 t, T – температура теплоносія, К;
 x – значення фактору;
 y – параметр оптимізації;
 α – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К);
 ε – ступінь чорноти;

η – коефіцієнт корисної дії;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;
 ρ – густина матеріалу, кг/м³;
 τ – час, год;
 φ – широта, °;
 β – коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹;
 ΔP – перепад тиску, Па;
 δ – товщина, м;
 θ – оптичний коефіцієнт корисної дії сонячного колектору;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па · с;
 σ – стала Стефана-Больцмана;
 χ – коефіцієнт гідравлічного тертя;
 ω – швидкість вітру, м/с;
 ψ – пористість каналу.

Скорочення

НС – навколишнє середовище;
 НВДЕ – нетрадиційні відновлювальні джерела енергії;
 ВЕР – вторинні енергетичні ресурси;
 СЕ – сонячна енергія;
 ВЕ – вітрова енергія;
 КСЕ – колектор сонячної енергії;
 АТ – акумулятор теплоти;
 ДДТ – додаткове джерело теплоти;
 КСЕП – комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач;
 ТН – тепловий насос;
 ГВП – гаряче водопостачання;
 СО – система опалення;
 ГСТ – геліосистема теплопостачання;
 ВТП – вуглеграфітове трикотажне полотно.

ВСТУП

Актуальність роботи. У зв'язку з тенденціями в енергетиці останніх десятиліть і проблемами енергетичної незалежності України є актуальним розвиток технологій для використання нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії. Найдоступнішим та найпотужнішим альтернативним джерелом є сонячна енергія. Ефективне використання енергії сонця у галузі теплопостачання спостерігається лише у системах гарячого водопостачання і практично не використовується у системах опалення та технологічного теплопостачання. Це пояснюється відсутністю відповідних науково-інженерних напрацювань у даній сфері. Розвиток геліотехніки повинен тісно переплітатися з техніко-економічними реаліями країн і відповідати таким положенням: низька вартість обладнання і систем в цілому, точкові впровадження у провідні галузі промисловості, штучний науково-інженерний підхід до впровадження сонячних систем теплопостачання.

Важливим кроком у розвитку геліотехніки є розвиток систем, де теплоносієм являється повітря. Повітряні системи володіють наступними перевагами по відношенню до рідинних: більш високий коефіцієнт використання сонячної енергії; відсутність можливості замерзання системи і затоплення обладнання; більш простим управлінням та більшою антикорозійною стійкістю. Важливим є використання повітря, підігрітого за рахунок сонячної енергії, для технологічних процесів в сільському господарстві.

Розробка та вдосконалення існуючого геліотехнічного обладнання є необхідним кроком для розвитку сонячних систем теплопостачання. Одним з шляхів розвитку сонячних повітропідігрівачів є використання нових матеріалів для виготовлення абсорберів сонячного випромінювання, що значно розширене можливістю застосування насадкових та пористо-капілярних матеріалів, на відміну від рідинних геліоколекторів. Доцільним є використання текстильних матеріалів, що дозволить знизити вартість колекторів сонячної енергії, а також значно зменшити їх вагу та капітальні

затрати на них. Напрямок розвитку та досліджень повітряних систем тепlopостачання на основі обладнання із сучасних текстильних матеріалів є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно державної програми «Екологічно чиста енергетика та енергозберігаючі технології», вона безпосередньо пов'язана з планом держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури України, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0115U003825).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і наукове обґрунтування раціональної системи тепlopостачання з використанням нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії на базі комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз існуючих повітряних геліосистем тепlopостачання та відомих конструкцій сонячних повітропідігрівачів;
- на підставі проведеного аналізу розробити раціональну принципову схему тепlopостачання з використанням сонячної енергії;
- на основі аналізу відомих конструкцій повітряних сонячних колекторів розробити ефективну конструкцію комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача;
- обґрунтувати фізичну модель теплообмінних процесів, що протікають у комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі;
- удосконалити математичну модель теплообмінних процесів у сонячно-електричному повітропідігрівачі з метою теоретичного визначення його теплотехнічних характеристик;
- експериментально дослідити теплообмінні процеси в комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачу та отримати залежності, що

характеризують їх між вуглеграфітовим трикотажним полотном та омиваючим його повітрям;

- розробити методику інженерного розрахунку енергетичних показників системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем.

Об'єкт дослідження – система теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем.

Предмет дослідження – тепломасообмінні процеси в комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна.

Методи дослідження – фізичне і математичне моделювання теплообмінних процесів у комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі із використанням чисельних і аналітичних методів розв'язку окремих задач та використання розроблених спеціальних методик, експериментальні дослідження

Наукова новизна одержаних результатів:

- обґрунтовано і удосконалено фізичну модель теплообмінних процесів у комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі та на її основі побудовано математичну модель, які показують можливість поєднання способів перетворення сонячної та електричної енергії у теплову в абсорбері ;
- отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від абсорбера з вуглеграфітового трикотажного полотна до повітря, що його омиває;
- визначено коефіцієнт гідравлічного тертя при омиванні повітрям вуглеграфітового трикотажного полотна при використанні його у

якості абсорбера в комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблено комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач, що поєднує в собі два головних елемента будь-якої геліосистеми – сонячний тепловий колектор та додаткове джерело теплоти, абсорбер якого виконаний з вуглеграфітового трикотажного полотна, що зменшує його вартість та вагу та дозволяє використовувати їх на існуючих об'єктах теплопостачання без спорудження громіздких опорних конструкцій для розміщення геліополів. Комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач може використовуватись як самостійний теплогенератор для систем теплопостачання. Розроблено типоряд приладів.

Запропонована система теплопостачання використовує енергію сонця та вітру та є гнучкою для трансформацій, тобто виключаючи будь-який елемент система залишається роботоздатною, що дозволяє використовувати її для різних умов експлуатації.

Розроблено інженерну методику визначення частки заміщення енергією сонця та вітру теплового навантаження споживача при використанні системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем.

Результати дослідження впроваджені в робочих проектах ПП «Ірпінь-теплосервіс» та ТОВ «Парк таун» Київської області.

Особистий внесок здобувача

Автор дисертації самостійно здійснив аналіз літературних та патентних джерел, що стосуються геліотехніки, зокрема повітряних геліосистем та обладнання для них. Розроблено модель комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача та досліджено його технічні характеристики. Автору належать результати обробки теоретичних та експериментальних

даних щодо теплотехнічних, аеродинамічних та електротехнічних характеристик комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна. Також здобувачем запропоновано систему теплопостачання на основі комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача і розроблено методику її інженерного розрахунку.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідалися на: науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2010-2015 рр.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2011 р.); III - VI міжнародних науково-практичних конференціях «Енергоінтеграція» (КНУБА, м. Київ, 2013-2016 рр.); міжнародній науковій конференції «Будівництво на основі оптимізації енергетичного потенціалу» (м. Ченстохова, Польща, 2014р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Буд-Майстер-Клас 2015» (КНУБА, м.Київ, 2015р.).

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 7 друкованих робіт, в т.ч. 5 у фахових виданнях України та 1 у міжнародному виданні. Одержано патент України на корисну модель.

Обсяг роботи

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 155 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 157 сторінках, містить 57 рисунки та 16 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ПОВІТРЯНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

У часи енергетичних війн та світової екологічної кризи раціональне використання органічних запасів традиційних енергоресурсів та охорона навколишнього середовища від шкідливих викидів при спалюванні різних видів палив продовжує набирати актуальності. Використання нетрадиційних відновлювальних джерел енергії (НВДЕ) сонця, вітру, геотермальних вод, припливів та відливів і т.д. частково вирішує перераховані проблеми.

Найбільш перспективним джерелом енергії без сумніву являється сонячне випромінювання, оскільки воно повсюдне і безкоштовне. У цьому розділі наведено огляд стану геліотехніки, зокрема повітряних геліосистем теплопостачання

1.1 Аналіз існуючих систем

Комплекс обладнання і допоміжних пристроїв, за допомогою яких сонячне випромінювання перетворюється у корисну теплову енергію називається геліосистемами теплопостачання (ГСТ). Системи ГСТ можна наступним чином: за призначенням системи; за видом теплоносія; за способом спонукання руху теплоносія; за наявністю та типом акумулятора теплоти; за наявністю та типом додаткового джерела теплоти. Класифікація геліосистем представлена на .В результаті аналізу літературних джерел [1, 3, 29, 41, 117] очевидно, що в переважній більшості систем застосовують колектори сонячної енергії (КСЕ) з рідинним теплоносієм. Із загальної теплової потужності використовуваних і заново вироблених у світі геліоколекторів теплоносієм повітря мають не більше 1%[154]. Кількісне розподілення відомих типів КСЕ у світі відображено на рис.1.2.

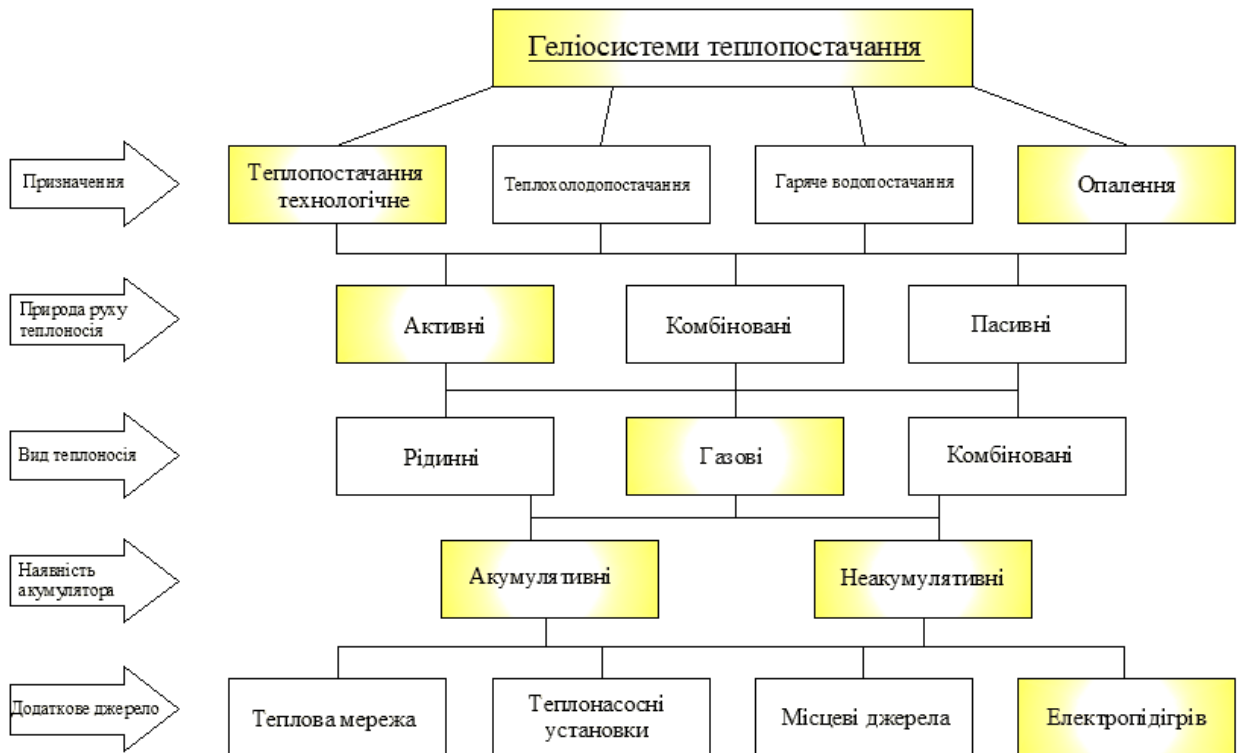


Рис. 1.1. Класифікація геліосистем теплопостачання (виділено області дослідження дисертаційної роботи).

Геліосистеми повітряного теплопостачання володіють наступними перевагами по відношенню до рідинних: більш високий коефіцієнт використання сонячної енергії; відсутність можливості розмерзання системи і затоплення обладнання; простішими будівельно-монтажними роботами;

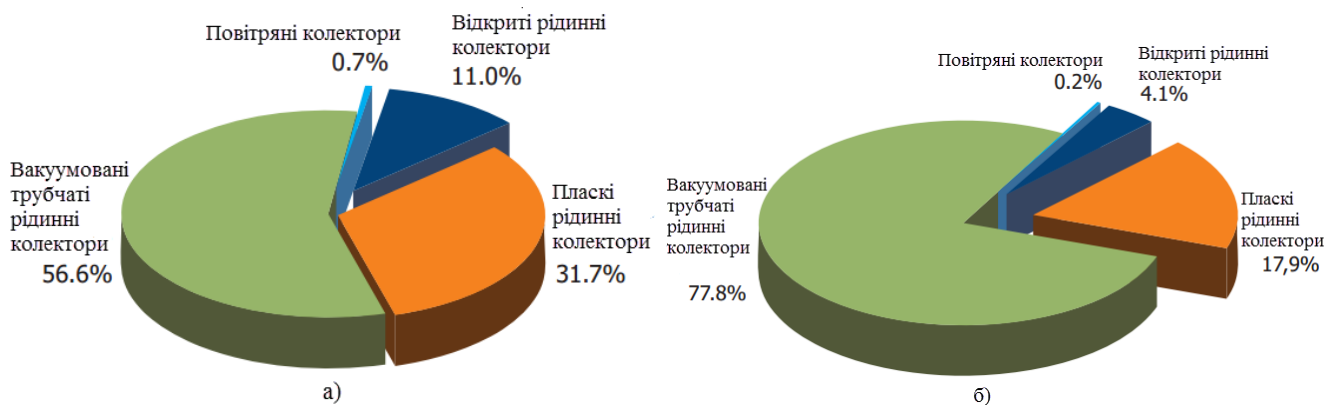


Рис. 1.2 Доля потужностей різних типів геліоколекторів у світі на 2011 рік: а) колектори, що використовуються; б) колектори, новозбудованих систем.

більш простим управлінням і більшою антикорозійною стійкістю. Крім того ексергетичний ККД геліосистем з повітряним теплоносієм вище ніж з

рідинним. Так, застосування повітряних ГСТ протягом тривалого періоду (року, терміну експлуатації) дійсно можуть конкурувати з рідинними ГСТ.

За призначенням повітряних геліосистем головним чином можна розділити на три групи, які мають ряд спільних ознак. Перша група включає в себе активні системи теплопостачання з тепловим акумулятором для згладжування нерівномірності приходу сонячної енергії протягом доби (рис.1.3, а) – як правило використовуються для опалення та вентиляції приміщень з непостійним тепловим режимом та денним перебуванням людей (спортзали, магазини, офіси і т.д.). Перша група притаманна європейським країнам з відносно м'яким кліматом. До другої групи відносяться пасивні геліосистеми теплопостачання типу стіни Тромбе-Мішеля (рис.1.3, б) [153]. Як правило, сонячний колектор такої системи інтегрований у огорожуючі конструкції будівлі. Рух повітря у колекторах відбувається за рахунок природної конвекції (іноді рух інтенсифікується осьовими вентиляторами малої потужності). Системи другої групи застосовується для опалення приміщень великих об'ємів (склади, логістичні центри, ангари і т.д.) і притаманні країнам Північної Америки. Третя група об'єднує технологічні геліосистеми (рис.1.3, в) для промислових технологій з необхідністю великих об'ємів гарячого повітря, як правило це сушки сільсько-господарської продукції (зернових культур, грибів, фруктів, лікувальних трав і т.д.). Такі системи – це по суті спрощені системи першої групи, вони зазвичай активні, можуть бути пересувними, без акумулявання і додаткових джерел енергії, адже масово використовуються у південних сонячних країнах Азії (Індія, Китай, Узбекистан і т.д.) [113].

В силу того, що виникає необхідність будівництва повітряних ГСТ на існуючих об'єктах, де відсутня можливість застосування пасивних систем, в роботі досліджується система з примусовою циркуляцією повітря (рис.1.3, а)

Принцип роботи активної повітряної ГСТ першої групи наступний. Сонячне випромінювання потрапляє в геліоколектор 1, там поглинаючись абсорбером передається повітря, що нагнітається у колектор вентилятором 2.

Потім по повітроводах 3 нагріте повітря подається до споживача. Акумулятор теплоти (АТ) 4 заряджається при надлишку теплової енергії від сонця і розряджається при її недостатці. При недостатньому прогріві повітря після КСЕ та АТ, воно догрівається у додатковому джерелі теплоти (ДДТ) 5. Регулювання потоків повітря (КСЕ-спожива, АТ-спожива, КСЕ-АТ) забезпечують регулюючі заслінки 6.

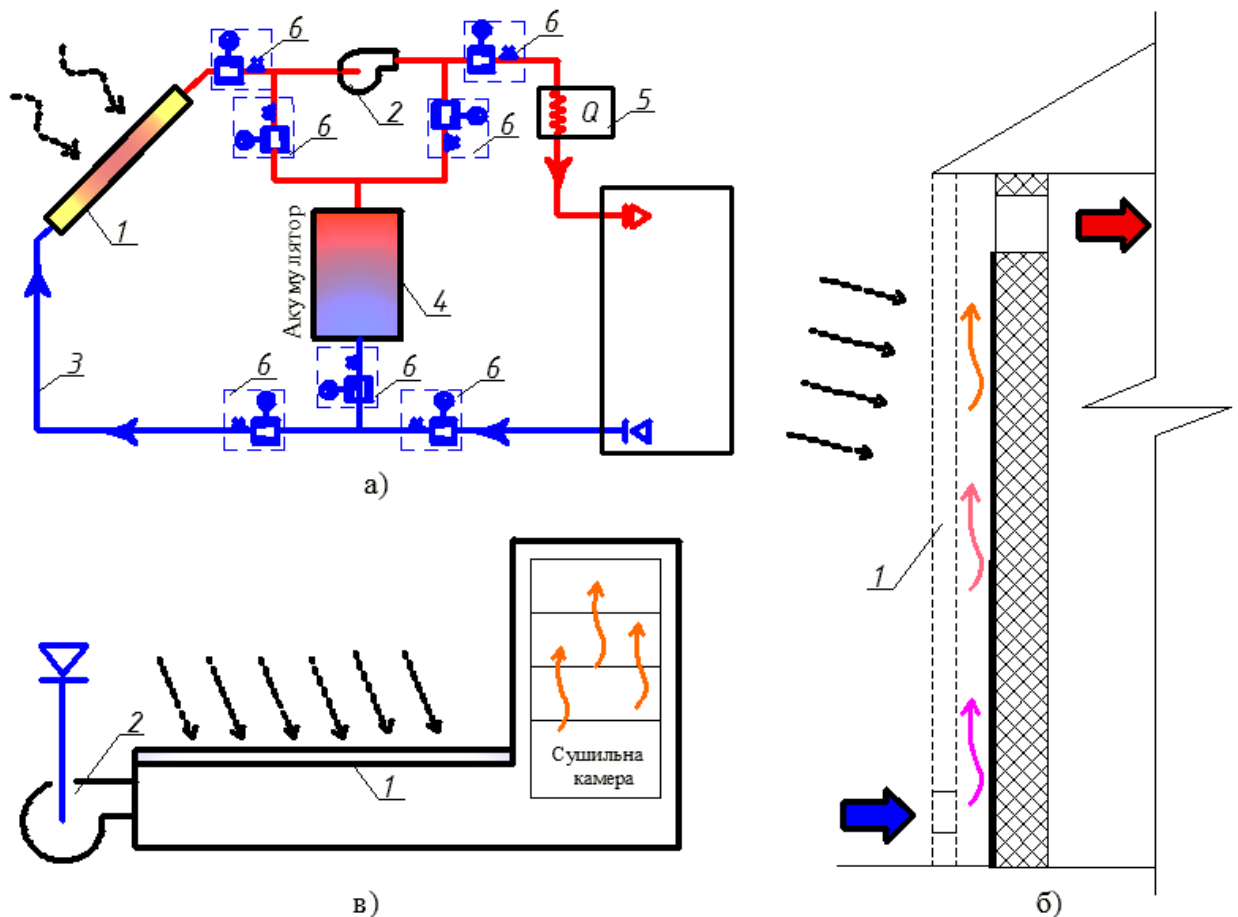


Рис. 1.3 Повітряні геліосистеми теплопостачання: а)активна система; б)пасивна система; в)активна технологічна система.

По справжньому ефективно в кліматичних умовах України подібні системи можуть працювати тільки в перехідні сезони (весна-осінь), оскільки в зимові місяці денний прихід сонячної енергії занадто малий і все навантаження лягає на дублююче джерело, а в літній час попит на теплову енергію для опалення відсутній. Тому використання геліосистем повітряного теплопостачання вимагає індивідуального підходу і точкових впроваджень. Це означає, що необхідно знаходити відповідні об'єкти теплопостачання,

прикладом такого об'єкта можуть послужити невеликі птахівницькі комбінати. У пташниках для пташенят (брудергаузи) і молодняка температура повітря необхідна в межах від 21°C до 36°C , в залежності від віку птиці, так само в них потрібно досить великий повітрообмін (влітку до $20\text{ м}^3 / \text{год}$ на кг живої ваги), тобто для таких приміщень характерна необхідність великої кількості теплого повітря [107, 132]. Влітку ж коли температура зовнішнього повітря відповідає температурі внутрішньої, гаряче повітря можна подати в барабанні сушарки посліду, які зараз повсюдно використовуються на птахофабриках.

1.2 Методики розрахунку систем

Методики розрахунку систем сонячного теплопостачання можна розділити на дві великі групи: на основі використання миттєвих значень вихідних даних і усереднених або довготривалих характеристик [29].

Миттєвими є значення кліматичних даних (інтенсивність сонячної радіації, температура зовнішнього повітря) і режимні параметри (температура теплоносія на вході в установку, витрата теплоносія), що визначаються зазвичай для годинного інтервалу часу роботи. Годинні значення використовують частіше за все тому, що інформація про зміну зовнішніх кліматичних умов в кліматологічних довідниках наводиться, як правило, для часових інтервалів.

Усереднені або довготривалі характеристики визначають роботу системи сонячного теплопостачання за тривалий проміжок часу: місяць, сезон, або рік.

Однією з перших була методика розрахунку геліоустановок на основі миттєвих значень, розроблена в результаті узагальнення експериментальних даних для водонагрівачів за двадцятирічний період [64]. На основі часових значень інтенсивностей сонячної радіації і температури зовнішнього повітря обчислювалася добова теплова потужність установки для умов ясного дня. Місячна теплова потужність для дійсних умов експлуатації визначалася множенням добової теплової потужності на число днів у місяці та на

коефіцієнт хмарності (відношення фактичного числа годин сонячного сяйва до числа днів у місяці, помноженому на середню тривалість дня). Потім на основі місячних значень теплової потужності визначалося її значення за сезон або рік. Розбіжність експериментальних і розрахункових даних не перевищувало 8-12%.

Основним недоліком методу було те, що для визначення теплової потужності сонячного водонагрівача необхідно було виконати графічну побудову залежностей інтенсивності сонячної радіації і теплових втрат сонячного колектору від часу дня. Крім того, методика не враховувала впливу деяких факторів (місткості бак-акумулятора, характеру теплового навантаження об'єкта, конструкції сонячного колектору) на характеристики геліоустановки. На основі цієї методики в 1977 р були розроблені рекомендації для розрахунку сонячних водонагрівальних установок [89].

Пізніше Хоттелом і Уїллером було запропоновано вираз для визначення годинної теплової потужності сонячного колектора в залежності від кліматичних, конструктивних і режимних факторів [29]

$$q_{II} = (\tau a)_{\exists} \cdot I_K - U_L (\overline{T}_A - T_{HC}), \quad (1)$$

де τ – пропускна здатність світлопрозорого покриття колектора;

a – поглинаюча здатність абсорбера колектора;

I_K – сумарна інтенсивність сонячного випромінювання на площину колектору, Вт/м²;

U_L – загальний коефіцієнт теплових втрат колектору, Вт/м² К;

\overline{T}_A – середня температура абсорбера, К;

T_{HC} – температура навколишнього середовища;

Потім визначалися інші енергетичні характеристики для кожної години, і підсумовуванням по годинах доби розраховувалася тепла потужність за сезон або рік.

Перша найбільш широко використовувана модель для розрахунку теплової характеристики сонячних систем TRNSYS була розроблена

Клейном [138, 139]. Ця квазістаціонарна модель складається з детальних модулів Фортране і містить близько 20 компонентів, що включають колектори, прилади зберігання, клапани та інші пристосування труб, теплообмінники, засоби управління, і теплове навантаження. Складові моделі - математичні уявлення енергії і закону збереження маси. Компоненти можуть бути пов'язані багатьма способами, що дозволяє зробити моделювання всіх практичних сонячних теплових систем.

Однак ця програма через її конструкції не дасть можливості досліджувати вплив окремих елементів сонячних систем на поведінку системи в цілому.

Іншим поширеним методом розрахунку є метод f -графіків [12, 84]. Основу методу складає залежність коефіцієнта заміщення від безрозмірних комплексів X і Y , що включають в себе кліматичні, конструктивні і режимні фактори

$$X = A \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_{\text{баз}} - \overline{T_{\text{НС}}}) \Lambda / E_M, \quad (2)$$

$$Y = A \cdot F_R \cdot (\overline{\tau a}) \cdot \overline{I_K} \cdot n / E_M, \dots \dots \dots (3)$$

де A – площа геліополя, м²;

F_R – коефіцієнт відводу теплоти в КСЕ;

$T_{\text{баз}}$ – базисна температура, рівна 100°C;

Λ - число секунд в місяці;

E_M – повне місячне теплове навантаження споживача, Дж;

$\overline{\tau a}$ - середньомісячна приведена поглинаюча здатність геліополя;

n – число днів у місяці;

Пізніше метод f - графіків був скоректований і об'єднаний з методом "Utilization" і отримав назву методу Φ , f – графіків. На основі цих методів різними дослідниками були розроблені різновиди розрахункових моделей для різних окремих випадків [7, 21, 84].

Більшість з розглянутих методів не дають можливості представити в простій аналітичній формі залежність коефіцієнта заміщення від різних

чинників, що ускладнює оптимізацію систем сонячного теплопостачання і визначення областей раціонального використання сонячної енергії в масштабах країни. Дуже мало робіт, в яких проводилася оптимізація основних параметрів систем сонячного теплопостачання і наводилися значення техніко-економічних показників, при яких використання сонячної енергії економічно доцільно.

Остаточним етапом оцінки ефективності даної системи є техніко-економічний аналіз, що враховує, по можливості, всі витрати і приводить до оптимального по економічності варіанту, який завжди є розумним компромісом між прагненням до максимальної енергетичної ефективності і до мінімальних витрат на установку [14]

1.3 Огляд сучасних сонячних повітропідігрівачів

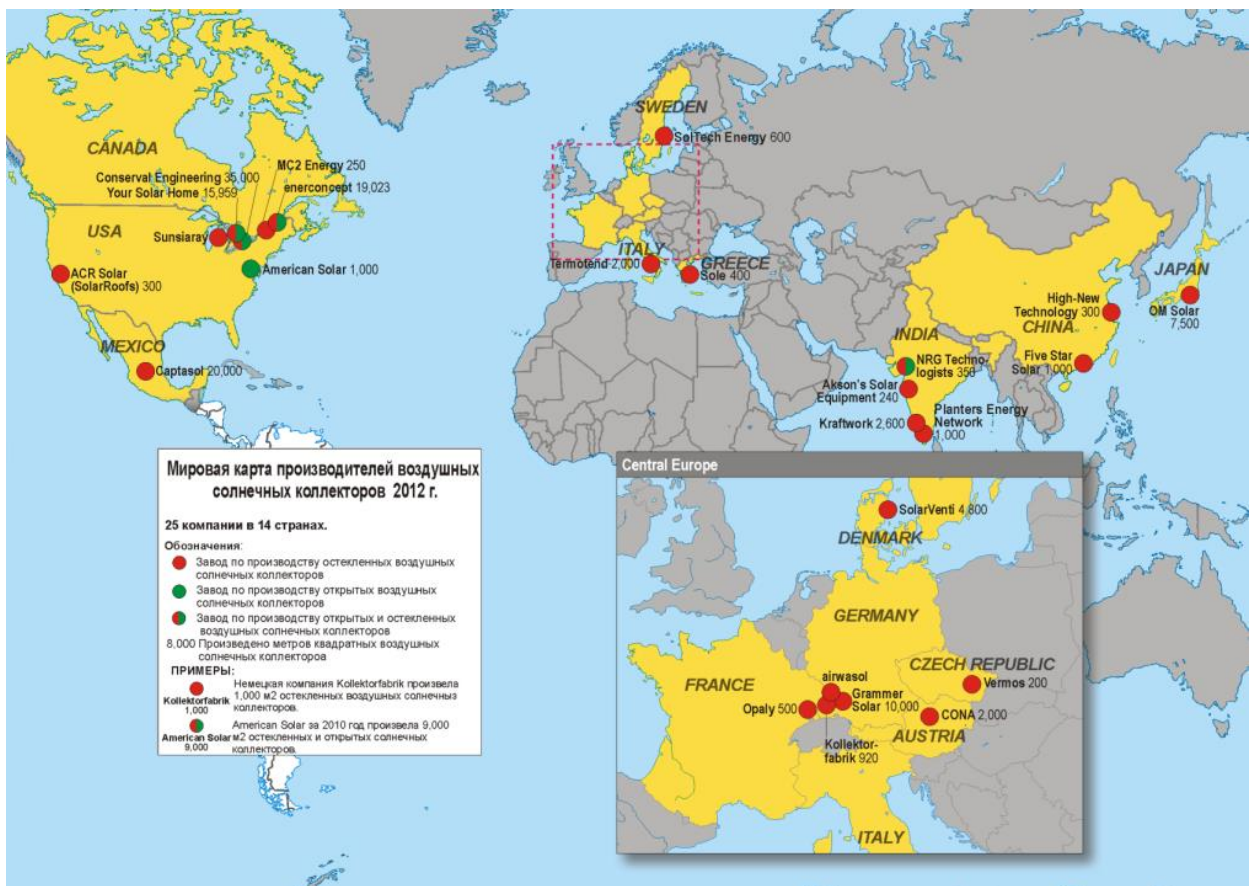


Рис. 1.4 Світова мапа виробників повітряних колекторів 2012р.

Світова промисловість, що направлена на забезпечення геліотехніки, має ряд виробників, що приділяють увагу не лише фотовольтаїчним панелям та рідинним тепловим колекторам, а і сонячним повітропідігрівачам. Як було

сказано в розділі 1.1 в залежності від призначення виробники чітко поділяються географічно. По даним міжнародного агентства маркетингу геліоринку “Solrico” на Рис. 1.4 зображено розподілення світових виробників повітряних КСЕ.

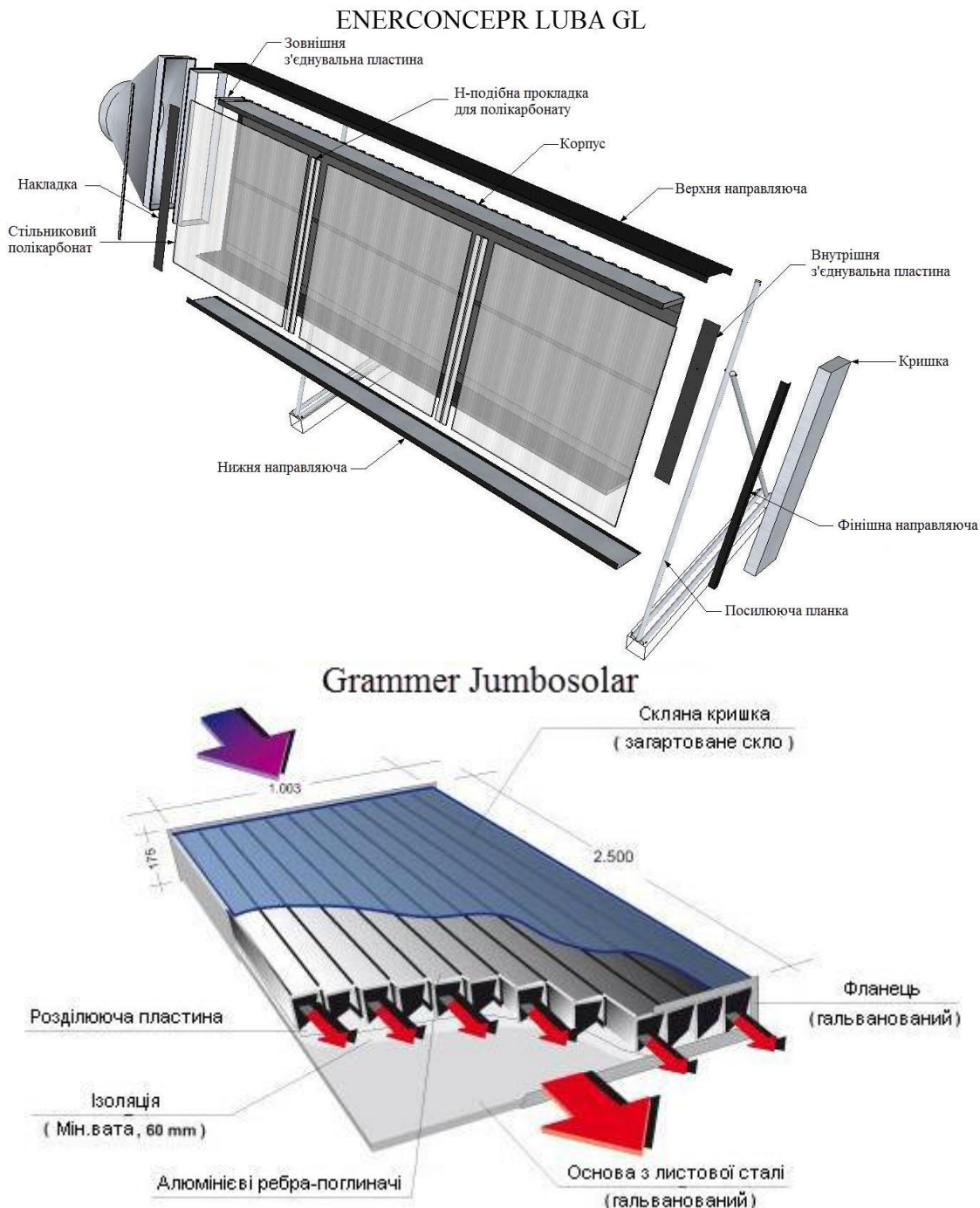


Рис. 1.5 . Конструкція сонячних повітропідігрівачів, що найбільш масово виробляються у світі.

Найбільшими виробниками повітряних колекторів для активних систем тепlopостачання в світі є німецький бренд Grammer Solar, канадська

корпорація ENERCONCEPT, італійський ThermoTend та данський SolarVenti. Всі ці колектори мають принципово однакову будову(рис. 1.5)

у якості абсорбера використовується профільований металевий лист (сталь, алюміній, мідь); торцевий підвід/відвід повітря; світлопрозоре покриття зі скла або стільникового полікарбонату. Відмінністю досліджених моделей між собою можна назвати спосіб руху повітря у КСЕ: в моделі Jumbosolar повітря продувається під ПЕ; в моделі Luba GL над ПЕ

Повітряні КСЕ, які виробляються в світі, мають ряд спільних істотних недоліків. По-перше, це їх висока вартість, що веде до збільшення капітальних витрат на облаштування та низьку рентабельність систем повітряного теплопостачання. По-друге, велику вагу колекторів обмежує їх використання в існуючих будівлях, призводить до необхідності посилення проєктованих несучих конструкцій або планування додаткових опорних споруд, що знову ж таки неминуче призведе до збільшення капітальних витрат (Таблиця 1.1). Такі проблеми формують набір вимог для повітряних КСЕ, при виконанні яких стане можливим створити дієву, ефективну і рентабельну систему теплопостачання.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики відомих моделей сонячних повітропідігрівачів

Виробник	Установлена потужність Вт *	Габаритний розмір, мм	Площа поглинаючої поверхні, м ²	Вага кг	Матеріал абсорбера	Матеріал світлопрозорого покриття	Ціна €**
Grammer Solar Jumbosolar, Німеччина	1675	2500×1003×175	2,26	60	Алюміній	Скло	700
SolarVenti SV30, Данія	2000	3000×1020×72	2,98	29,1	Повість	Скло	1250
SOLE SA AIRSOL35, Греція	2700	2833×1285×140	3,40	40	Алюміній	Скло	1100
ThermoTend ThermoFlow, Італія	1400	2000×1000×95	1,82	29,5	Сталь	Стільниковий полікарбонат	520
Enerconcept Luba GL, Канада	2300	2840×915×205	2,45	42	Сталь	Стільниковий полікарбонат	-

*Потужність вказана при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²

** Ціна вказана по прайс-листам компаній виробників на 2015р.

Грунтуючись на необхідних теплових характеристиках елементів КСЕ, і з огляду на особливості використання геліосистем в існуючих спорудах можна висунути ряд вимог до конструкцій колекторів.



Рис. 1.6 . Геліополе повітряної ГСТ на основі колекторів Luba GL в Монреалі.

По-перше, сонячні повітрянагрівачі повинні бути максимально легкими з тим, щоб обладнання геліополя на дахах не вимагало додаткових опорних конструкцій. Також зменшення маси КСЕ спрощує, а відповідно і здешевлює монтажні роботи. Проблема вирішується відмовою від металевих елементів, віддаючи перевагу різним полімерним і композитним матеріалам при конструюванні колекторів сонячної енергії. По-друге, стандартною вимогою є підвищення міцності і стійкості до впливу ультрафіолетового випромінювання світлопрозорого покриття. Шляхи вирішення цієї задачі відомі: це заміна скла на склопакети, полікарбонати, плівки і т.д.[110]

Стежачи за тепловими та конструктивними параметрами, звичайно, не можна забувати про ціну сонячних повітропідігрівачів, адже економічний ефект є не менш важливим ніж енергетичний. Вартість сонячних повітропідігрівачів формується з вартості використаних в ньому матеріалів і технологічності виготовлення, так, наприклад, в існуючих моделях КСЕ використовуються досить дорогі кольорові метали (алюміній, мідь), при цьому їх необхідно обробляти селективними покриттями для поліпшення поглинаючих властивостей. Два цих моменти і призводять до тієї вартості сонячних колекторів, яку ми маємо на даний момент. Сама собою з'являється необхідність пошуку і використання неметалічних матеріалів для ПЕ з

природною селективністю, заміна скла на інші матеріали і виготовлення полімерних корпусів для сонячних повітропідігрівачів.

1.4 Аналіз відомих конструкцій сонячних повітропідігрівачів та шляхи їх вдосконалення

Після аналізу патентних вишукувань виділено чотири напрямки розвитку конструкцій плоских повітряних КСЕ (Рис. 1.7)

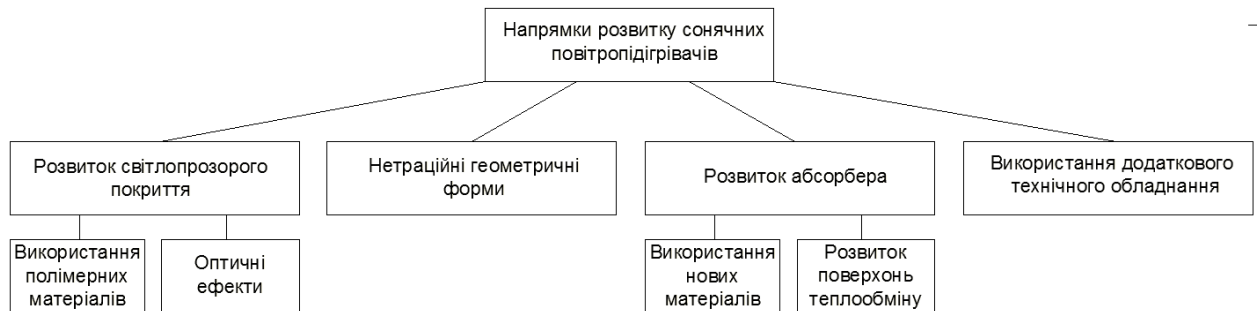


Рис. 1.7 . Напрямки розвитку сонячних повітропідігрівачів.

Розвиток світлопропускнуго покриття зводиться до більш ефективного збору сонячного випромінювання без добових змін кутів установки КСЕ. Наприклад, в [33] наведено прилад світлопропускнуго покриття якого, окрім звичайного плоского скла, представляє собою набір фокусуєчих скляних призм, які збільшують кількість прийнятого випромінювання (Рис. 1.8). Недоліком такого рішення є збільшена технологічність виробництва скляних призм, тобто збільшення вартості колектора, крім того маса та крихкість таких приладів стає вищою.

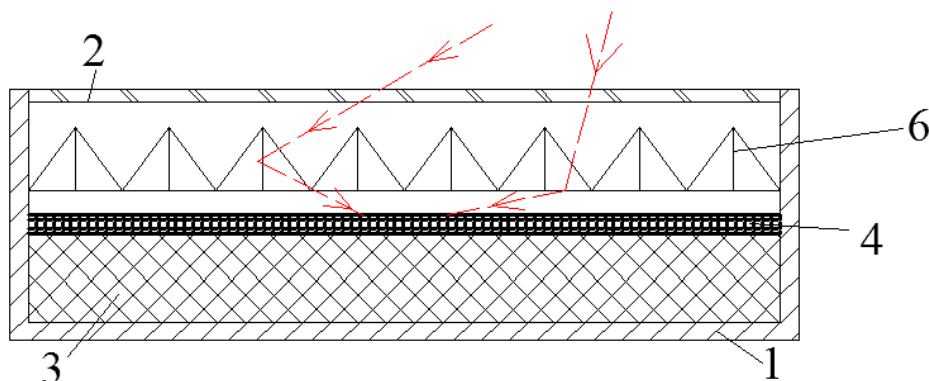


Рис. 1.8 . Фокусуєчий сонячний повітропідігрівач: 1-корпус; 2-світлопрозоре покриття; 3-теплоізоляція; 4-абсорбер; 5-скляні призми.

Відомий ряд рішень, в яких використовується світлопрозорі плівкові матеріали в якості прозорого покриття. Так в [93] описаний геліоприймач в якому абсорбером являється горизонтально розміщений жорсткий циліндричний трубопровід, всередині якого протікає повітря, що нагрівається. В цьому трубопроводі є отвори, через які повітря витікає назовні і заповнює оболонку світлопрозорого плівкового матеріалу. Зверху розміщена ще одна оболонка із прозорої плівки, вона також заповнена повітрям, що слугує в цьому випадку тепловою ізоляцією. Схожий принцип реалізовано в технічних рішеннях [95, 96, 97]. Головною перевагою таких рішень є низька вартість і відносна простота виготовлення. Але відомо [12], що плівкові покриття гірше пропускають випромінювання ніж скло, що знижує ефективність таких КСЕ, а це означає збільшену площу геліополя. Крім того, плівкові покриття не створюють на відміну від скляних парникового ефекту, притаманного повітропідігрівачам зі скляним покриттям. Також, сьогоденні плівкові матеріали мають прискорене старіння під дією сонячних променів, при цьому інтенсивно втрачають прозорість, що викликає необхідність їх частій заміни. Відоме також технічне рішення плівкового КСЕ (Рис. 1.9)[17].

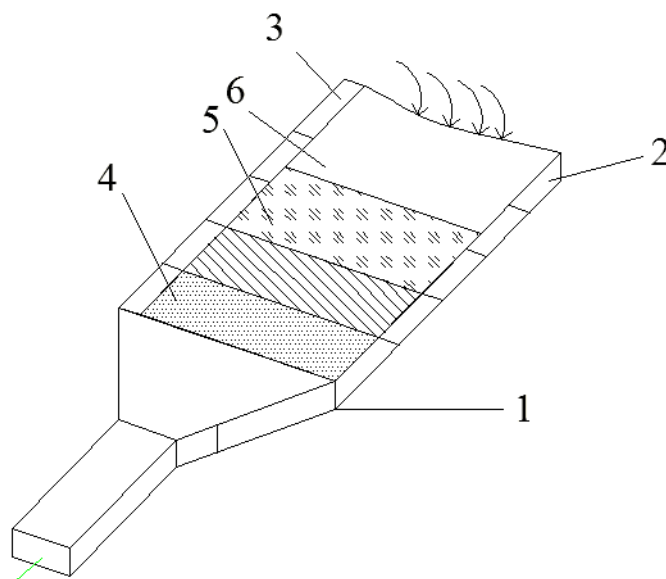


Рис. 1.9 . Плaskий плівковий сонячний повітропідігрівач: 1-корпус; 2,3- корпусні деталі; 4-решітчастий тримач; 5-поглинаюча плівка; 6- світлопрозора плівка.

Таке рішення відрізняється від попередніх формою – він плоский. Плівковим виконано як покриття, так і абсорбер, тільки покриття виконано із прозорої плівки, а абсорбер із чорної. Покриття зроблено одношаровим. Повітропідігрівач має решітку, що фіксує взаємне дистанційне положення покриття та абсорбера. Вона виготовлена із сітки, сплетеної із металічної проволочки або пластмаси. Цей елемент окрім конструктивної функції фіксації взаємного розміщення покриття і абсорбера може частково нести функцію абсорбера – решітка нагрівається сонячним випромінюванням, а потім уже від контакту з нею нагрівається повітря, що протікає між абсорбером і покриттям. Ця ідея повністю розвинута в [26]. Згідно цього рішення КСЕ має жорсткий корпус, що має теплову ізоляцію і подвійне осклення. Абсорбер виготовлено об'ємним у вигляді розміщеною одна під одною проволочних сіток з різним розміром вічка, при цьому розмір вічок зменшується від покриття до дна. Крім того відстань між сітками також зменшується при наближенні до днища (Рис. 1.10) Оскільки саме сітки несуть основне навантаження у якості абсорбера, то днище оснащено відбивачем з тим, щоб повернути частину випромінювання, що пройшло крізь сітки назад на них. З точки зору теорії теплообміну в цій конструкції реалізовано один із загальних принципів інтенсифікації конвективного теплообміну – розвиток площі поверхні теплообміну з одночасною турбулізацією потоку теплоносія [55].

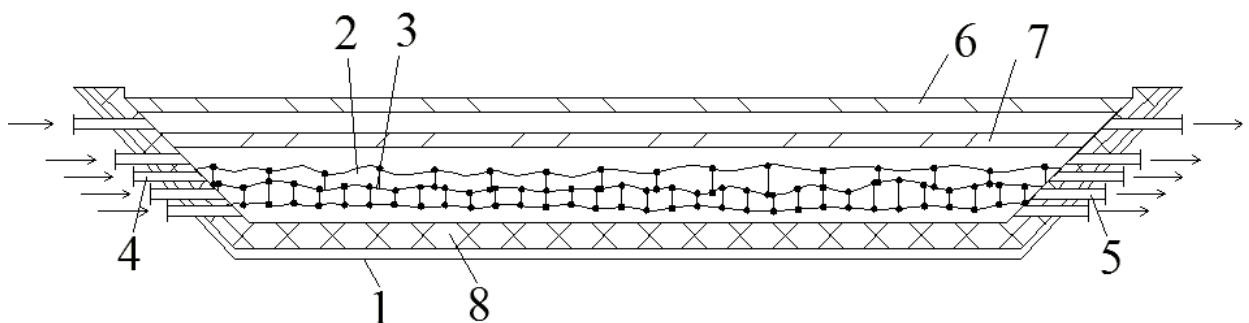


Рис. 1.10 . Повітропідігрівач з решітчастим абсорбером: 1-корпус; 2,3-металеві сітки; 4,5-вхідний та вихідний патрубок; 6,7-осклення; 8-теплоізоляція

В [76] наведено конструкцію, в якій абсорбер виконано із чорної металічної пластини, що вигнута подібно плісированій тканини. Розміщений горизонтально по діагоналі від нижнього кута під вхідними патрубками до верхнього кута корпусу над вихідними патрубками (Рис. 1.11). В місцях перегинів абсорбер оснащений отворами для проходу повітря. В цьому рішенні використовується збільшена площа поверхні абсорбера, при чому при проході повітря через отвори в місцях перегинів пластини абсорбера він турбулізується. При оманливій простоті рішення, технологічно виготовити такий абсорбер досить складно, оскільки для виготовлення його потрібна або спеціальна оснастка у вигляді особливого штампу або виготовляти його зварним з набору пластин, що також доволі непросто. Також проблеми ваги, металоємності та необхідності селективних покриттів не зникають.

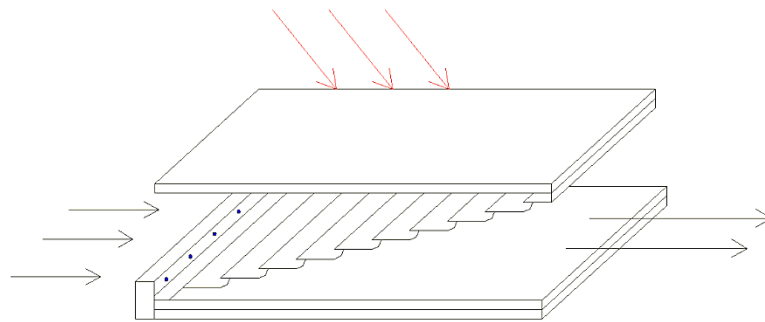


Рис. 1.11 .Сонячний повітропідігрівач зі стрічковим абсорбером.

В роботі [109] абсорбер виконаний у вигляді чорної пластини робоча поверхня якої представляє собою капілярну структуру (Рис. 1.12). Виготовлення поверхні абсорберу у вигляді капілярної структури переслідує ціль збільшити його поглинаючу здатність і тим самим посилити поглинання випромінювання і в якійсь мірі турбулізувати потік омиваючого абсорбер повітря за рахунок збільшеної шорсткості поверхні поглинаючого елемента. Аналізуючи це рішення можна сказати, що фінансові затрати на технологічне виготовлення розвиненої капілярної структури на поглинаючому елементі набагато більші ніж отриманий ефект від збільшення ефективності сонячного повітропідігрівача.

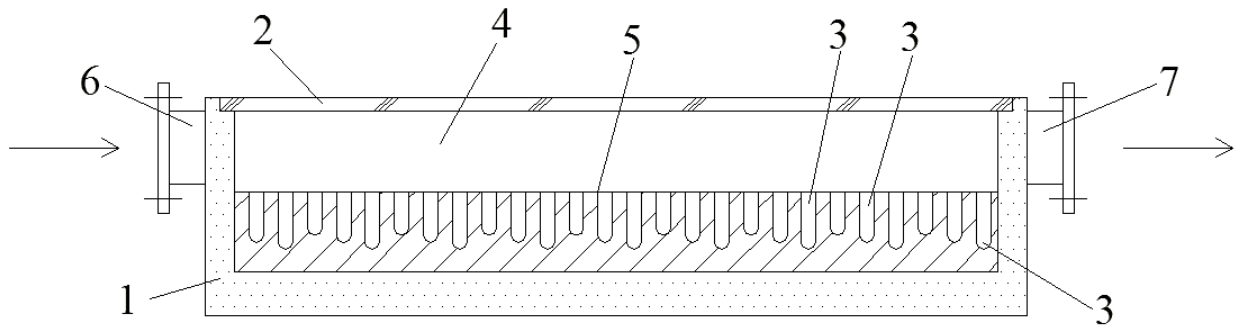


Рис. 1.12 .Сонячний повітропідігрівач з капілярним абсорбером: 1- теплоізолюваний корпус; 2-світлопрозоре покриття; 3-капіляр; 4 – канал для проходу повітря; 5-поверхня абсорбера; 6,7 – вхідний та вихідний патрубок.

Збільшуючи ефективність КСЕ також вдаються до використання додаткових технічних елементів. Так, в [27] запропонований геліоприймач з концентратором, у фокусі якого розміщений випарник термосифону, який слугує абсорбером. Конденсатор цього термосифона, виконаний у вигляді плоского ребра слугує для нагріву повітря. Корпус покритий шаром теплоізоляції. До очевидних недоліків (з точки зору сформованих вище вимог) цього рішення потрібно віднести наявність концентратора, що здорожує та ускладнює конструкцію, а також термосифона. Термосифон працює по прямому термодинамічному циклу, на виконання якого витрачається певна кількість отриманої від сонця теплоти. Крім того в умовах нестабільності і нерівномірного в силу стохастичності кліматичних факторів, ефективність термосифона також буде різною по часу, що робить роботу всієї системи погано прогнозованою та нестійкою.

Доволі ефективним з теплотехнічної точки зору виглядає рішення [103]. В цьому рішенні в жорсткому теплоізолюваному корпусі зі скляним покриттям розміщений абсорбер, виконаний у вигляді чорних кульок, розміщених всередині сітчастої оболонки. Сама оболонка закріплена у внутрішньому просторі корпусу так, що через впускний патрубок нагнітається повітря під сітчасту оболонку з кульками, потім повітря проходить крізь неї між кульками і виходить через випускний патрубок, розміщений під оболонкою (Рис. 1.13). Повітря, проходячи через оболонку,

створює всередині неї «киплячий шар» з кульок. Відомо, що теплообмін в «киплячому шарі» достатньо інтенсивний, але нажалі він володіє великим аеродинамічним опором, що ставить під питання можливість широкого використання таких геліоприймачів.

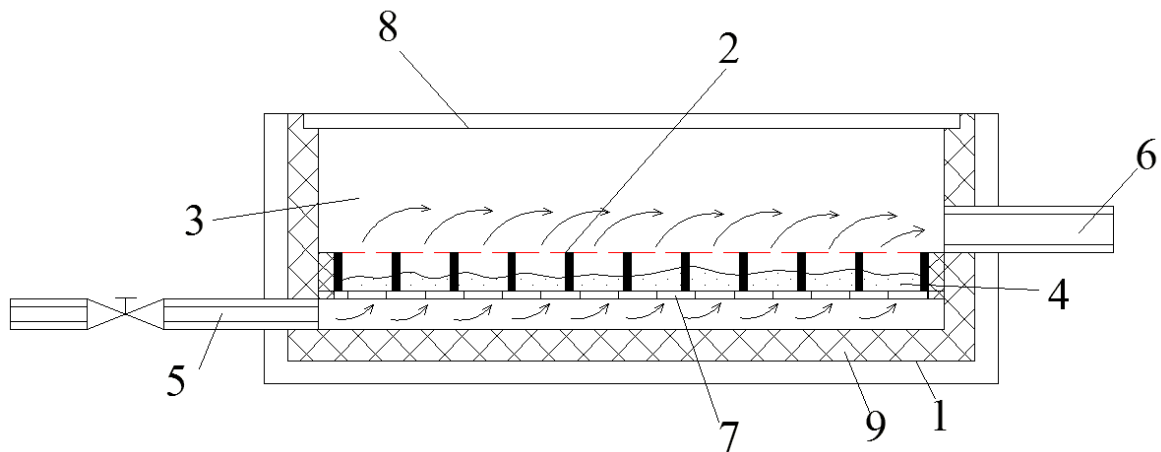


Рис. 1.13 .Сонячний повітропідігрівач з «киплячим шаром»: 1-корпус; 2,7- обмежувальні сітки; 3-вільний простір; 4-кулькова засипка; 5,6-вхідний та вихідний патрубок; 8-світлопрозоре покриття; 9-теплова ізоляція.

Отже, безсумнівно перспективним напрямком розвитку повітряних геліосистем є пошук нових матеріалів для виготовлення колекторів. Зважаючи на проблеми в теплоенергетиці країни просто необхідно шукати всі можливі шляхи використання сонячної енергії, зокрема, сучасний технологічний спурт у виробництві неметалевих матеріалів дає нові можливості у геліотехніці для її здешевлення та більшої пристосованості до реалій України.

1.5 Система теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем

Основною задачею при конструюванні енергоефективної системи теплопостачання є збільшити долю заміщення теплового навантаження споживача нетрадиційними та відновлювальними джерелами енергії. В більшості випадків використання НВДЕ тягне за собою використання додаткового джерела теплоти, що живиться від традиційних енергоносіїв (вуглеводні, вугілля, електроенергія). Це означає, що головним показником

досконалості системи теплопостачання з використанням НВДЕ є доля заміщення ними теплового навантаження споживача, або коефіцієнт заміщення χ . Коефіцієнт заміщення визначається

$$\chi = \frac{E_{\text{НВДЕ}}}{E_T}, \quad (2.1)$$

Де: $E_{\text{НВДЕ}}$ – енергія, що отримана споживачем від НВДЕ, Дж;

E_T – енергія, що необхідна споживачу для покриття теплового навантаження, Дж.

Для повітряних геліосистем теплопостачання будівель і споруд коефіцієнт заміщення, як правило досить не високий і складає 0,2-0,4 [7,84]. Це пояснюється сезонним неспівпадінням найбільшого приходу сонячної радіації та пікових потреб в теплоті споживачем, а також добовою періодичністю сонячного сьйва. Шляхами вирішення подібних проблем є улаштування теплових акумуляторів (добових, сезонних), використання додаткових джерел енергії засобів для підвищення енергетичного потенціалу (теплові насоси, термосифони, теплові труби) [21,88]. Проте перераховані способи значно здорожують системи.

Технологічні повітряні ГСТ мають значно вищі значення χ (від 0,5-1,0). Це пояснюється індивідуальним точковим інженерним підходом, що дає змогу максимально використовувати сонячну енергію – у відповідності до пори року та технологічного завдання. Наприклад для сушіння зернових культур в Україні. Відомо що сушка відбувається в серпні-вересні [53, 54], в місяці з одним з найбільших надходжень сонячної енергії, при Вночі ж проходить, так званий, «перепочинок зерна» для того щоб волога розповсюдилась від ядра зернятка до обдуваємих країв.

Важливими критеріями ефективності системи являється також капітальні затрати на її улаштування. Зокрема, вартість теплотехнічного обладнання (геліоколектори, ДДТ, акумулятори і т.д.), вартість будівельно-монтажних робіт та подальші експлуатаційні затрати.

Слідуючи вищезгаданим вимогам у роботі запропоновано принципову схему системи теплопостачання з використанням енергії сонця, вітру та навколишнього середовища (Рис. 1.14). В повітряних геліосистемах, зокрема в КСЕ, елементом що передає теплову енергію теплоносію є абсорбер. Саме степінь його прогріву визначає ефективність роботи системи, тому було запропоновано, щоб у разі недостатнього прогріву абсорбера для забезпечення необхідної температури теплоносія на виході із повітропідігрівача, додавати енергії абсорберу з іншого джерела. Технологічно найпростішим та піддатливим для оперативного регулювання є електричний догрів. При цьому електрична енергія підводиться до абсорбера від мережі та вітрогенератора. Оскільки електроенергія від вітрогенератора призначена для перетворення у теплову немає необхідності слідкувати за її параметрами (частотою та напругою), що дозволяє обійтись без акумуляторних батарей, інверторів та трансформаторів.

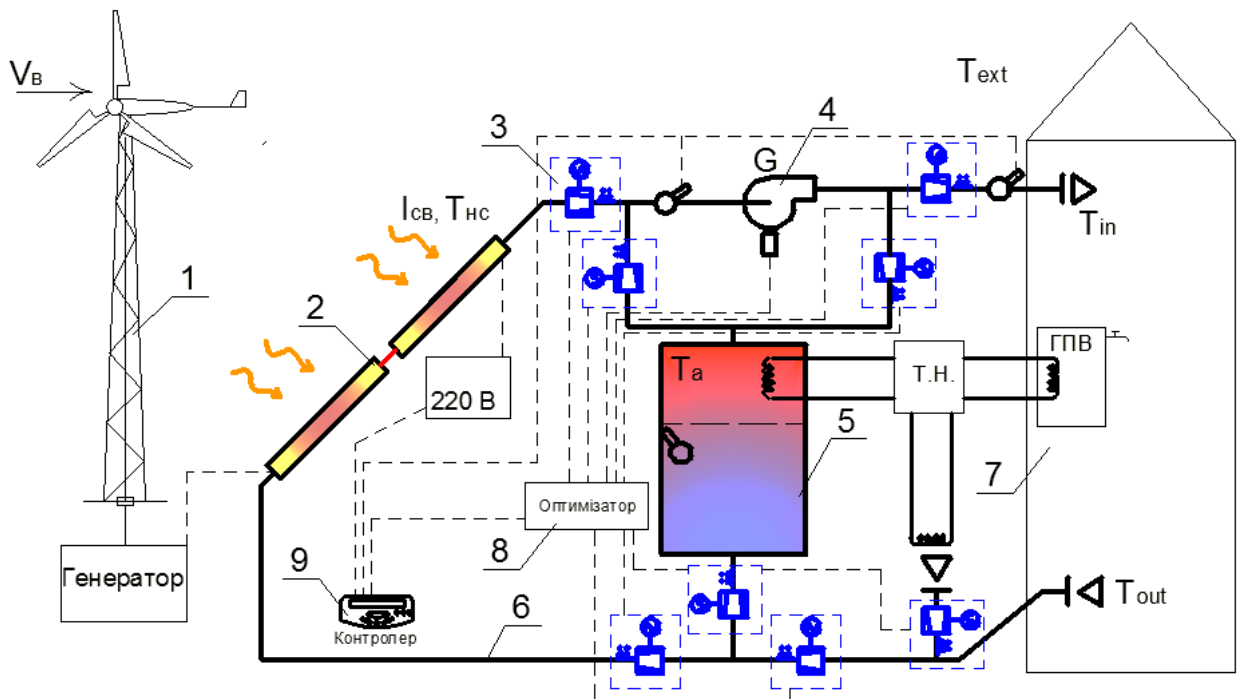


Рис. 1.14 .Принципова схема системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем: 1-вітрогенератор; 2-КСЕП; 3- органи регулювання; 4-вентилятор; 5-тепловий акумулятор; 6- повітропроводи; 7-споживач; 8-оптимізатор для органів управління; 9- контролер управління системою.

Система працює наступним чином. Електроенергія від вітрогенератора 1 при швидкості вітру V_v та сонячна енергія з інтенсивністю I_{cb} , що падає на площину геліополя 2, перетворюються в КСЕП у теплову енергію. Повітря нагнітається вентилятором 4 по повітропроводам 6 до КСЕП і там нагрівається до температури $T_{к.к.}$ після чого подається до споживача 7. У разі недостатнього прогріву повітря від вітрової та сонячної енергії вмикається джерело електроенергії (мережа 220В), яка догріває абсорбер КСЕП орієнтуючись на необхідну температуру $T_{к.к.}$. При надлишковій температурі повітря за колектором повітря (або його частина) направляється в твердотільний насадковий акумулятор теплоти [3,144], тим самим заряджаючи його до температури T_A . При недостатньому прогріві повітря, але при зарядженому АТ передбачена можливість нагріву повітря в ньому, так проходить його розрядка. Регулювання потоків повітря здійснюється за рахунок повітряних заслінок 3 типу VAV-терміналів [20,102, 104], завдання яких підтримувати постійну витрату повітря через КСЕП та перерозподіляти маси повітря між АТ і споживачем. Відповідність роботи заслінок здійснюється оптимізатором 8. Система може працювати як у режимі рециркуляції так на 100% зовнішньому повітрі. Для забезпечення споживача гарячою водою в системі передбачено тепловий насос повітря-вода з двома випарниками: один розміщений у навколишньому середовищі; другий у верхній частині АТ (положення визначається з розрахунку стратифікації у АТ [15]).

Загальне управління системою здійснюється контролером, який контролює мережне джерело електроенергії для КСЕП, температуру повітря за КСЕП, температуру повітря перед споживачем, за споживачем, температуру навколишнього середовища, температуру в АТ, роботу оптимізатора заслінок.

Режими роботи системи тепlopостачання з КСЕП на прикладі невеликої офісної споруди. Система має 3 режими роботи на опалення і два режими роботи на ГВП: КСЕП-АТ, КСЕП-споживач, АТ-споживач і АТ-ТН-

ГВП, НС-ТН-ГВП. Необхідну температуру повітря у системі забезпечує КСЕП і/або АТ. В КСЕП по суті маємо три джерела енергії – це сонячне випромінювання, вітрова електроенергія та електроенергія від мережі. У випадку необхідності опалення будівлі в ясний сонячний день або з рідкою перемінною хмарністю при $T_{К.К.}$ після повітропідігрівача більше 35°C повітря подається для опалення в приміщення, де асимілюється і при $T_{РП} = 20^{\circ}\text{C}$ забирається назад до КСЕП. При температурі внутрішнього повітря $T_{В.П.} > 20^{\circ}\text{C}$ (відсутня потреба у опаленні) і незарядженому акумулятору, підігріте повітря після колектора подається до АТ для його зарядки, а якщо акумулятор заряджений то вмикається ТН вода-повітря для приготування гарячої води на потреби ГВП. У випадку відсутності сонячної енергії (часта хмарність або похмурий день) при зарядженому АТ і необхідності опалення ($T_{А.Т.} > 35^{\circ}\text{C}$) система працює у другому режимі, тобто повітря подається із АТ в приміщення, що опалюється, а рециркуляційне повітря назад в АТ. При відсутності потреби в опаленні система використовує тепловий потенціал підігрітого повітря використовується для приготування гарячої води.

Розробити універсальну режимну карту роботи системи теплопостачання з КСЕП не видається можливим, тому що запропонована принципова схема системи теплопостачання з КСЕП дуже гнучка, що дозволяє трансформувати її, викидаючи функціональні елементи, в залежності від умов експлуатації та призначення системи теплопостачання. Так, сам КСЕП без акумулятора, вітрогенератора, теплового насоса можна використовувати для повітряного опалення чи в ролі калорифера для системи вентиляції. Режимні карти для систем із комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем необхідно розробляти безпосередньо під конкретні випадки застосування, опираючись на подальші дослідження, які проведені в роботі.

1.6 Висновки

1. Проведений огляд існуючих повітряних геліосистем теплопостачання. Визначено основні переваги повітряних систем над рідинними та означено можливості ефективного використання енергії сонця для потреб теплопостачання.
2. Проаналізовано відомі методи розрахунку повітряних геліосистем. Більшість з розглянутих методів не дають можливості представити в простій аналітичній формі залежність коефіцієнта заміщення від різних чинників, що ускладнює оптимізацію систем сонячного теплопостачання і визначення областей раціонального використання сонячної енергії в масштабах країни.
3. Глибоко проаналізовано конструкції сонячних повітрянонагрівачів, що виробляються у світі. Визначено головні недоліки відомих конструкцій та вивчено відомі шляхи їх удосконалення, на основі патентних досліджень.
4. Виявлено, що для подальшого розвитку геліотехніки необхідно провести пошук нових неметалевих матеріалів для виробництва абсорберів геліоколекторів з тим, що при збереженні їх енергетичної ефективності знизити вартісні та будівельно-монтажні характеристики.
5. Запропоновано принципово нову схему системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем. Джерелами енергії в ній слугують сонячна енергія та електроенергія від вітрогенератора, що дозволить збільшити річну частку теплової енергії, що заміщується за рахунок нетрадиційних видів енергії.
6. Означена необхідність розробки методики інженерного розрахунку системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем, де б враховувався вплив енергії вітру на ефективність системи.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБІНОВАНОГО СОНЯЧНО- ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОВІТРОПІДГРІВАЧА

В розділі приведено теоретичні дослідження теплових характеристик, процесів теплообміну між ВТП укладеному у повітропідігрівач та омиваючим його повітрям, аеродинамічних характеристик КСЕП.

2.1 Комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач

Для використання запропонованої схеми теплопостачання необхідно розробити відповідний сонячно-електричний повітропідігрівач. Для того щоб підігрівати абсорбер КСЕ електростумом його матеріал з якого він виготовлений повинен бути електропровідним, але мати достатній електричний опір. Теплова потужність визначається із закону Джоуля-Ленца[31]

$$Q = i^2 R t, \quad (2.1)$$

де: Q – потужність нагріву, Дж;

i – сила струму на ділянці, А;

R – електричний опір ділянки, Ом.

t – час підведення електроенергії, с.

Це означає, що при відповідному електричному можна обходитися відносно малими та безпечними силами струмами. Перевага повітряних КСЕ над рідинними заключається також у можливості безпечного прямого пропускання електричного струму через абсорбер, тому що повітря не проводить електричний струм.

З урахуванням вище сказаного для абсорбера КСЕП висуваються вимоги як до сонячних теплових колекторів та електронагрівачів. По-перше, високу поглинаючу здатність сонячного випромінювання, на рівні $A_s \geq 0,9$ [29, 70], це забезпечується властивостями поверхні світлосприйняття, тобто природної селективності. По-друге, мати розвинену поверхню теплообміну з тим, щоб інтенсифікувати теплообмін між абсорбером і омиваючим його повітрям [44,90]. По-третє, володіти відповідними

фізичними властивостями: мала вага, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, термостійкість, а також мати низьку вартість для більшої ліквідності геліосистеми [73]. Як для електронагрівача має бути достатній питомий електричний опір та спостерігатися стійкість до впливу електричного струму [23].

Для задоволення висунутих вимог було використано вуглеграфітове трикотажне полотно, що вироблено в Інституті проблем матеріалознавства НАНУ ім. Францевича під маркою УТП, ринковим аналогом такого полотна є полотно типу УРАЛ-ТР (ГОСТ 28005-88), що випускається білоруськими та російськими фабриками напрямку «хімволокно»[49, 69] (Рис. 2.1). Використання вуглеграфітових волокон, карбонізованих і графітізованих тканин та вуглецевого паперу у якості електропідігрівачів відоме [23], що зумовлено питомим електричним опором вуглецевих волокон, термо- та електростійкістю. Сфери використання різноманітні: гнучкі нагрівачі для технологічних процесів при бетонуванні; медичинські теплі ковдри та інші грілки; опалювальні елементи для «теплих підлог» та «теплих стін». Фізико-хімічні властивості полотна УТП надані виробником та перевірені на акредитованій випробувальній лабораторії ПрАТ «Волтекс-Меланж» в м. Луцьк (Дод.3). Характеристики цього полотна приведено в таблиці 2.1.

Теплотехнічні характеристики ВТП (теплопровідність, температуропровідність і т.д.) відповідають традиційним металам, що використовуються у геліотехніці для виготовлення абсорберів. Порівняльна характеристика приведена в табл.2.2.

Виробництво ВТП зосереджено в країнах ближнього зарубіжжя (Білорусь, Російська Федерація), а також є невеликі потужності в Україні, зокрема на дослідному виробництві Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України при відділі композиційних матеріалів і ці потужності на жаль не задіяні.

Технічні характеристики вуглеграфітового трикотажного полотна

№ n/n	Характеристика	Розмірність	Значення
1	Поверхнева щільність (вага 1 м ²)	кг/м ²	1597
2	Питомий поверхневий електричний опір	Ом	0,4·10 ⁴
3	Повітропроникність	Дм ³ /(м ² с)	90(72-108)
4	Вогнестійкість	сек	(вогнестійка)
5	Товщина полотна	мм	3-4
6	Вміст вуглецю	%	98,5
7	Вміст золи	%	1,5
8	Середня теплопровідність волокна	Вт/(м К)	287
9	Теплоємність волокна	кДж/(кг К)	0,72
10	Температуропровідність волокна	м ² /с	0,181
11	Водопоглинання	%	132,6
12	Залишкова деформація по довжині	%	4
13	Залишкова деформація по ширині	%	7
14	Кількість петельних (на 10 см)	шт.	56
	- рядків		
15	Розтяжність при навантаженнях, що менше розривних	%	19
	- по довжині		
16	Кислотостійкість (зменшення розривного навантаження)	%	2,4
	H ₂ SO ₄ – 20%		
	H ₂ SO ₄ – 50%		



1



2

Рис. 2.1. Загальний вид вуглеграфітового трикотажного полотна: 1- досліджуване ВТП, що вироблене ППМ НАНУ ім. Францевича; 2- тканина марки УРАЛ-ТР (ГОСТ 28005-88) виробництва ОАО «СветлогорскХимволокно» (г. Светлогорск, Республіка Білорусь).

Порівняльна характеристика ВТП і традиційних для геліотехніки металів

Назва характеристики	Алюміній	Мідь	Сталь	Вуглеграфітове полотно УТП
Теплопровідність, Вт/(м·К)	211	385	47,6	287
Теплоємність, кДж/(кг·К)	0,93	0,385	0,46	0,72
Густина, кг/м ³	2675	8795	7850	2200
Температуропровідність, м ² /с	0,085	0,114	0,008	0,181
Електричний опір, Ом·м · 10 ⁴	0,0271	0,0175	0,14	0,4
Необхідність селективного покриття	Так	Так	Так	Ні

Згідно [3, 12, 29] підвищення ефективності сонячних теплових колекторів пов'язано з інтенсивністю відведення тепла (теплозйому) від поверхні абсорбера і світлопрозорого покриття, а також від внутрішньої поверхні теплоізоляції корпусу.

Один із шляхів підвищення теплопродуктивності сонячних повітропідігрівачів - це оребрення і гофрування поверхні абсорберів. Дякуючи збільшенню поверхні теплообміну абсорбера досягається підвищення коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{абс}$ поверхні поглинаючого елемента, віднесеного до фронтальної поверхні укладення. Так, при V-подібному гофруванні (Рис. 2.2) поверхні абсорбера сонячного повітронагрівача термічна ефективність (або ККД) $\eta_{кстп}$ і приведений коефіцієнт тепловтрат U_L розраховуються з врахуванням [146]

$$\alpha_{абс.гоф} = \frac{\alpha_{абс.пр}}{\sin \frac{\gamma}{2}} \quad (2.2)$$

де: $\alpha_{абс.пр}$ - коефіцієнт тепловіддачі прямо вкладеного абсорбера, Вт/(м²К);

$\alpha_{абс.гоф}$ - коефіцієнт тепловіддачі гофровано вкладеного абсорбера, Вт/(м²К);

γ – кут розкриття гофр, $^{\circ}$.

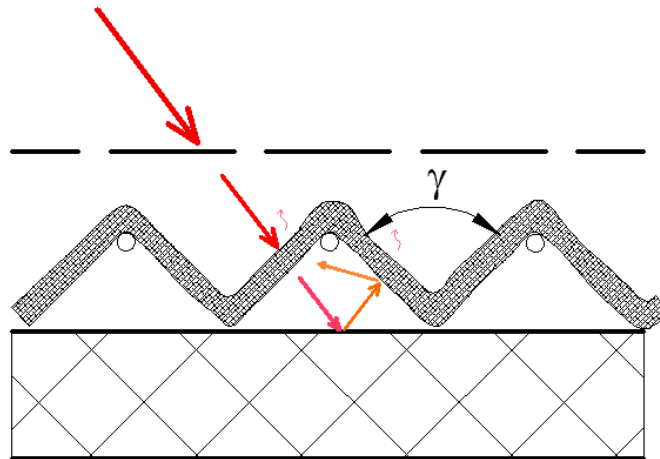


Рис. 2.2. Гофрована укладка ВТП в сонячному повітропідігрівачі

Як показують відносно нескладні розрахунки, при гофруванні під кутом розкриття 90° коефіцієнт конвективної тепловіддачі поверхні абсорбера, віднесений до одиниці фронтального укладення, збільшиться в 1,414 рази, що призведе до значного підвищення $\eta_{\text{ксп}}$.

Друга, не менш важлива перевага гофрування – зменшення теплообміну випромінюванням між абсорбером та світлопрозорим покриттям. Сонячні промені, що проходять через світлопрозоре покриття і поглинаються гофрованою поверхнею, проходять ряд взаємних відбиттів як між суміжними гофрами, так і між гофрованою поверхнею абсорбера і внутрішньою поверхнею світлопрозорого покриття. Це в свою чергу приводить до збільшення поглинаючої здатності поверхні абсорбера відносно сонячного випромінювання і одночасно до збільшення степені чорноти у відношенні довгохвильової частини спектру [29].

Результати досліджень [128] показують, що гофрована поверхня дозволяє істотно покращити ефективність частково селективної поверхні (якою безумовно являється ВТП). Наприклад, якщо поверхня з поглинаючою здатністю $A_s = 0,6$ і довгохвильовому випромінюванню $\varepsilon_p = 0,05$, то гофрування з кутом розкриття 55° дає середню ефективність поглинання 90% і довгохвильове 10%.

Необхідно відмітити також, що надмірне зменшення кута розкриття гофр з метою збільшення поверхні теплообміну абсорбера призводить до негативних результатів. Згідно [114] існує оптимальна відстань між стінками гофр, нижче яких значно зменшиться значення коефіцієнту тепловіддачі від абсорбера до омиваючого його повітря і значно збільшити аеродинамічний опір. Використання ВТП звісно виключає можливість оребрення поверхні абсорбера.

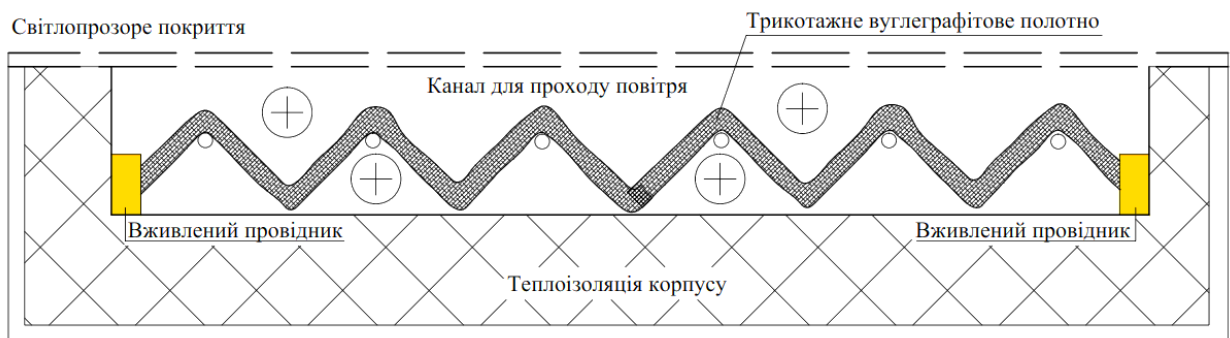


Рис. 2.3. Принципова схема комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача

2.2 Удосконалена фізична модель теплообмінних процесів в повітропідігрівачу

В результаті патентних та літературних досліджень було розроблено принципову конструкцію КСЕП [77], яка аналогічна традиційним плоским сонячним колекторам. Вона являє собою дерев'яний ящик розміром 1250x550x100 з торцевими отворами по стороні 550 розміром 300x20 для підведення та відведення повітря. На дно ящика укладено теплоізолюючий матеріал товщиною 80мм, на яку вкладено світловідбиваючу плівку. Бокові борти ящика теплоізолювані товщиною 20мм. На ізоляції дна укладено світловідбиваюче покриття товщиною 0,1мм. На світловідбиваюче покриття укладено ВТП, що описане в розділі 2.1, в бокові краї якого полотна живлено мідні провідники. Ящик накрито світлопрозорим покриттям (віконним склом товщиною 5мм). Герметизація стику скла і ящика здійснена за допомогою гумового ущільнювача та силіконового гелю. В торцеві

сторони ящика в отвори вмонтовано адаптери для переходу на пластиковий повітровід 200x60.

Принципова конструкція повітропідігрівача захищена патентом на корисну модель [77].

Принцип роботи КСЕП полягає в наступному. Сонячні промені, що проходять через світлопрозоре покриття 1, потрапляють на абсорбер 3, частково проникаючи на світловідбиваюче покриття, від якого відбиваючись поглинається все тим же абсорбером 3. Капілярно пориста структура та нерівності укладки ВТП сприяють підвищенню поглинаючої здатності абсорбера, забезпечуючи, так звану, природну селективність.

Через вживлені провідники на абсорбер подається постійний електричний струм. За рахунок електричного опору ВТП електроенергія перетворюється в енергію теплову.

Повітря, що пропускається через КСЕП, контактує з ВТП, омиваючи його та проходячи наскрізь, та нагрівається. Для представлення процесів теплообміну, що відбуваються у комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачу, розроблена його фізична модель (Рис. 2.4). Абсорбер, нагрітий за рахунок СЕ та ЕЕ, віддає теплоту шляхом вимушеної конвекції повітрю, що омиває вуглеграфітове трикотажне полотно, а також шляхом теплового випромінювання світлопрозорому покриттю зверху і світловідбиваючому покриттю знизу. Теплові втрати КСЕП відбуваються теплопровідністю через світлопрозорий матеріал, а потім конвекцією та випромінюванням до навколишнього середовища, а також теплопровідністю через теплову ізоляцію та корпус, а потім конвекцією та випромінюванням назовні.

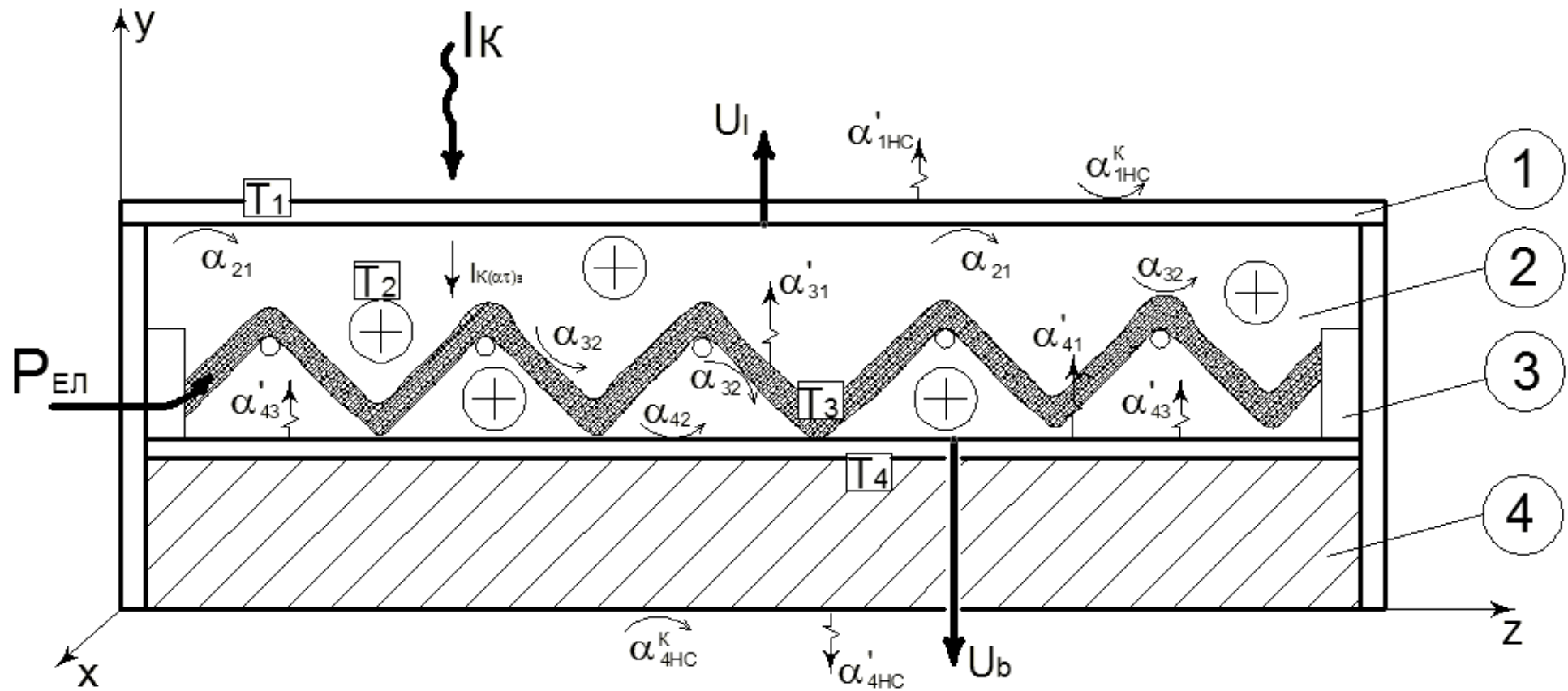


Рис. 2.4. Фізична модель теплообмінних процесів комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача:
 1 - світлопрозоре покриття; 2 - повітря(напрямок руху якого перпендикулярний площині зображення); 3 - абсорбер з
 ВТП; 4 - тепла ізоляція повітропідігрівача

2.3 Побудова математичної моделі процесів теплообміну в повітропідігрівачі

Метою математичної моделі КСЕП є визначення його теплової потужності, температури повітря після повітропідігрівача, температури поглинаючого елемента, світлопрозорого покриття та теплової ізоляції. Виходячи з фізичної постановки задачі (Рис. 2.4), очевидно, що нестационарність процесу заключається в зміні температури повітря по координаті x та зміні температури поглинаючого елемента за часом t .

При розробці математичної моделі КСЕП зроблені наступні розрахунки та припущення:

1. Виявлено, що теплова потужність комбінованого повітропідігрівача з поглинаючим елементом із вуглеграфітового трикутного полотна, у порівнянні з колектором сонячної енергії з поглинаючим елементом із пласкої пластини в період дня більш рівномірна. Це обумовлено пористо-капілярною структурою ВТП.

При використанні пласкої пластини як абсорбера мінімум сонячної радіації поглинається із сходом та заходом сонця, коли промені направлені під кутом до площини поглинаючого елемента, і максимум о півдні, коли промені падають по нормалі.

2. При непрякій укладці ВТП, площа абсорбера буде більшою ніж площа поверхні КСЕП. Коефіцієнт збільшення буде залежати від способу укладки ВТП.

3. В нестационарній математичній моделі нехтуються втрати теплоти через теплоізовані торцеві стінки.

4. Зміна температури елементів колектору і теплоносія по осям y і z не враховуються.

Математична модель досліджуваного КСЕ базується на рівняннях балансу енергії його елементів – поглинаючого елемента, застосування, теплової ізоляції, покритої світло відбиваючим матеріалом, і теплоносія (повітря).

З врахуванням вищенаведених припущень і визначенням рівняння балансів енергії елементів КСЕП має наступний вигляд:

1. Для поглинаючого елемента

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} \cdot c_3 = I_C(\tau\alpha)_e + P_{EL} - 2 \cdot a_3 \cdot (T_3 - T_2) - \varepsilon''_{II} \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_4^4) - \varepsilon'_{II} \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_1^4), \quad (2.3)$$

де: T_3 – температура абсорбера, К;

c_3 – теплоємність абсорбера, Дж/(К·м²);

$I_C(\tau\alpha)_e$ – сумарна інтенсивність сонячного випромінювання, що поглинається абсорбером, Вт/м²;

P_{EL} – електрична потужність, що підводиться до абсорбера, Вт;

T_2 – температура повітря, К;

ε'_{II} – приведена ступінь чорноти системи тіл, що складається із ПК та СТ;

ε''_{II} – приведена ступінь чорноти системи тіл, що складається із ПК та ПІ, покритої світло відбиваючим покриттям;

σ – постійна Стефана-Больцмана, рівна $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

T_1 – температура світлопрозорого покриття, К;

T_4 – температура світловідбиваючого покриття, К.

Приведена ступінь чорноти системи тіл, що складається із абсорбера та світлопрозорого покриття, визначається із рівняння

$$\varepsilon'_{II} = \left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{F_3}{2 \cdot F_1} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \right)^{-1}, \quad (2.4)$$

де: ε_3 – ступінь чорноти абсорбера;

F_3 – площа абсорбера, вкладеного в 1 м² повітропідігрівача, м²;

F_1 – площа світлопрозорого покриття КСЕП, м².

Приведена ступінь чорноти системи тіл, що складається із абсорбера та світловідбиваючого матеріалу, визначається із рівняння:

$$\varepsilon''_{II} = \left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{F_3}{2 \cdot F_1} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon'_4} - 1 \right) \right)^{-1}, \quad (2.5)$$

де: ε'_4 – ступінь чорноти світловідбиваючого матеріалу;

2. Для світлопрозорого матеріалу (засклення)

$$U_l \cdot (T_1 - T_{HC}) + \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_{HC}^4) = \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) + \varepsilon'_n \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_1^4), \quad (2.6)$$

де: U_l – коефіцієнт теплових втрат через світлопрозоре покриття, Вт/(м²·К);

ε_1 – ступінь чорноти світлопрозорого покриття.

Коефіцієнт теплових втрат через засклення визначається з рівняння:

$$U_l = \left(\frac{1}{\alpha_{1HC}} + \frac{\delta_{СП}}{\lambda_{СП}} \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

де: α_{1HC} – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні СП

до навколишнього середовища, Вт/(м²·К);

$\delta_{СП}$ – товщина засклення, м;

$\lambda_{СП}$ – коефіцієнт теплопровідності скла, Вт/(м·К).

Значення α_{1HC} залежить від швидкості вітру над площиною КСЕП [29]:

$$\alpha_{1HC} = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (2.8)$$

де v – швидкість вітру над площиною КСЕП, м/с.

3. Для теплової ізоляції, покритої світловідбивним матеріалом:

$$U_b \cdot (T_4 - T_{HC}) + \varepsilon_4 \cdot \sigma \cdot (T_4^4 - T_{HC}^4) = \alpha_2 \cdot (T_2 - T_4) + \varepsilon'_n \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_4^4) \quad (2.9)$$

де U_b – коефіцієнт теплових втрат через світло відбиваюче покриття, теплову ізоляцію та корпус, Вт/(м²·К);

ε_4 – ступінь чорноти корпусу КСЕ.

Коефіцієнт теплових втрат U_b визначається з рівняння:

$$U_b = \left(\frac{1}{\alpha_{4HC}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

де α_{4HC} – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу до навколишнього середовища, Вт/(м²·К);

δ_i – товщина і-го компонента теплової ізоляції, м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го компонента теплової ізоляції, Вт/(м·К).

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від зовнішньої поверхні корпусу до навколишнього середовища α_{4HC} визначається за формулою (2.8).

4. Для теплоносія (повітря)

$$h \cdot (c_p \cdot \rho)_2 \cdot v_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = (-2 \cdot \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) - \alpha_4 \cdot (T_2 - T_4)) \quad (2.11)$$

де c_p – ізобарна теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

ρ – густина повітря, кг/м³;

v_2 – швидкість повітря, м/с;

h – відстань від застклення до теплової ізоляції, покритою світло відбиваючим матеріалом, м.

Ввівши коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням

$$\begin{aligned} \alpha'_1 &= \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_{HC}) \cdot (T_1^2 + T_{HC}^2), \\ \alpha'_2 &= \varepsilon'_I \cdot \sigma \cdot (T_3 + T_1) \cdot (T_3^2 + T_1^2), \\ \alpha'_3 &= \varepsilon''_I \cdot \sigma \cdot (T_3 + T_4) \cdot (T_3^2 + T_4^2), \\ \alpha'_4 &= \varepsilon_4 \cdot \sigma \cdot (T_4 + T_{HC}) \cdot (T_4^2 + T_{HC}^2), \end{aligned} \quad (2.12)$$

Рівняння (2.3), (2.6), (2.9), (2.11) можна привести до системи диференційних та алгебраїчних рівнянь

$$c_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = I_{PE} - \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - \alpha'_2 \cdot (T_3 - T_1) - \alpha'_3 \cdot (T_3 - T_4), \quad (2.13)$$

$$(c_p \cdot \rho)_2 \cdot q \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = -\alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) - \alpha_4 \cdot (T_2 - T_4), \quad (2.14)$$

$$U_l \cdot (T_1 - T_{HC}) = \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) + \alpha'_2 \cdot (T_3 - T_1) - \alpha'_1 \cdot (T_1 - T_{HC}), \quad (2.15)$$

$$U_b \cdot (T_4 - T_{HC}) = \alpha_4 \cdot (T_2 - T_4) - \alpha'_3 \cdot (T_3 - T_4) - \alpha'_4 \cdot (T_4 - T_{HC}), \quad (2.16)$$

де $I_{PE} = I_C(\tau\alpha)_E$; $\alpha_3 = 2 \cdot \alpha_{32}$; $q = v \cdot h$; $\alpha_1 = \alpha_{12}$; $\alpha_4 = \alpha_{42}$.

Розв'язуючи систему диференційних рівнянь (2.13) - (2.16) методом послідовних наближень [10, 72, 78] з початковими умовами:

$$t = 0, 0 \leq x \leq L, T_i = T_{HC} = \text{const} (i = 1, 4)$$

та крайовими умовами:

$$t > 0, x = 0, T_2 = T_{HC} = const$$

отримуємо наступні вираження T_i :

$$T_1(x, t) = B_0 \cdot T_{HC} + c_0 \cdot T_3 + d_0 \cdot T_3, \quad (2.17)$$

$$T_2(x, t) = T_{HC} + (T_{2max} - T_{HC}) \cdot (1 - e^{-\alpha x}), \quad (2.18)$$

$$T_2(x, t) = T_{HC} + (T_{3max} - T_{HC}) \cdot (1 - e^{-pt}), \quad (2.19)$$

$$T_1(x, t) = B_1 \cdot T_{HC} + c_1 \cdot T_3 + d_1 \cdot T_2, \quad (2.20)$$

де

$$T_{3max} = (I + B_0) / (p \cdot c_3); \quad (2.21)$$

$$B_0 = \alpha_3 \cdot T_2 + \alpha'_2 \cdot T_1 + \alpha'_4 \cdot T_4; \quad (2.22)$$

$$p = (\alpha_3 + \alpha'_2 + \alpha'_3) / c_3; \quad (2.23)$$

$$T_{2max} = (\alpha_1 \cdot T_1 + \alpha_3 \cdot T_{3max} + \alpha_4 \cdot T_4) / (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4); \quad (2.24)$$

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4) / (c_p \cdot \rho)_2 \cdot q; \quad (2.25)$$

$$B_0 = (U_l + \alpha'_1) / p_0, c_0 = \alpha'_2 / p_0, d_0 = \alpha'_1 / p_0, \quad (2.26)$$

де

$$p_0 = U_l + \alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha'_1; \quad (2.27)$$

$$b_1 = (U_b + \alpha'_4) / p_1, c_1 = \alpha'_3 / p_1, d_1 = \alpha_4 / p_1, \quad (2.28)$$

де

$$p_1 = U_b + \alpha_4 + \alpha'_3 + \alpha'_4. \quad (2.29)$$

В зв'язку з тим, що коефіцієнти рівнянь (2.17)-(2.29) $p_0, p_1, p_2, B_0, c_0, d_0, B, c, d$, а також α'_i (2.12) залежать від температури елементів КСЕП в даний момент часу, отримуємо значення T_i , розраховане за початковими температурами T_{HC} , необхідно уточнювати до повної збіжності. Розрахунок температур для конкретних вихідних даних та теплофізичних характеристик елементів комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача, що для практичних розрахунків температур елементів КСЕП достатньо точними є значення, отримані на другому кроці уточнення. З іншого боку при великих інтервалах часу (показник степені $pt \geq 10$) рівняння ((2.19)) може бути представлено у вигляді:

$$T_3(x, \infty) = T_{3max} = (I + B_0) / (\alpha_3 + \alpha'_2 + \alpha'_3). \quad (2.30)$$

При значеннях показника степені $pt \geq 10$ в рівнянні (2.18), тобто при великих значеннях x або дуже малих швидкостях руху повітря, температура може бути визначена з рівняння:

$$T_2(\infty, t) = T_{2\max} = (\alpha_1 \cdot T_1 + \alpha_3 \cdot T_3 + \alpha_4 \cdot T_4) / (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4). \quad (2.31)$$

Приведені рівняння (2.17) - (2.20), (2.30), (2.31) добре реагують на зміну початкової температури, коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнтів теплових втрат, а також інтенсивності сонячного випромінювання.

Так, наприклад, якщо задати денний прихід інтенсивності сонячного випромінювання косинусоїдальною залежністю

$$I(t) = I_{\max} \cdot \cos \pi t / T, \quad (2.32)$$

то температура поглинаючого елемента може бути визначена з наступного рівняння:

$$T_3(x, t) = T_0^{-pt} + \left[\begin{aligned} & I_{\max} / \left(1 + \frac{\pi}{pt}\right)^2 \cdot \left(\cos \frac{\pi t}{T} + \frac{\pi}{pt} \cdot \sin \frac{\pi t}{T} - e^{-pt} \right) \\ & + B_0 \cdot (1 - e^{-pt}) \cdot (p \cdot c_3)^{-1} \end{aligned} \right]. \quad (2.33)$$

2.4 Теплові характеристики сонячного повітропідігрівача

Під час теоретичного дослідження КСЕП важливо визначити залежності між його основними тепловими характеристиками. Це дасть можливість вибрати оптимальну конструкцію та режим роботи.

Відомо, що ККД електронагрівачів складає близько 1, тому при визначенні ККД КСЕП можна представляти як ККД сонячного теплового колектору.

Миттєві значення ККД повітронагрівача визначають з відомого рівняння Хотела-Уіллера-Блісса [12, 29, 147, 84]

$$\eta_K = F' \cdot [(\tau\alpha)_{\text{з}} - U_L \cdot (T_{\text{пов.}} - T_{\text{н.с.}}) / I_c], \quad (2.34)$$

де: F' - коефіцієнт ефективності абсорбера;

$(\tau\alpha)_{\text{з}}$ - оптичний ККД сонячного повітропідігрівача;

U_L - загальний коефіцієнт теплових втрат КСЕП, Вт/(м²К);

$T_{ПОВ.}$ – середня температура повітря в нагрівачі, К;

I_C – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м².

Також миттєвий ККД визначається з рівняння

$$\eta_K = F_R \cdot [(\tau\alpha)_{\Xi} - U_L \cdot (T_{П.К.} - T_{Н.С.}) / I_C], \quad (2.35)$$

де: F_R – коефіцієнт відводу теплоти із КСЕ;

$T_{П.К.}$ – температура повітря на вході у підігрівач, К;

$T_{Н.С.}$ – температура навколишнього середовища, К.

З іншого боку ККД сонячного повітропідігрівача можна виразити так:

$$\eta_K = G \cdot c_p \cdot (T_{К.К.} - T_{П.К.}) / I_C, \quad (2.36)$$

де: $T_{К.К.}$ – температура повітря в кінці каналу, К.

Після певних математичних перетворень рівняння (2.35) набуває виду

$$\eta_K = \frac{G \cdot c_p}{U_L \left[1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot U_L}{G \cdot c_p}\right) \right] \times \left[(\tau\alpha)_{\Xi} - U_L \cdot \left(\frac{T_{ПОВ} - T_{Н.С.}}{I_C}\right) \right]}. \quad (2.37)$$

Коефіцієнт відводу теплоти із КСЕ F_R можна визначити із виразу

$$F_R = \frac{G \cdot c_p \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot U_L}{G \cdot c_p}\right) \right]}{U_L}. \quad (2.38)$$

Розраховуючи теплові характеристики сонячного повітропідігрівача, важливо визначити оптимальні геометричні розміри його абсорбера (спосіб укладки трикотажного полотна) і оптимальну витрату повітря. При цьому критеріями оптимальності є максимальна температура повітря після повітропідігрівача $T_{П.К.}$ і його ККД η_K . На теплову ефективність сонячного теплового колектора впливають наступні параметри: витрата повітря; тип конструкції; поглинаюча здатність абсорбера; середньо-інтегральне значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і випромінюванням для елементів повітропідігрівача; температура навколишнього середовища; сумарна

інтенсивність сонячного випромінювання на абсорбер і швидкість вітру; температура повітря на вході в повітропідігрівач і фізичні властивості теплоносія (теплоємність, густина, теплопровідність і т.д.).

Процес тепловіддачі від абсорбера до повітря, яке його омиває, в залежності від режиму руху повітря, описується критеріальним рівнянням типу $Nu = C \cdot Re^n$. Конвективний теплообмін у повітряному сонячному повітропідігрівачі з пласким абсорбером при $10^4 \leq Re \leq 1,24 \cdot 10^5$ визначається з відомого рівняння Діттаса-Болтера[148]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,0199 \cdot Re^{0,8}. \quad (2.39)$$

Для турбулентного режиму руху повітря в пласкому каналі тепловіддача до повітря визначається по формулі М.А. Міхеєва ($Re \geq 10^5$)[62]

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} \cdot \varepsilon_l, \quad (2.40)$$

де: ε_l – коефіцієнт, що враховує вплив початкової теплової ділянки, який при $l/d_{екв} > 50$ рівний 1, а якщо $l/d_{екв} < 50$ то визначається з довідникової літературі.

Рівняння, що описує конвективний теплообмін між текстильними матеріалами та омиваючим його повітрям, зустрічаються у посібнику Луцика Р.В. та Малкіна Е.С. [57]

$$Nu = 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,43}, \quad (2.41)$$

Хоча для рівняння (2.41) і не наведено границі чисел Рейнольдса та тип текстильних матеріалів. В роботі зазначено, що зважаючи на еластичність полотна, відбувається її хвилеподібне коливання при обтіканні повітрям, що викликає турбулізацію потоку в цілому і зокрема у граничному шарі, тобто інтенсифікацію теплообміну. Ця інтенсифікація залежить від довжини прямої ділянки і степені її натягнутості [57].

Після визначення числа Нусельта визначається коефіцієнт тепловіддачі з виразу [62]

$$Nu = \frac{\alpha_{абс} \cdot D_{екв}}{\lambda_{нов}}, \quad (2.42)$$

де: α_{abc} - усереднений коефіцієнт тепловіддачі від ВТП до омиваючого його повітря, (Вт/м²К);

$\lambda_{нов}$ - коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м К)

Число Рейнольдса визначається наступним чином[62]

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{екв}}{\mu}, \quad (2.43)$$

де: $D_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналу, м;

ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість повітря у каналі, м/с;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Н·с/м².

Середньо-інтегральна швидкість повітря у каналі складає

$$v = \frac{G}{F_0 \cdot 3600}. \quad (2.44)$$

Еквівалентний діаметр для каналу частково заповненого капілярно-пористим матеріалом згідно визначення В.Каста:

Еквівалентний діаметр плоского каналу з частковим заповненням його простору визначається з рівняння [43]:

$$D_{екв} = \frac{4 \cdot F_0 \cdot \psi \cdot L}{F}, \quad (2.45)$$

де: F_0 – площа перерізу каналу, м²;

ψ – об'ємна доля пустот у каналі (пористість);

L – довжина омивання, м;

Пористість каналу визначається з виразу [43]:

$$\psi = 1 - \frac{V_{mk}}{V}, \quad (2.46)$$

де: V_{mk} – об'єм тканини в каналі (визначається способом Архімеда), м³;

V – об'єм каналу без тканини, м³;

Якщо коефіцієнти теплопровідності повітря і динамічної в'язкості прийняти постійними, то коефіцієнт тепловіддачі залежить лише від витрати повітря і геометричних особливостей абсорбера. Зміна витрати повітря G впливає на температуру повітря після колектора T_{KK} і його ККД через

коефіцієнт відводу теплоти F_R (2.34), (2.35). А зміна геометричної характеристики через еквівалентний діаметр впливає на ефективність теплообміну і відповідно на ККД КСЕП.

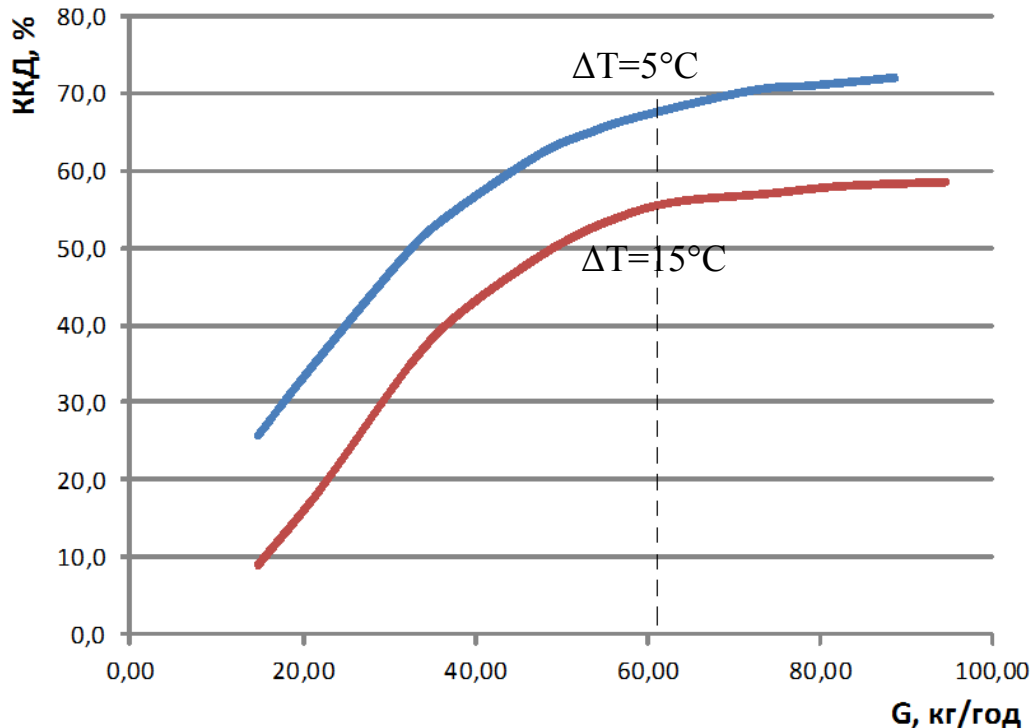


Рис. 2.5. Залежність ККД КСЕП від витрати повітря G при $I_c=700 \text{ Вт/м}^2$;
 $(\tau\alpha)_3=0,9$; $F'=0,89$; $U_L = 9,5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Очевидно, що на ефективність повітропідігрівача впливають і інші параметри. Наприклад, зниження загальних теплових втрат КСЕП U_L , що складаються із втрат через світлопрозоре покриття, бокові стінки і теплову ізоляцію знизу підвищує ККД (Рис. 2.7). Теплові втрати колектор а дуже сильно впливають на ефективність приладу і зміна їх числових значень створює необхідність повторення всіх обчислень для визначення теплових характеристик КСЕП. Коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням між елементами КСЕП залежать від їх фізичних властивостей (степені чорноти ϵ) і температур. Також параметр $(\tau\alpha)_3$ впливає на ефективність повітропідігрівача (2.33), (2.34).

На основі вказаних вище залежностей було проведено обчислення і можна стверджувати, що оптимальна витрата повітря через повітропідігрівач складає близько 60 кг/год або $0,038 \text{ кг/(с м}^2\text{)}$. З Рис.2.5 видно, що при

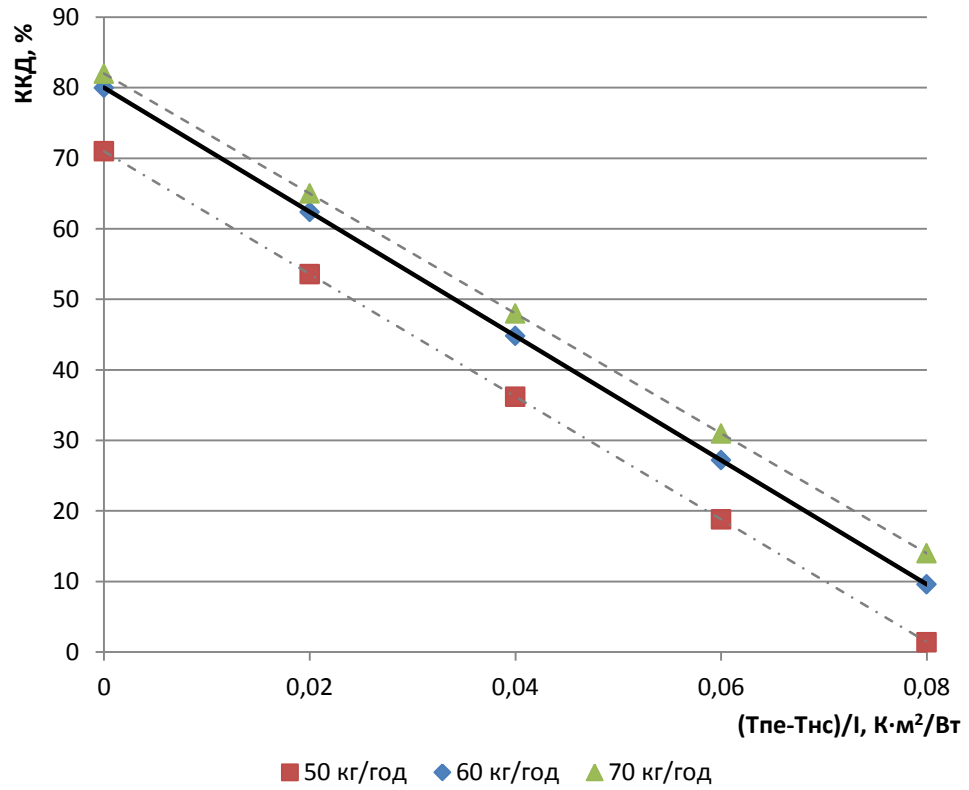


Рис. 2.6. Залежність ККД КСЕП від степені прогріву теплоносія $(T_{abc} - T_{нс})/I_c$.

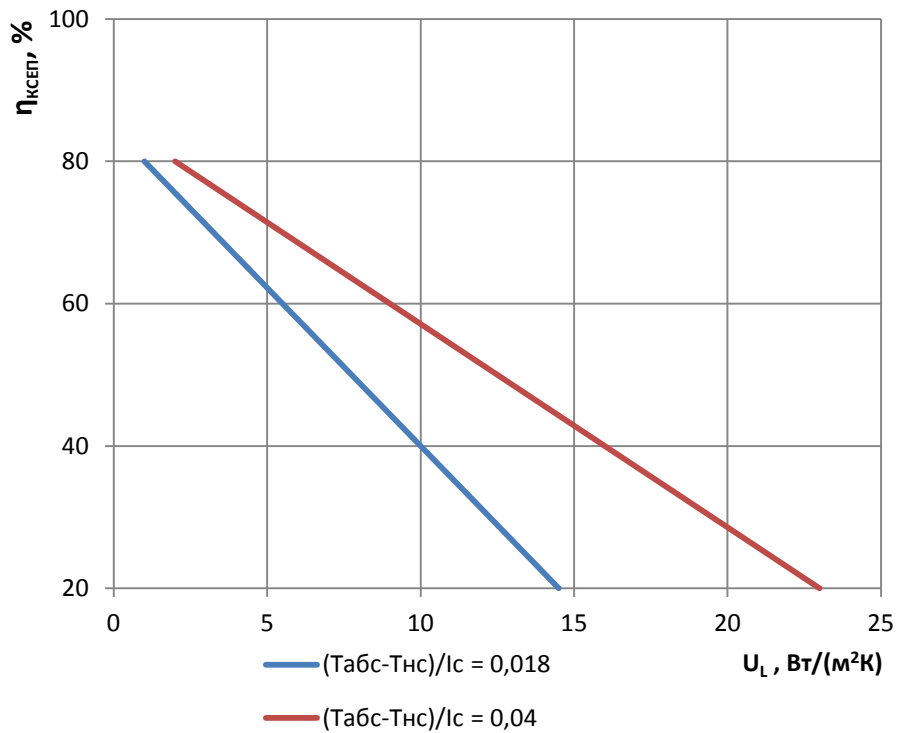


Рис. 2.7. Залежність ККД КСЕП від загального коефіцієнту теплових втрат повітропідігрівача при $(\tau\alpha)_{\exists}=0,9$; $F'=0,89$; $G=0,038$ кг/(с м²).

збільшенні витрати через КСЕП стрімко зростає і його ККД, а після зазначеного значення витрати ріст ККД майже не відбувається, натомість температура за повітропідігрівачем знижується, а, як видно з Рис. 2.6, при зменшенні прогріву повітря зменшиться і ККД.

З видно, що інтенсифікація теплообміну між абсорбером з вуглеграфітового трикотажного полотна та омиваючим його повітрям, тобто збільшення коефіцієнту тепловіддачі призводить до збільшення ККД повітропідігрівача, так же як збільшення коефіцієнту відводу теплоти від абсорбера – сусідньої величини.

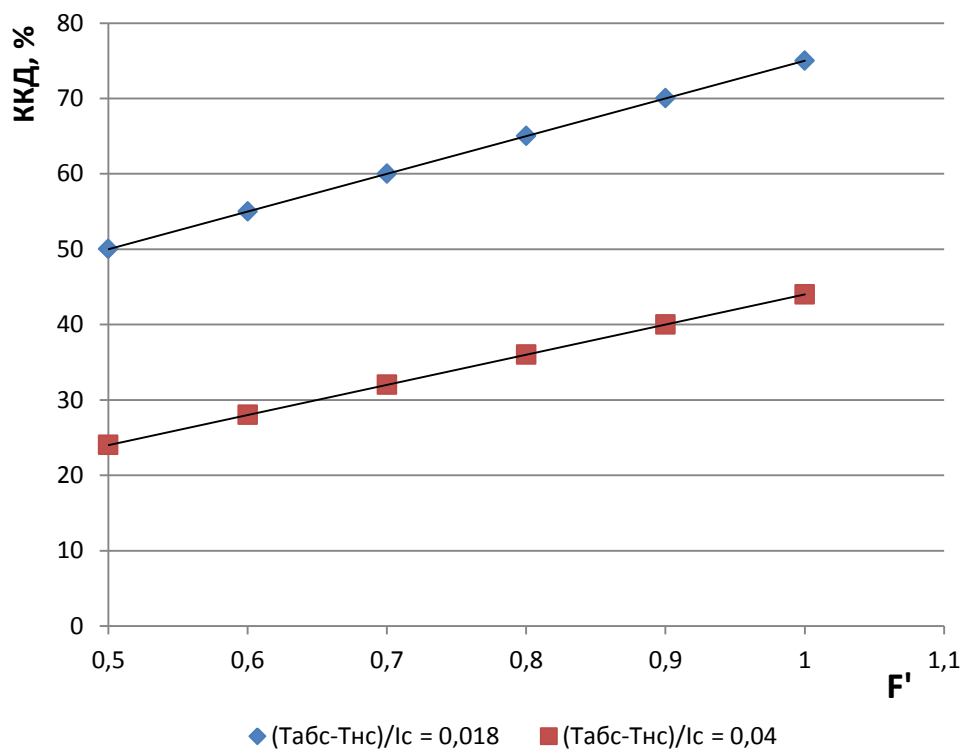


Рис. 2.8. Залежність ККД КСЕП від коефіцієнту відводу теплоти повітропідігрівача при $(\tau\alpha)_{\Xi}=0,9$; $G=0,038$ кг/(с м²).

Значення величин, що використовувались для розрахунку основних теплових характеристик комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача приведено в табл.2.3.

Середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією розраховувався з рівняння (2.42). В свою чергу критерій Нусельта визначався з рівняння (2.39), хоча всі вище згадані рівняння теоретично підходять для визначення числа

Нусельта, але, як видно з [1] потребують експериментального уточнення. Теплові втрати КСЕП визначалися з врахуванням омивання його вітром зі швидкістю 2 м/с. Через те, що повітряні сонячні колектори працюють, в основному, в діапазоні зміни $(T_{абс}-T_{нс})/I_c$ від 0,018 та 0,04, розрахунки проводилися для вказаних значень.

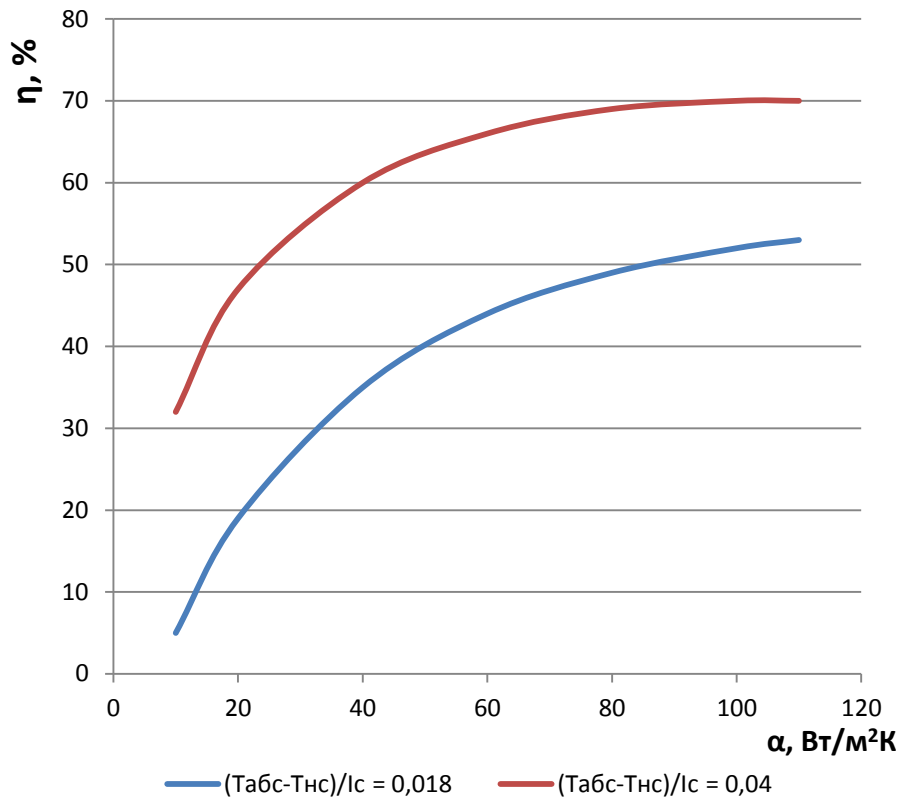


Рис. 2.9. Залежність ККД КСЕП від коефіцієнту тепловіддачі від абсорбера до омиваючого його повітря

Таблиця 2.3

Значення величин, що використовуються для визначення основних теплових характеристик КСЕП

Позначення величин	α	U_L	G	α'_1	α'_2	α'_3	α'_4	c_3	$(\tau\alpha)_\Xi$
Розмірність	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{кг}{год}$	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{Вт}{м^2 К}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	
Базові величини	60	10	60	4	4	4	0,2	720	0,89
Межі варіювання	10-110	0-25	10-110	2-6	2-6	2-6	0,1-0,4	-	-

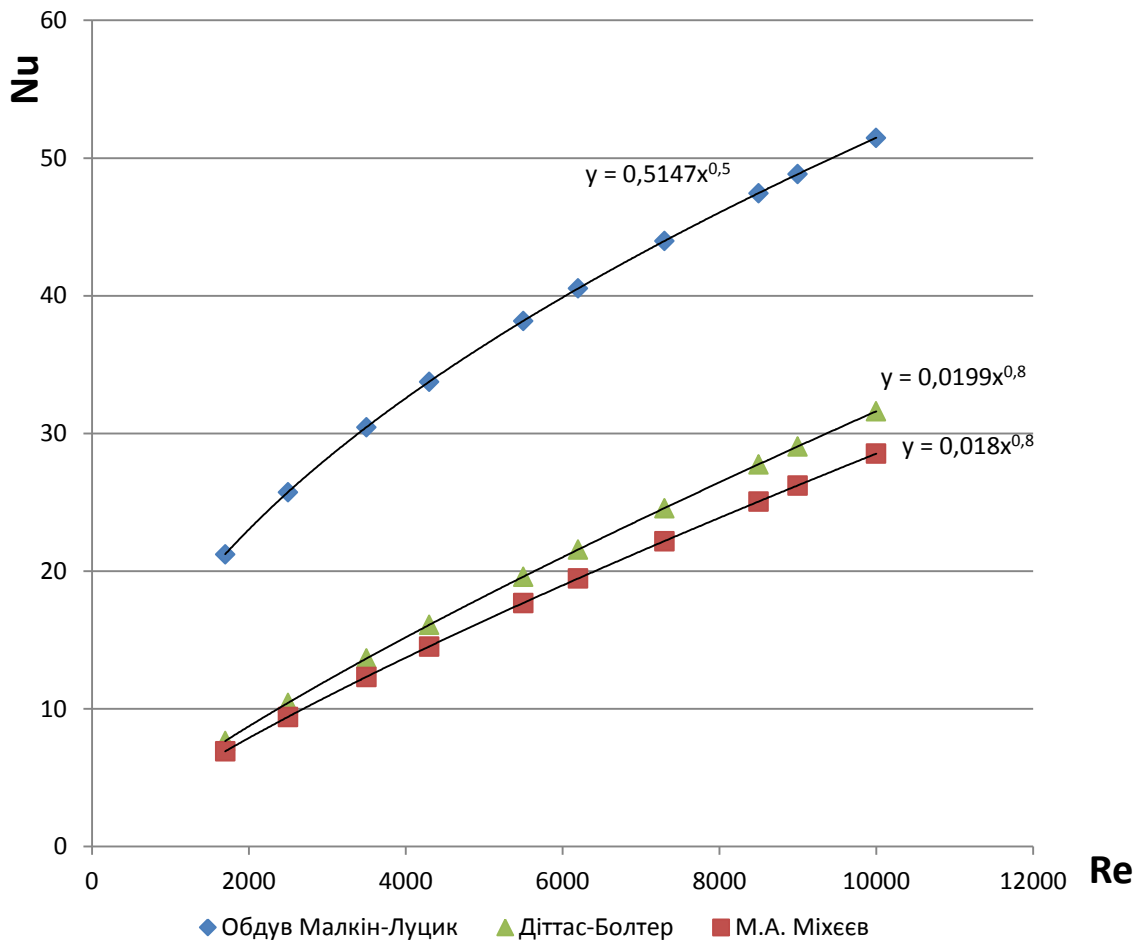


Рис. 2.10. Теоретичні залежності $Nu = f(Re)$ для плоскої поверхні та текстильних матеріалів.

Необхідно порівняти отримані залежності КСЕП з абсорбером із вуглеграфітового полотна з характеристиками існуючих конструкцій. В [147] наведено результати теоретичного дослідження трьох видів повітряних колекторів сонячної енергії з одинарним оскленням. Поглинаючим елементом у дослідженнях сонячних повітропідігрівачів є плоска сталеві пластина, а рух повітря організований у першому варіанті П1 над, у другому П2 під і в третьому П3 з обох сторін пластини. Залежності ККД від параметра $K=(T_{абс}-T_{не})/I_c$ представлена на Рис. 2.11. Результати отримані при однакових вихідних даних. Як видно з графіка, КСЕП ефективніший колекторів з абсорбером із плоскої пластини з проходженням повітря над та під пластиною і фактично однаковий з П3, де повітря проходить з обох сторін пластини.

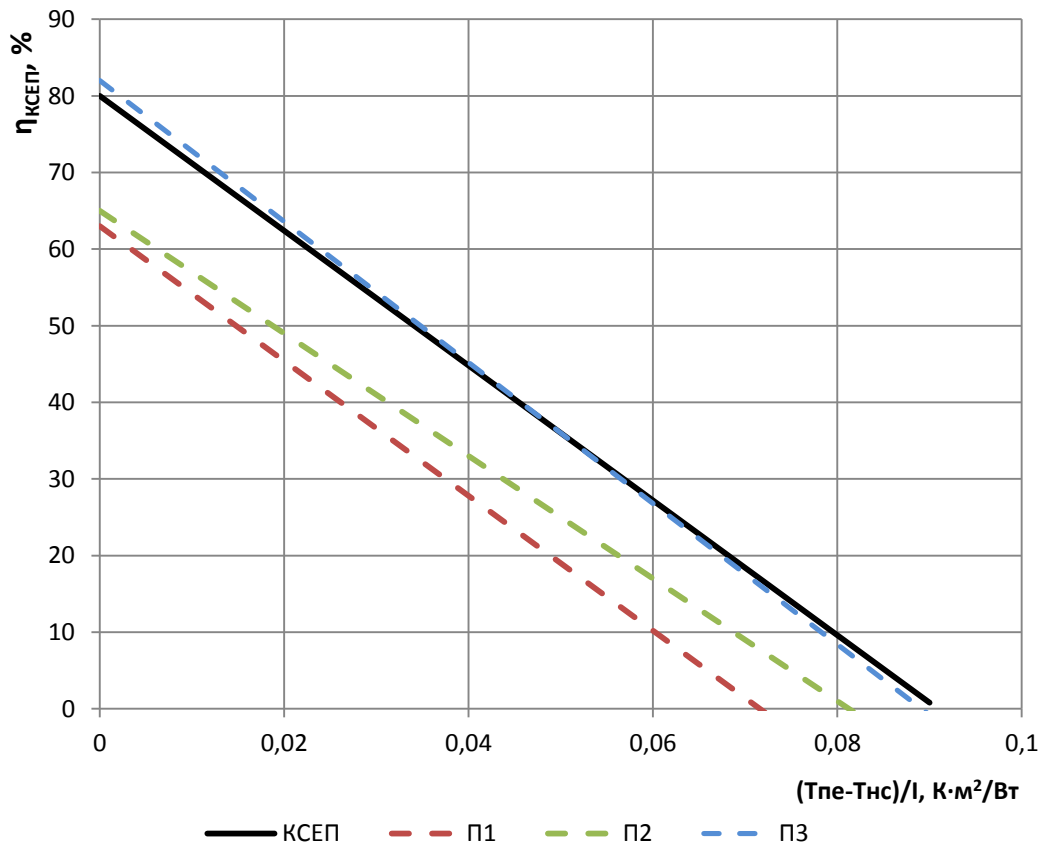


Рис. 2.11. Залежність ККД від степеню прогріву для відомих контактних повітропідігрівачів та КСЕП

2.5 Аеродинамічні характеристики повітропідігрівача з абсорбером із трикотажного полотна

Окрім теплових характеристик надзвичайно важливими є і аеродинамічні властивості сонячних повітропідігрівачів, оскільки при досягненні високої теплової ефективності можна значно збільшити аеродинамічний опір приладу, з тим що енергія затрачена на нагнітачу для подолання цього опору буде нівелювати всю ефективність теплообмінних процесів [3, 114].

Основною аеродинамічною характеристикою повітряних сонячних колекторів є їх аеродинамічний опір, визначивши який видається можливим підібрати тягодуттєвий агрегат (вентилятор). КСЕП можна представити у вигляді плоского повітропроводу нестандартного перерізу (через вкладену всередині ВТП). Так, згідно відомого рівняння Дарсі-Вейсбаха [108] загальні

втрати тиску на ділянці являють собою суму втрат тиску у місцевих опорах і втрат тиску на тертя по довжині

$$\Delta P_{\text{дiл.}} = \left(\chi \cdot \frac{l}{D_{\text{екв.}}} + \xi \right) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.47)$$

де: $\Delta P_{\text{дiл.}}$ – це втрати тиску на ділянці повітропроводу, Па;

χ – коефіцієнт гідравлічного тертя (в літературі позначається, як λ_m - вітчизняна або f - англomовна);

$D_{\text{екв.}}$ – еквівалентний діаметр, м;

ξ – коефіцієнт місцевого опору;

ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість повітря, м/с.

Ділянка повітропроводу, якою являється КСЕП, має два місцевих опори – це вхід ($\xi_{\text{вх.}}$) і вихід ($\xi_{\text{вих.}}$), що являють собою раптове розширення і раптове звуження поперечного перерізу. В свою чергу, робоча частина КСЕП – це плоский шорсткий канал, що утворений гладкими поверхнями світлопрозорого та світловідбиваючого покриттів та укладеного всередині вуглеграфітового трикотажного полотна (Рис. 2.12).

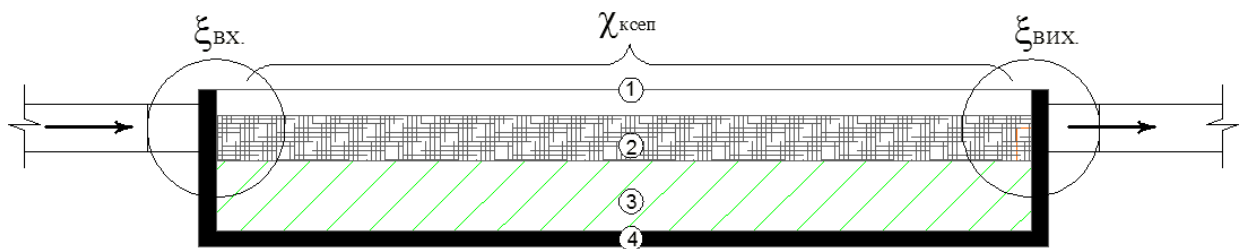


Рис. 2.12. Аеродинамічна схема КСЕП

Значення коефіцієнтів місцевих опорів ξ для інженерних розрахунків зібрані у відомих вентиляційних довідниках [38, 101]. Для деяких матеріалів також відомий коефіцієнт гідравлічного тертя χ (цегляні канали, пластикові та металеві повітропроводи і т.і.). Для каналу з укладеним в ньому ВТП значення χ в літературі не знайдено. Тому виникає необхідність його розрахунку.

Коефіцієнт гідравлічного тертя в загальному випадку є складною величиною, що залежить від режиму руху повітря та шорсткості стінок каналу[38, 108]

$$\chi = f\left(\text{Re}; \frac{K_E}{D_{\text{екв}}}\right), \quad (2.48)$$

де: Re – критерій Рейнольдса;

K_E – еквівалентна шорсткість.

Рядом дослідників запропоновані узагальнюючі залежності для визначення χ . Широкого розповсюдження набула формула, що розроблена А.Д. Альтшулем

$$\chi = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{K_E}{D_{\text{екв}}} \right)^{0,25}, \quad (2.49)$$

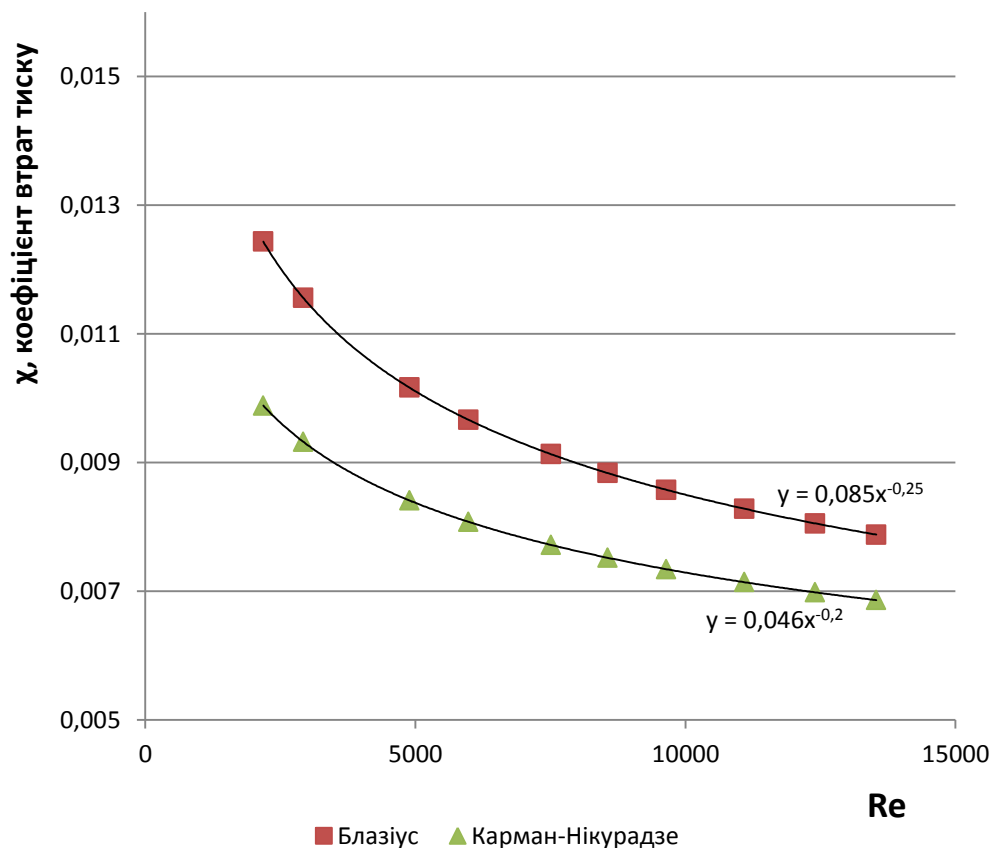


Рис. 2.13. Залежність $\chi=f(Re)$ для гладких каналів.

Ця формула універсальна і дає достовірні результати для трьох характерних областей тертя – гідравлічно гладкої, перехідної та шорсткої.

Проте випадок, що розглядається у роботі не підпадає під ці області і еквівалентну шорсткість визначити неможливо. Тому коефіцієнт гідравлічного тертя необхідно визначати за допомогою критеріальних рівнянь.

Для визначення коефіцієнту тертя χ в гладких каналах при $4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$ застосовують модифіковане рівняння Блазіуса

$$\chi = 0,085 \cdot Re^{-0,2}, \quad (2.50)$$

а при $3 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^6$ рівняння Кармана-Нікурадзе

$$\chi = 0,046 \cdot Re^{-0,25}, \quad (2.51)$$

Для каналів з штучною шорсткістю коефіцієнт гідравлічного тертя визначається індивідуально, так у [148] представлено критеріальне рівняння для випадку М-подібних ребер різної величини на абсорбері КСЕ. В свою чергу у [113] представлено залежності для абсорбера у вигляді насадки (металевої стружки) (2.52) та перфорованого абсорбера з поперечним обтіканням (2.53)

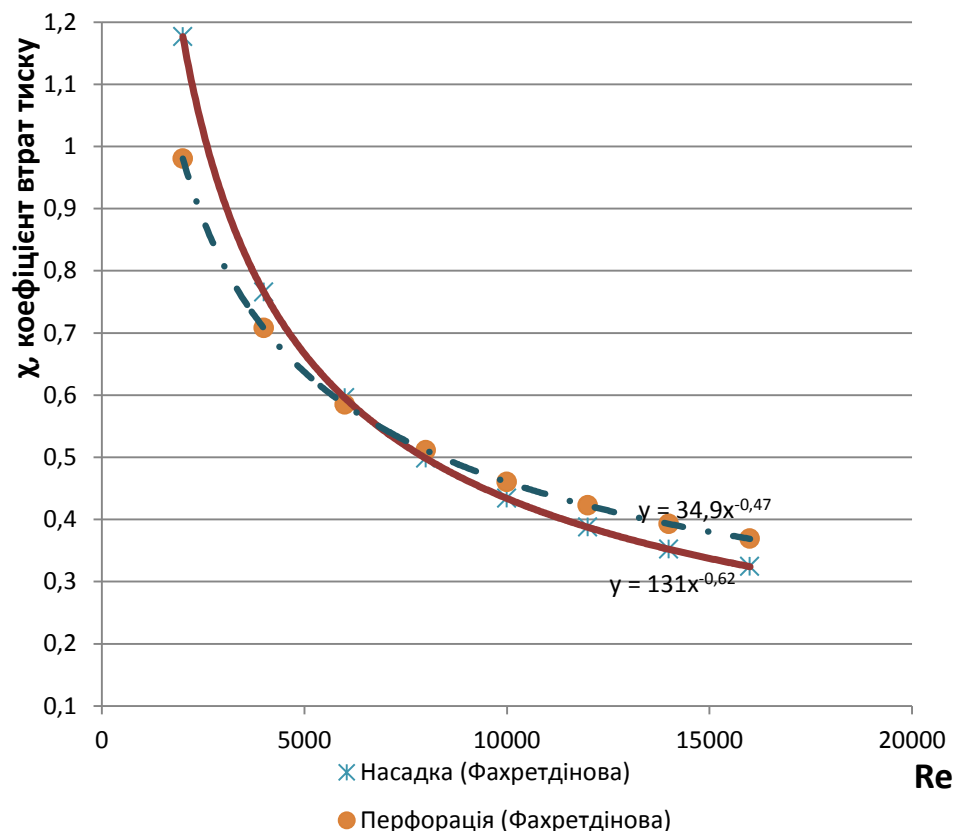


Рис. 2.14. Залежність $\chi=f(Re)$ для каналів з насадками та ребрами.

$$\chi = 131Re^{-0,62}, \quad (2.52)$$

$$\chi = 34,9 \cdot Re^{-0,47}. \quad (2.53)$$

Як видно з Рис. 2.13 та Рис. 2.14 згадані залежності мають дуже погану збіжність, що спонукає до експериментального визначення критеріальних залежностей для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя при продуванні повітря через плаский канал, що утворений гладкими поверхнями світлопрозорого та світловідбиваючого покриттів і вуглеграфітового трикотажного полотна, що укладене в каналі.

2.6 Електротехнічні характеристики абсорбера із трикотажного полотна

Придатність ВТП для електронагріву підтверджується в [23]. Електронагрівачі, що виготовлені з вуглеграфітових волокон, використовуються для виготовлення бетону, виробництва медичних грілок і ковдр і т.і. Нагрів електронагрівача при постійному значенні напруги u визначається лише посередництвом електричного опору провідника, згідно рівняння (2.1). Опір провідника визначається [31]

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2.54)$$

R – електричний опір провідник, Ом;

ρ – питомий електричний опір провідника, Ом·мм²/м;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перерізу провідника, мм².

В табл.2.1 приведено значення поверхневого питомого електричного опору $0,4 \cdot 10^4$ Ом. Визначити придатне для інженерних розрахунків значення питомого опору провідника ρ , використавши відому величину, не представляється можливим. Це зумовлено анізотропністю вуглеграфітових волокон. Також піддається сумніву визначення поперечного перерізу провідника, який формується з ВТП. Тому визначальною величиною для конкретного типу текстильного матеріалу являється ρ/S , Ом/м, яку необхідно визначати експериментально.

2.7 Висновки

1. Запропоновано принципову схему комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна та побудовано фізичну модель теплообмінних процесів, що проходять у повітропідігрівачі.
2. На основі фізичної моделі, побудовано математичну модель теплообмінних процесів у комбінованому сонячно-електричному повітропідігрівачі. Розроблена модель і методи вирішення задач можуть бути розповсюджені на інші типи колекторів з іншими електропровідними абсорберами.
3. Встановлено, що на ефективність сонячного повітропідігрівача в основному впливає зміна витрати повітря G , загальний коефіцієнт теплових втрат U_L та коефіцієнту тепловіддачі конвекцією від абсорбера до омиваючого його повітря $\alpha_{abc} = \alpha_{32}$.
4. Для комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача, запропонованого у роботі оптимальна витрата повітря через прилад складає близько $0,038 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.
5. У опрацьованих публікаціях не виявлено критеріальної залежності $Nu = f(Re)$, що описує тепловіддачу конвекцією від гофровано укладеного вуглеграфітового трикотажного полотна до омиваючого його повітря при будь-яких значеннях числа Рейнольдса.
6. Не виявлено в літературі залежностей для визначення коефіцієнту гідравлічного опору у випадку продування повітря через плаский канал утворений гладкими поверхнями і трикотажним матеріалом укладеним в ньому.
7. При однакових вихідних даних теплова ефективність комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна у порівнянні з повітряними сонячними колекторами з абсорбером у вигляді пласкої пластини з рухом повітря над, під та обох сторін пластини є вищою.

8. Визначальною електричною характеристикою абсорбера із вуглеграфітового трикотажного полотна є величина ρ/S , Ом/м, яку необхідно визначати експериментально.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ, АЕРОДИНАМІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВІТРОПІДГРІВАЧА

В розділі наведено методики та результати експериментальних досліджень теплових та аеродинамічних характеристик комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача. Досліджено теплообмін між вуглеграфітовим трикотаажним полотном та омиваючим його повітрям. Визначено оптимальний спосіб укладки ВТП у повітропідігрівач з точки зору поглинання сонячної енергії, теплообміну та аеродинамічного опору.

3.1 Опис комплексного експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень

Для дослідження теплових та аеродинамічних характеристик КСЕП з абсорбером із ВТП типу УТП, виробництва ІПМ НАНУ ім.Францевича, на базі кафедри теплотехніки КНУБА було створено комплексний експериментальний стенд (Рис. 3.1, Рис.3.2).

Стенд містить модель повітряного сонячного теплового колектора, що складається з дерев'яного корпусу 4, розміром нетто 1600x500x100мм, що має торцеві отвори для пропускання повітря розміром 300x20 накритего віконним склом 1 товщиною 5мм. Герметичність досягається гумовою прокладкою між склом та корпусом, а також силіконовими ущільнювачами. В середині корпусу розміщена теплова ізоляція 3: бокові та торцеві стінки ізольовані пінопластом (20мм), на дні вкладено лист пінопласту товщиною 50 мм, зверху розміщено металізовану мінеральну вату товщиною 25мм, фольгою в бік скла. На ізоляцію укладено об'ємну вуглеграфітову тканину типу ВТП, товщиною 3-4 мм.

Витрата повітря через колектор здійснюється радіальним каналним вентилятором ВЕНТС ВК125Б з максимальною витратою повітря 0,07228 м³/с по пластиковим повітроводам 5 та 6 діаметром 150 мм, також виробництва ТОВ «ВЕНТС» (м.Боярка). Витрата повітря регулюється за рахунок ручного дросель-клапана. Інсоляцію колектора забезпечує імітатор

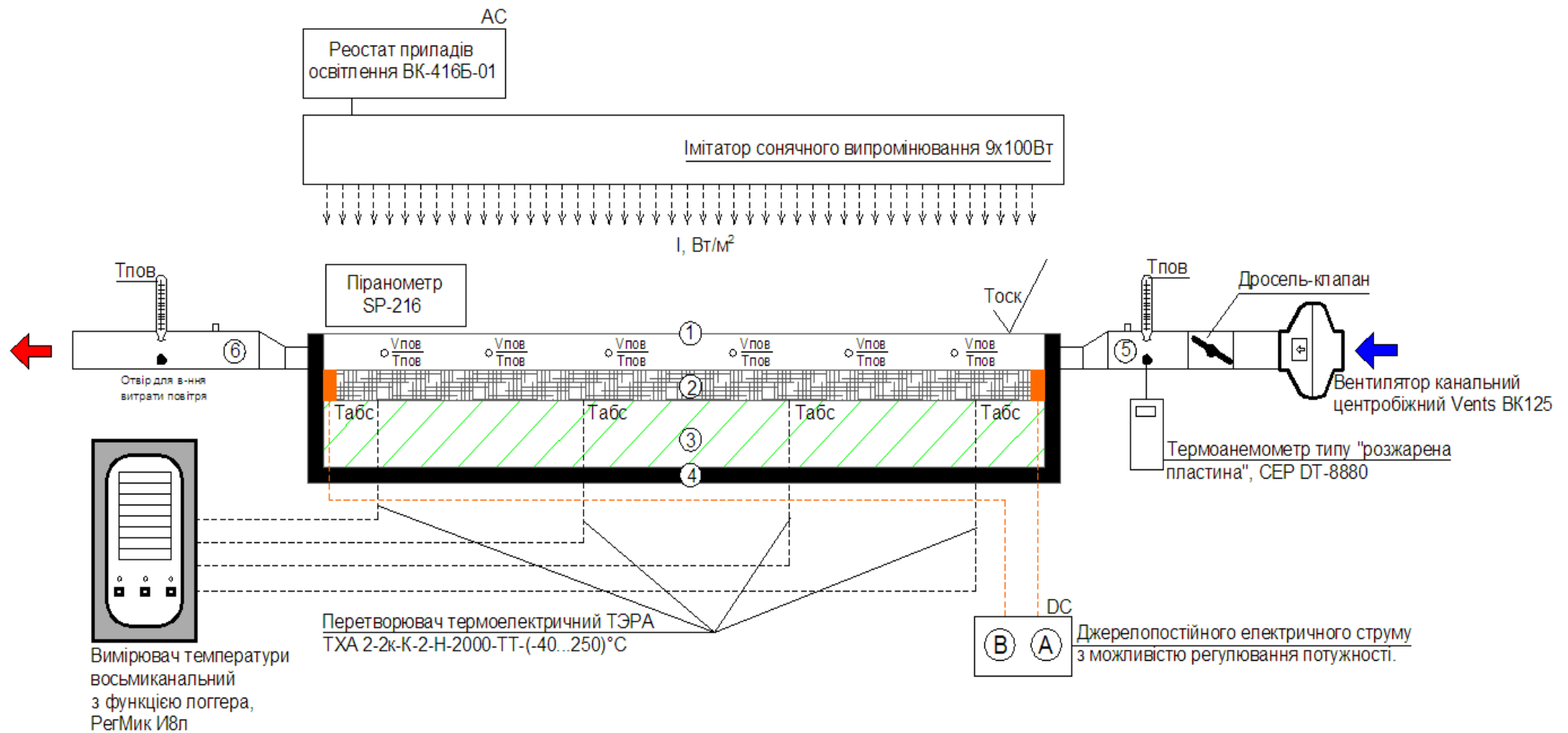


Рис. 3.1. Принципова схема комплексного експериментального стенду:

1 – Скло; 2 – вуглеграфітове трикотаже полотно; 3 – теплоізоляція; 4 – дерев'яний корпус; 5 – подаючий повітропровід; 6 – видаляючий повітропровід.



Рис. 3.2. Фото экспериментального станда

сонячної енергії, виконаний з куполоподібного рефлектора, що виготовлений з оцинкованої сталі товщиною 0,55мм і обклеєно зсередини світловідбиваючою фольгою. В купол вмонтовано дев'ять різьбових електричних патронів типу E40(ГОСТ 60238-99) на фторопластових втулках з 100-ваттними лампами розжарювання. Зміна потужності випромінювання відбувається за рахунок реостата приладів освітлення ВК-416Б-01. Електричний прогрів абсорбера з ВТП забезпечується двома мідними провідниками, що вживлено на протилежних краях тканини (Рис. 3.5), підключеними до електроприладу сформованого з випрямляча, трансформатора та вимірювальної ділянки (вольтметр, амперметр), що живиться від мережі 220В. Прилад оснащений ручним регулятором потужності (Рис. 3.3).



Рис. 3.3. Джерело електроенергії, зформоване з випрямляча, трансформатора та вимірювальної ділянки.

ВТП в ящику укладалась прямо (на дно ящика) та гофровано. Гофрована укладка здійснювалась за рахунок поліетиленових волосіней діаметром 1мм, та металевих скоб, яким полотно прикріплювалось до теплової ізоляції на дні ящика.

Для вимірювання температури в приміщенні, температури на вході та температури на виході з КСЕП використовувалися термометри лабораторні ТЛ-4, температура світлопрозорого покриття (скла) вимірювалась контактним термометром testo 905-T2, витрата повітря через КСЕП вимірювалась аналітично[101,102]

$$G = \frac{v \cdot F \cdot \rho}{3600}, \quad (3.1)$$

де v -повітря в підвідному патрубку, м/с;

F – площа поперечного перерізу, м²;

ρ – густина повітря, кг/м³.

Швидкість повітря вимірювалася двома термоанемометрами СЕМ DT-8880 та testo 405-V1. Вимірювання проводилися згідно ГОСТ 12.3.018-79, що діє в даний час в Україні, схема розбиття перерізу круглого патрубку показана на Рис. 3.4.

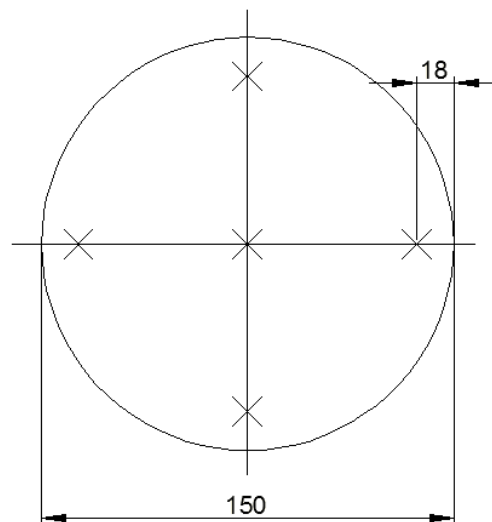


Рис. 3.4. Координати точок вимірювання швидкостей.

У кожній точці перерізу проводиться не менше трьох вимірювань. При використанні анемометрів час виміру у кожній точці має не бути менше ніж 10с [108].

В якості вимірювального обладнання було використано: інтерфейс зв'язку- використовується як перехідний елемент RSS-USB виробник Регмік RS-485-USB; вимірювач цифровий, восьмиканальний з функцією логгера використовується для перетворення та індикації сигналу від перетворювачів



Рис. 3.5. Вимірювач восьмиканальний РегМік І8л та вживлений мідний провідник.



Рис. 3.6. Вимірювальні прилади: 1-термоанемометр testo 405-V1; 2 – контактний термометр testo 905-T2; 3 – піранометр (соляриметр) EZODO SP-216; 4 - термоанемометр CEM DT-8880.

термоелектричних Регмік И8л; для вимірювання температури абсорбера з ВТП використані перетворювачі термоелектричні ТЭРА ТХА 2-2к-К-2-Н-2000-ТТ-(-40...250)°С; вимірювання перепаду тиску на КСЕП використано диференційний манометр testo 312-2; інтенсивність сонячного випромінювання вимірювалась за допомогою піранометра (соляриметра) EZODO SP-216. Вимірювання інтенсивності випромінювання, що падає на поверхню КСЕП проводилося в восьми точках по три рази з інтервалом в 60с і осереднювалось. Вимірювання потужності електричного нагріву проводилось амперметром і вольтметром ГОСТ 8711-78.

Термопары розміщені в повітропідігрівачі в шаховому порядку (Рис. 3.7), по вертикалі ж вони закріплені як в нижніх точках гофрування так і в верхніх. Кріплення термопар здійснено шляхом пришивання їх до полотна капроновими нитками, розміщуючи «корольок» термопары в тілі нитки, що утворює полотно.

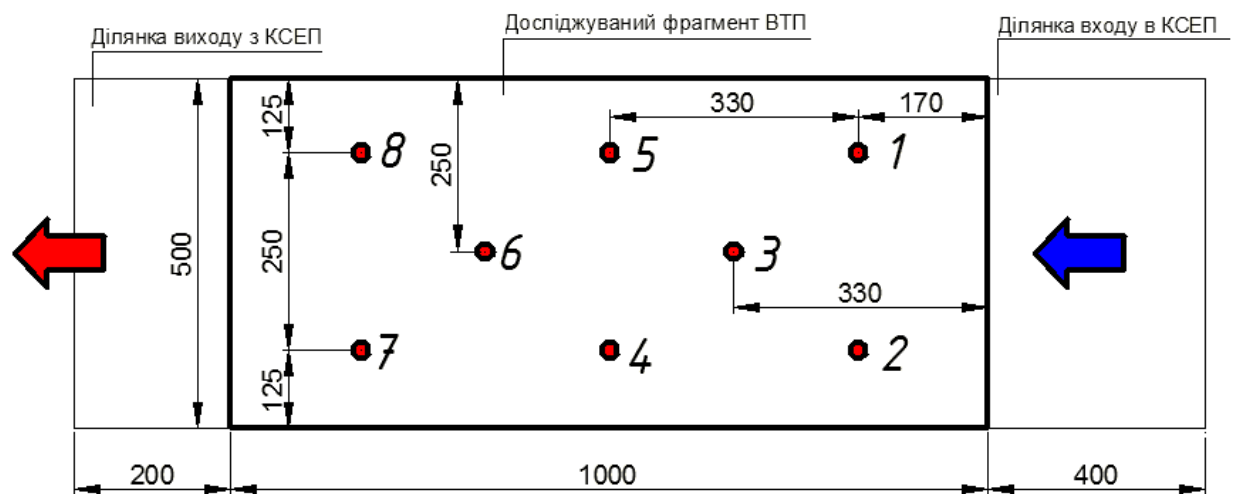


Рис. 3.7. Розміщення термопар в досліджуваному КСЕП по довжині.

Експериментальні дослідження аеродинамічних і теплових характеристик КСЕП проводилося з найбільш ефективним застосуванням процедури планування багатofакторного експерименту [4,18,19]. Процес дослідження розбивався на ряд етапів з чітко визначеними задачами :

1. Априорно вибирались фактори планування.

2. Проводилось планування експерименту, що включає в себе вибір центральної точки планування і області варіювання факторів, вибір типу плану і складання матриці планування.
3. Проводився експеримент згідно прийнятого плану і методики.
4. Перевірялась однорідність вибірних дисперсій.
5. Отримані емпіричні залежності у вигляді рівнянь регресії, що пов'язують вхідні та вихідні параметри.
6. Перевірялась статистична значущість вибірних коефіцієнтів регресії і адекватність математичного опису.

3.2 Експериментальне дослідження поглинаючої здатності вуглеграфітового трикотажного полотна

Коефіцієнт корисної дії сучасних теплових сонячних колекторів, як правило, визначається експериментально для кожної конкретної моделі, корелюючи отримані дані з рівнянням описаним у стандарті EN12975[70]:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta T}{I_B} - k_2 \frac{\Delta T^2}{I_B}; \quad (3.2)$$

де: η_0 – оптичний ККД колектора;

k_1, k_2 - коефіцієнти, що враховують геометричні характеристики КСЕ;

ΔT – різниця середньої температури теплоносія в колекторі з

температурою з температурою навколишнього середовища, K ;

I_B – інтенсивність, падаючого на площину КСЕ, сонячного випромінювання, $Вт/м^2$.

В свою чергу оптичний ККД в більшості випадків визначається співвідношенням[29]:

$$\eta_0 = A_s \cdot \varphi; \quad (3.3)$$

де: A_s – коефіцієнт поглинання (поглинаюча здатність) абсорбера;

φ - пропускна здатність світлопрозорого покриття.

Пропускна здатність – це основна характеристика світлопрозорих покриттів, тому цей показник добре відомий. Поглинаюча здатність абсорберів у відомих моделей геліоколекторів визначається експериментально на основі залежності[2]:

$$A_s = \frac{E_K}{E_0} \quad (3.4)$$

де: E_0 - енергія випромінювання, що потрапляє на поглинаючу поверхню;

E_K – корисна теплова енергія, яку отримав абсорбер.

Аналітично визначити поглинаючу здатність поверхні при дослідженні нових типів абсорберів не видається можливим, тому вона знаходиться експериментально.

Мета проведення досліджень – це експериментальне визначення поглинаючої здатності абсорбера із вуглеграфітового текстильного матеріалу шляхом порівняння даних роботи КСЕП при інсоляції та при безпосередньому підводі електроенергії до абсорбера.

Якщо розглядати КСЕП як окрему систему, то можна стверджувати, що джерелом теплової енергії в ньому є абсорбер і потужність системи прямо залежить від його температури. Тоді проводяться два типи експериментів: нагрів абсорбера до певної конкретної температури електрострумом та «сонячним випромінюванням», вимірюючи при цьому електричну потужність та потужність випромінювання, що діє на колектор. В такому випадку, тепловтрати через корпус колектора будуть рівними і в кінцевому рахунку скоротяться. Після визначення відношення потужностей отримаємо оптичний ККД колектора з якого з урахуванням відомого значення пропускної здатності скла по залежності (3.4) визначимо коефіцієнт поглинання. Ефективність перетворення електричної енергії в теплову приймаємо 99%

$$I_C \cdot F \cdot \eta_0 \cdot U_L = P_E \cdot U_L \cdot 0,99; \quad (3.5)$$

$$\eta_0 = \frac{P \cdot U_L \cdot 0,99}{I_C \cdot F \cdot U_L} = \frac{P_E \cdot 0,99}{I_C \cdot F}; \quad (3.6)$$

де: F – площа абсорбера, що сприймає сонячне випромінювання, m^2 ;

U_L – коефіцієнт тепловтрат через корпус, $Вт/(m^2K)$;

P_E – електрична потужність підведена до абсорбера, $Вт$;

Дослідження проводилися для різних способів укладки ВТП у КСЕР: для прямого способу на дно та для гофрованого при різних кутах розкриття гофри (Рис. 3.9).

Таблиця 3.1

Фрагмент таблиці експериментальних даних при $\alpha=20$

№	t1 °C	t2 °C	t3 °C	t4 °C	t5 °C	t6 °C	t7 °C	t8 °C	T _{абс} °C	I _к Вт/м ²	P Вт	A _s
1 - Е	29,8	30	29,9	30,1	30,1	30,5	30,5	30,7	30,3	233	87	0,94
1 - С	29,3	29,7	29,7	30,2	30,5	30,5	30,7	31,2	30,4			
2 - Е	39,4	39,5	39,4	39,9	39,9	40,2	40,2	40,4	40,1	302	113	0,95
2 - С	39,1	39,5	39,4	39,5	40	40,2	40,9	41,1	40,1			
3 - Е	49,2	48,9	49,4	49,5	49,9	50,2	50,4	50,7	49,8	376	138	0,93
3 - С	48,2	48,2	49,1	49,6	49,7	50,2	50,1	51	49,5			
4 - Е	54,3	54,5	54,4	55,1	55	55,7	55,6	55,9	55,1	466	175	0,95
4 - С	53,7	54,1	54,2	54,5	54,9	55,4	55,4	55,9	54,8			
5 - Е	64,1	64,2	64,4	64,6	65,1	65,7	66,3	66,4	65,1	650	238	0,93
5 - С	63,2	64	64,1	64,6	65,2	65,5	65,9	66,9	64,9			

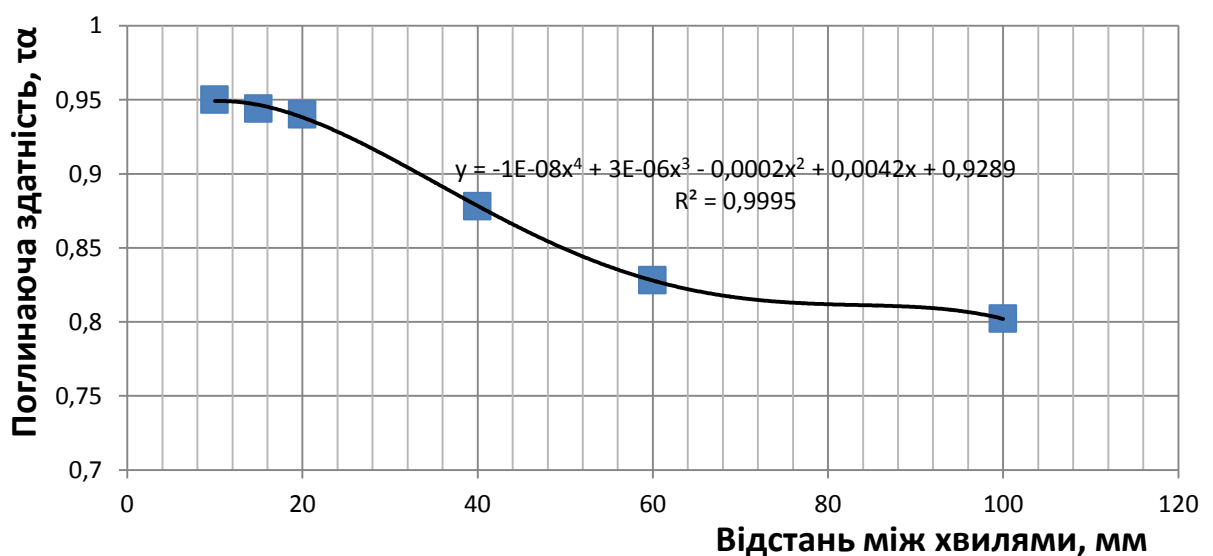


Рис. 3.8. Залежність поглинаючої здатності абсорбера від способу укладки вуглеграфітового трикотажного полотна

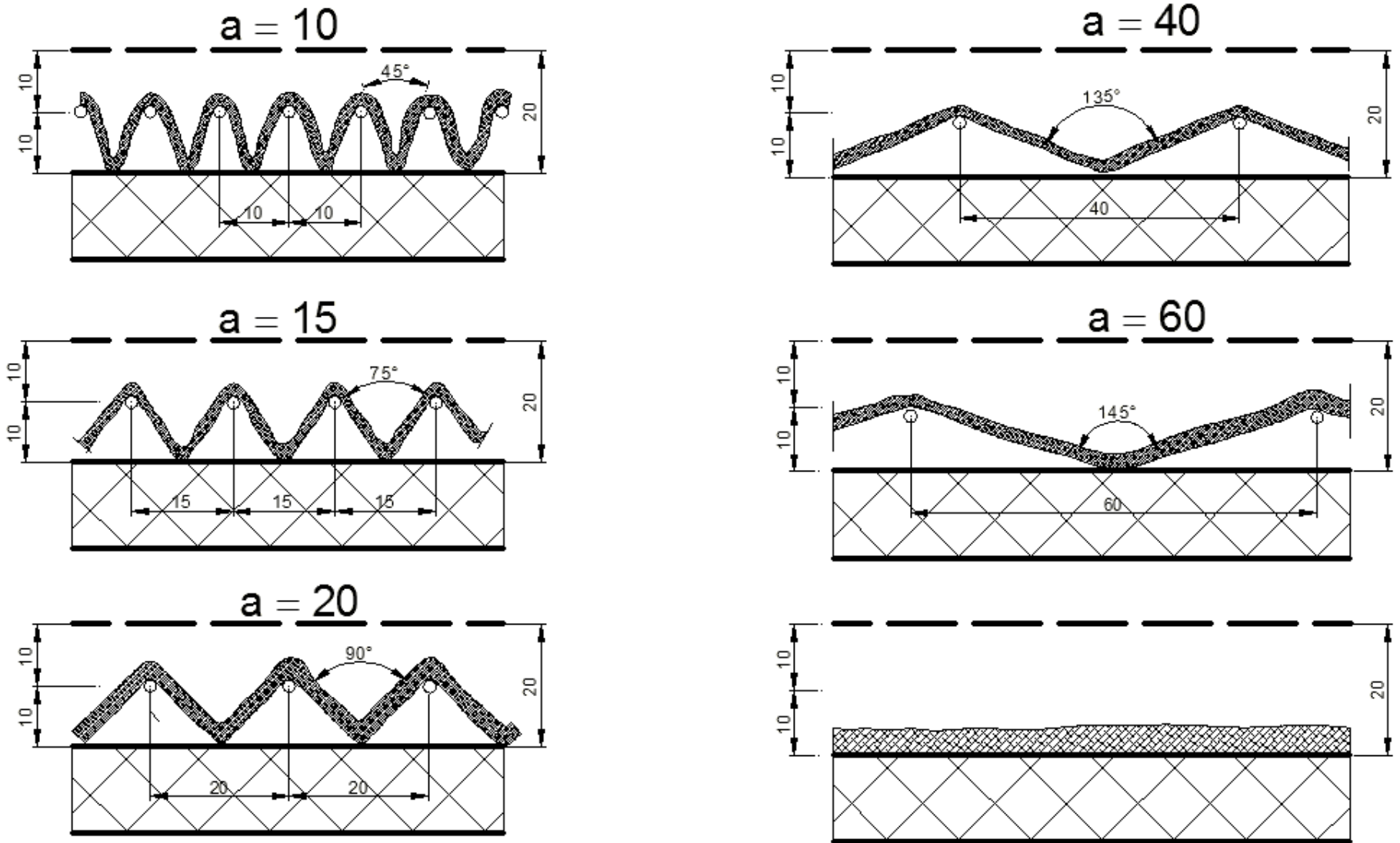


Рис. 3.9. Варіанти способів укладання ВТП у КСЕП.

Як видно з Рис. 3.8, після встановлення відстані між піками гофрами менше ніж 20мм, поглинаюча здатність абсорбера майже не змінюється, натомість очевидно, що збільшується витрата матеріалу та аеродинамічний опір. Отже, з точки зору поглинаючої здатності оптимальним кутом розкриття гофри є $\gamma \approx 90^\circ$.

3.3 Експериментальне дослідження теплообміну між вуглеграфітовим трикотажем та повітрям, що його омиває.

Для здійснення інженерного розрахунку КСЄП на основі розробленої математичної моделі не вистачає відомостей щодо визначення коефіцієнту тепловіддачі від вуглеграфітового трикотажного полотна укладеного в плаский канал.

Для чистоти експерименту підвід теплоти до абсорбера здійснюється електричним струмом, а світлопрозоре покриття закрито шаром теплової ізоляції зі світловідбиваючою поверхнею, що обернена до каналу. Це дає змогу запобігти променевим та конвективним тепловтратам через осклення. Для визначення температури тканини в неї було вживлено вісім термопар, як показано на Рис. 3.10.

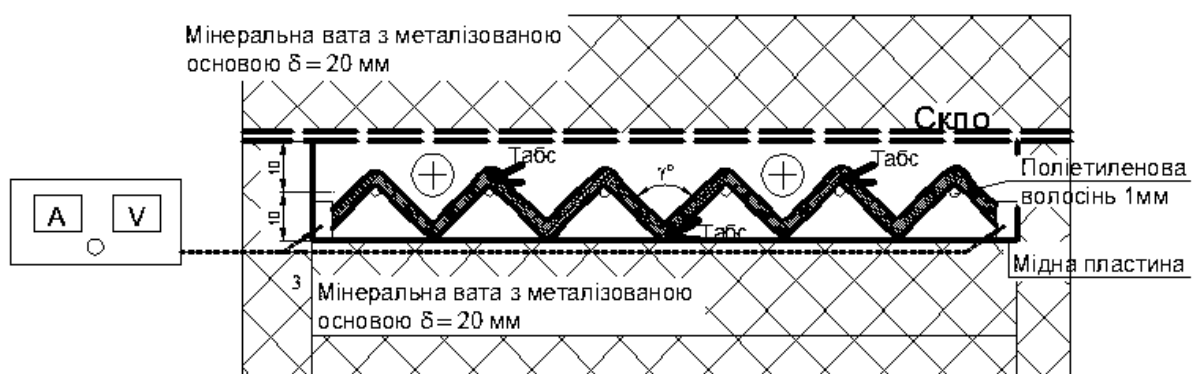


Рис. 3.10. Переріз експериментальної секції КСЄП для дослідження тепловіддачі конвекцією.

Планування експерименту – це процедура вибору кількості і умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для розв'язання поставленої задачі з потрібною точністю [4,18].

Визначення похибок вимірювань проводилося за розрахунком похибок паралельних дослідів [19].

Середнє арифметичне кожного з трьох паралельних рандомізованих дослідів \bar{y} дорівнює сумі усіх n окремих результатів, поділених на n :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.7)$$

де: $\sum_{i=1}^n y_i$ – виміряні величини; n – кількість вимірювань.

Відхилення для усіх \bar{y} можна зобразити як різницю $\Delta y = y_i - \bar{y}$. Наявність Δy свідчить про варіацію значень повторних дослідів. Для вимірювання цієї варіації використовується дисперсія (s^2):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 \quad (3.8)$$

де $n-1$ – кількість ступенів вільності, яка є на одиницю меншою від кількості дослідів.

Середнє квадратичне відхилення величини $\sum_{i=1}^n y_i$ від середнього значення \bar{y} розраховувалося за формулою:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

де: s – середнє квадратичне відхилення, або квадратична похибка.

Похибки вимірювальних систем наведені у табл. 3.1.

Було прийнято, що на коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від ВТП до , омиваючого його повітря впливає витрата теплоносія G , м³/с, а конкретно швидкість у підвідному патрубку, потужність підведеної енергії, Вт; та площа абсорбера $F_{абс}$, м².

Ці величини були вхідними параметрами планування експерименту. Вихідний параметр – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $Вт/м^2К$.

Визначення похибок вимірювань

Назва виміряного елемента	Абсолютна похибка	Відносна похибка	
		мінімальна, %	максимальна, %
Температура теплоносія (термометр лабораторний ТЛ-4)	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	0,2	0,37
Швидкість повітря (термоанемометр)	$\pm 1,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,3	0,45
Інтенсивність сонячного випромінювання (піранометр SP-216)	$\pm 20 \text{ Вт}/\text{м}^2$	2,5	4

Для оброблення вимірних величин група факторів була представлена у табл. 3.2.

Для визначення ступеня впливу кожного з цих параметрів складалася план-матриця експерименту з рекомендаціями [4,18]. Перше із значень кожного фактору відповідало його мінімальному значенню і позначалося -1, друге – максимальному і позначалося +1 (табл. 3.3).

Необхідна кількість дослідів визначалася за формулою:

$$N = P^k \quad (3.10)$$

де K – кількість факторів ($K=3$); P – кількість рівнів факторів ($P=2$).

Тоді $N=2^3 = 8$.

Таблиця 3.3

Фактори і рівні планування

Назва фактора	Кодове позначення	Рівні факторів		Інтервал варіювання
		нижній -1	верхній +1	

Швидкість повітря (V , м/с)	x_1	0,5	1,5	0,25
Підведена потужність (P , Вт)	x_2	100	300	50
Площа абсорбера ($F_{абс}$, м ²)	x_3	0,5	0,9	0,1

Вхідними параметрами експерименту є витрата теплоносія $x_1 = V$, м/с, підведена потужність $x_2 = P_{ЕЛ}$, Вт та площа абсорбера $x_3 = F_{абс}$, м².

Функцією відгуку є коефіцієнт тепловіддачі, який визначається так:

$$\alpha_{абс} = \frac{v \cdot F_o \cdot 3600 \cdot c_p \cdot (T_{KK} - T_{ПК})}{F \cdot (T_{абс} - T_{нов})}, \quad (3.11)$$

Було зроблене припущення, що результати факторного експерименту досліджень будуть описані поліномом такого вигляду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.12)$$

де b_0, \dots, b_{123} – коефіцієнти рівняння регресії, які обчислювалися за такою формулою:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} \bar{y}_i, \quad j = 0, 1, \dots, k \quad (3.13)$$

Таблиця 3.4

Матриця планування повного факторного експерименту

№	x_0	x_1	x_2	x_3	Функція відгуку
1	+	-	-	-	y
2	+	+	-	-	y
3	+	-	+	-	y
4	+	+	+	-	y
5	+	-	-	+	y
6	+	+	-	+	y

7	+	-	+	+	у
8	+	+	+	+	у

У рівнянні (3.13) N – кількість дослідів; j – номер фактора; x_{ji} – кодування значення фактора у досліді; \bar{y}_i – середнє значення змінної стану за n паралельними дослідями i -го рядка, тобто за трьома паралельними дослідями

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.14)$$

де: n – кількість паралельних дослідів, які проводились за однакових температурних умов.

У кожному рядку матриці планування визначалися середні значення дисперсії за n проведеними паралельними дослідями

$$D = s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.15)$$

Однорідність дисперсії перевірялася за критерієм Кохрена (G - критерієм). Для цього знаходилося відношення максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій

$$G_p = \frac{s_{i,\max}^2}{\sum_1^N s_i^2}, \quad (3.16)$$

Отримане відношення порівнювалося з табличним (додаток 6 [6]) G_{1-p} для $p=0,005$; $f_1 = n - 1$; $f_2 = N$. Якщо $G_p < G_{1-p}$, то дисперсії однорідні.

Як оцінка для дисперсії відтворюваності вибиралася середня дисперсія:

$$s_{\text{відтв}}^2 = \sum_{i=1}^N s_i^2 / N, \quad (3.17)$$

Дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії визначалася для n паралельних дослідів:

$$s_{bj}^2 = \sum_{i=1}^N s_{\text{відтв}}^2 / N \cdot n, \quad (3.18)$$

Значущість коефіцієнтів перевірялася за критерієм Стюдента (табл. 9.5 [4]). Для усіх коефіцієнтів складалося t – відношення $t_j = b_j / s_{bj}$, яке порівнювалося з табличним $t_{1-p}(P; f_3)$ для рівня значущості $P=0,05$ і кількості ступенів вільності $f_3 = N(n-1)$. Якщо виявлялося, що $t_j > t_{1-p}(P; f_3)$, то коефіцієнти значущі.

Дисперсію адекватності знаходили за формулою:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{n}{N-K} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.19)$$

у якій K – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Для перевірки адекватності складалося дисперсійне відношення:

$$F_q = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\text{відтв}}^2}, \quad (3.20)$$

Отримане дисперсійне відношення перевірялося за критерієм Фішера (табл. 5 [8]) $F_{1-q}(f_{\text{ад}}; f_0; q)$, де $f_{\text{ад}} = N-L$; $f_0 = N(n-1)$; $q = 0,05$. Якщо $F_q < F_{1-q}(f_{\text{ад}}; f_0; q)$, то проведені дослідження вважаються адекватними.

Для переходу до розмірних величин використовували вираз:

$$x_i = (x_j - x_{j0}) / \chi_j, \quad (3.21)$$

де: x_i – кодоване значення фактора;

x_j – натуральне значення фактора;

x_{j0} – натуральне значення основного рівня;

χ_j – інтервал між основним і верхнім рівнями.

Матриця планування і результати розрахунку експериментального дослідження під час використання прозорої води як теплоносія

№	План						Змінна стану			\bar{y}	s_i^2	
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-	-	-	+	+	+	-	41	43	39	41	4,00
2	+	-	-	-	+	-	+	49	50	53	51	0,00
3	-	+	-	-	-	+	+	58	58	58	58	2,33
4	+	+	-	+	-	-	-	67	69	70	69	4,33
5	-	-	+	+	-	-	+	74	75	75	75	4,33
6	+	-	+	-	-	+	-	78	78	79	78	26,3 3
7	-	+	+	-	+	-	-	82	82	83	82	20,3 3
8	+	+	+	+	+	+	+	85	84	89	86	50,3 3

$$\sum_{i=1}^N s_i^2 = 111$$

Коефіцієнти рівняння регресії визначались за формулою (3.13) і становлять:

$$b_0 = 1240; b_1 = 602; b_2 = 694; b_3 = 1118; b_{12} = 140; b_{13} = 585; b_{23} = 455; b_{123} = 122.$$

У кожному рядку матриці планування визначалися середні значення дисперсії за проведеними трьома паралельними дослідженнями (табл. 3.4).

Для перевірки однорідності дисперсій за критерієм Кохрена складалося співвідношення максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій за формулою (3.16)

$$G_p = \frac{50,33}{111} = 0,45.$$

За кількістю ступенів вільності, що дорівнюють $f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$ та $f_2 = N = 8$, а також рівнем значущості $q = 0,05$ критичне відношення $G_{1-p} = 0,516$ [4]. Це значення перевищувало підраховане $G_p = 0,45$, тобто розрахована дисперсія є однорідною.

Середня дисперсія визначалася за формулою (3.15):

$$s_{\text{вдтв}}^2 = 111/8 = 14.$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів визначалася дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії за формулою (3.16):

$$s_{bj} = \sqrt{14/(8 \cdot 3)} = 0,764.$$

Значущість коефіцієнтів визначалась за критерієм Стьюдента. Знайдене значення t_{1-p} - критерію порівнювалося з табличним за заданого числа значущості ($P = 0,05$) і відповідної кількості ступенів вільності $f_3 = 8(3-1) = 16$ і становить $t_{1-p} = 2,12$ [2].

Розраховувалось t - відношення кожного коефіцієнта до його дисперсії:

$$\begin{aligned} t_0 &= 1240/0,764 = 1720; & t_1 &= 602/0,764 = 758; & t_2 &= 694/0,764 = 901; \\ t_3 &= 1118/0,764 = 1530; & t_{12} &= 140/0,764 = 180; & t_{13} &= 585/0,764 = 760; \\ t_{23} &= 455/0,764 = 633; & t_{123} &= 122/0,764 = 153. \end{aligned}$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії є значущі, оскільки $|t_{bj}| < t_{1-p}$.

За результатами регресійного аналізу апроксимуючий поліном набув такого вигляду:

$$y = 1240 + 602x_1 + 694x_2 + 1118x_3 + 140x_1x_2 + 585x_1x_3 + 455x_2x_3 + 122x_1x_2x_3 \quad (3.22)$$

На підставі аналізу коефіцієнтів регресії можна констатувати, що на поведінку функції відгуку однаково впливають усі три фактори x_1 (швидкість повітря v , м/с), x_2 (потужність нагріву P , Вт) та x_3 (площа абсорбера F).

Для перевірки адекватності проведених досліджень визначалася дисперсія адекватності за формулою (3.16). Результати розрахунку наведені у табл. 3.5.

Дисперсійне відношення для перевірки адекватності досліджень розраховувалося за формулою (3.20):

$$F_q = \frac{29,3}{14} = 2,089.$$

Таблиця 3.6

Результати розрахунку адекватності отриманих результатів

№	\bar{y}	y	Δy	Δy^2	$s_{ад}^2$
1	2	3	4	5	6
1	41	43	2	4	1,5
2	51	53	2	4	1,5
3	58	58	-2	4	1,5
3	69	67	-2	4	1,5
4	75	74	-1	1	0,4
5	78	79	1	1	0,4
7	82	83	1	1	0,4
8	86	89	3	9	3,6

$$\sum s_{ад}^2 = 10,8$$

Отримане дисперсійне відношення перевірялося за критерієм Фішера (табл. 5 [6]) $F_{1-q}(f_{ад}; f_0; q)$. За кількістю ступенів вільності, що дорівнюють $f_{ад} = 8 - 1 = 7$; $f_0 = 8(3 - 1) = 16$; $q = 0,05$, критичне відношення – $F_{1-q} = 2,66$. Проведені дослідження є адекватними, оскільки $F_q < F_{1-q}(f_{ад}; f_0; q)$. Результати експериментальних досліджень залежності $\alpha_{абс}$ від кута розкриття гофри γ приведені на Рис.3.11

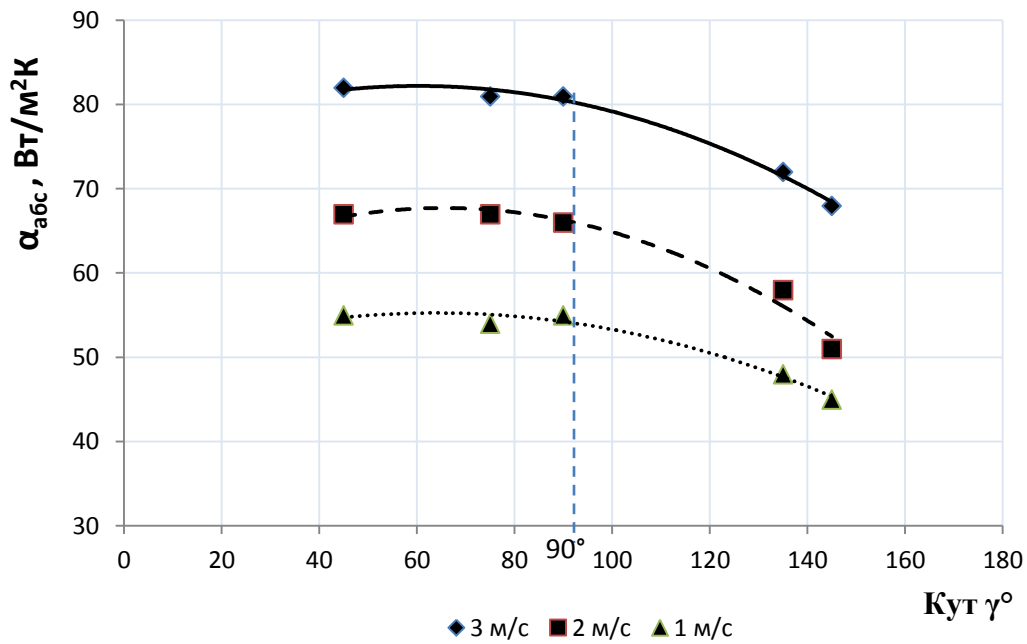


Рис. 3.11. Залежність коефіцієнту тепловіддачі від абсорбера із ВТП до повітря, що його омиває, від кута розкриття гофри.

Для визначення більш ефективного способу укладення ВТП було проведено дослід для визначення напрямку укладки ВТП, тобто хвилями вздовж потоку і поперек потоку. Результати представлені на Рис. 3.12

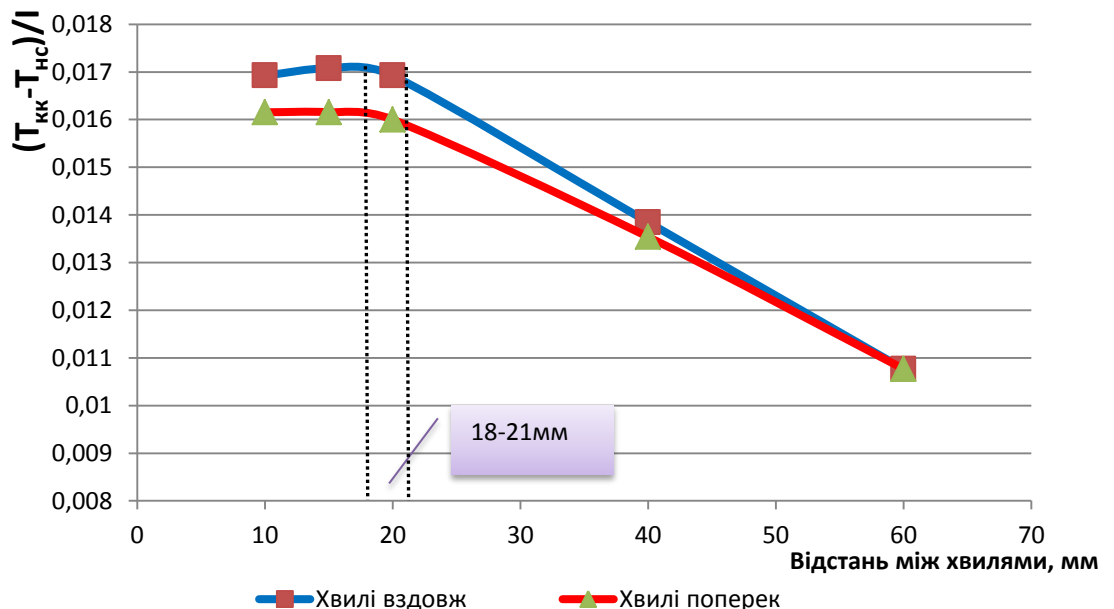


Рис. 3.12. Залежність степені прогріву повітря від способу укладки при різному напрямі укладки

Визначення характеру теплообміну між ВТП та повітрям, що його омиває повинно бути представлене у вигляді залежності $Nu = f(Re)$ [58,62].

Згідно [58,62] характер тепловіддачі між нагрітою стінкою та омиваючим її повітрям описується рівнянням

$$Nu = C \cdot Re^n, \quad (3.23)$$

де: Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

C і n – сталі, що визначаються експериментально.

Критерії подібності для каналу визначаються наступними рівняннями [58]

$$Nu = \frac{\alpha_{abc} \cdot D_{екв}}{\lambda_{пов}}, \quad (3.24)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_{екв}}{\mu}, \quad (3.25)$$

де: $D_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналу, м;

$\lambda_{пов}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м К;

ρ – густина повітря, кг/м³;

V – швидкість повітря у каналі, м/с;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Н·с/м²;

Порівняння способів укладки та теоретичної формули Луцика-Малкіна наведено на

Рис. 3.13. Критеріальні рівняння, що корелюють з представленими залежностями мають наступний вигляд:

- для прямої укладки ВТП на дно КСЕП

$$Nu = 0,14 \cdot Re^{0,626}, \quad (3.26)$$

- для гофрованої укладки ВТП з кутом розкриття гофри 90°, з продуванням попереж хвиль

$$Nu = 0,14 \cdot Re^{0,78}, \quad (3.27)$$

- для гофрованої укладки ВТП з кутом розкриття гофри 90°, з продуванням вздовж хвиль

$$Nu = 0,122 \cdot Re^{0,8}, \quad (3.28)$$

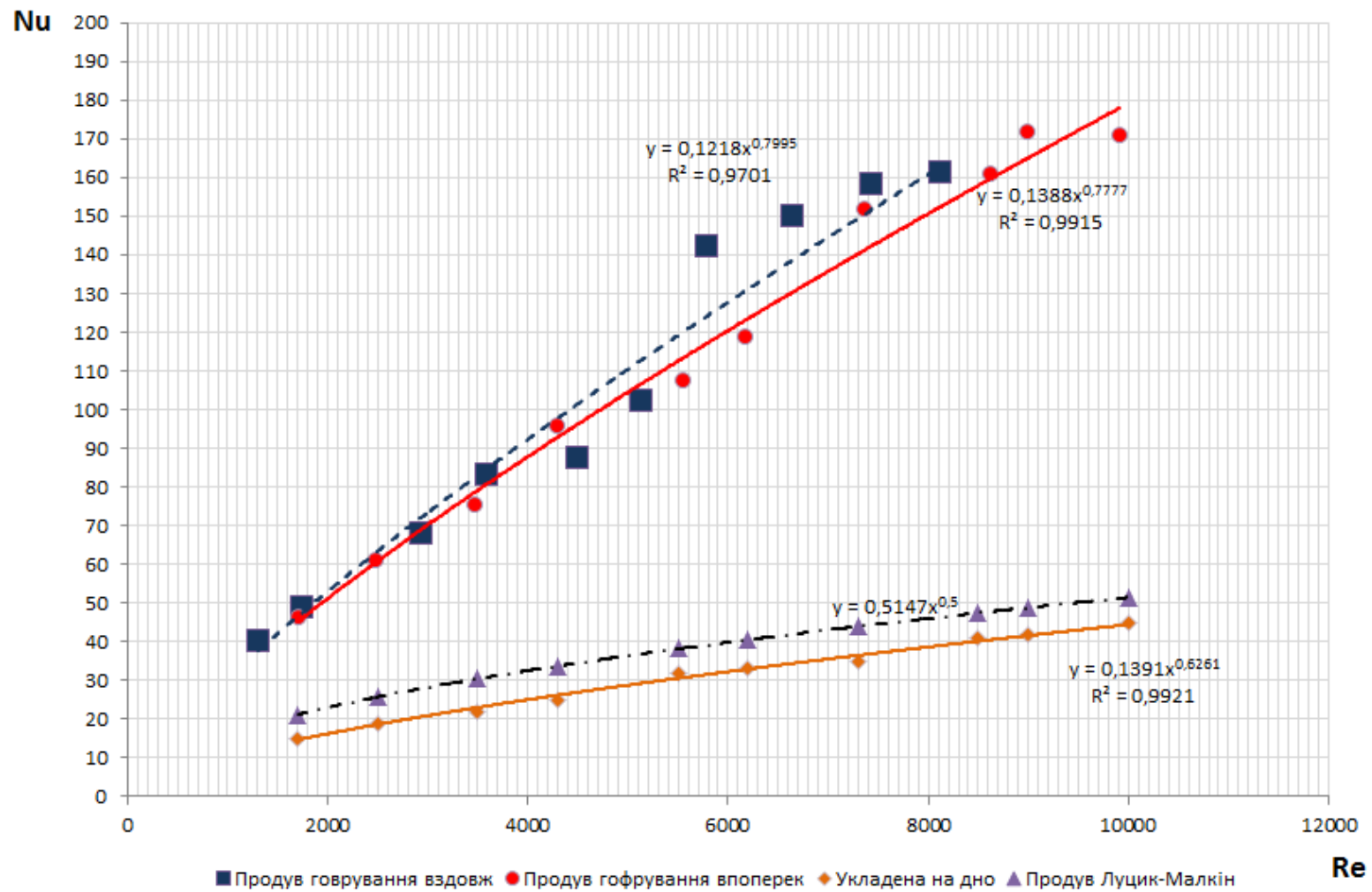


Рис. 3.13. Залежність $Nu = f(Re)$ для різних способів укладки ВТП.

Таблиця 3.7

Фрагмент таблиці даних при есперементальних дослідженнях при підведенні електроенергії 100Вт

№	Температура вхідного повітря,	Температура вихідного повітря,	Температура поглинаючого елемента,								Середня температура ПЕ,	Середня швидкість,	Об'єм на витрата,	Масова витрата,	Число Рейнольдса	Коефіцієнт тепло віддачі	Число Нусельта	Тепловий потік
	$T_{вх}$	$T_{вих}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	$t_{сер}$	$V_{п}$	L	G	Re	α	Nu	Q
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	м/с	м ³ /год	кг/год		Вт/м ² К		Вт
1	21	24,5	24,5	24,3	25	25,2	25,2	25,3	25,8	25,7	25	3,1	77,00	91,63	8120	102,47	161,19	89,09
2	21	25	24,6	24,7	25,2	25,4	25,5	25,8	26,1	26	25,4	2,84	70,55	83,95	7439	100,58	158,22	93,28
3	21	25,5	25,1	24,9	25,3	25,7	25,8	26,1	26,5	26,4	25,8	2,54	63,09	75,08	6653	95,25	149,83	93,85
4	21	26,2	25,3	25	25,8	26,7	26,3	27,1	27,5	27,7	26,3	2,21	54,90	65,33	5789	90,45	142,28	94,36
5	21	26,7	25,8	26,2	27	27,4	27,6	28	28,8	29	27,5	1,96	48,69	57,94	5134	65,04	102,31	91,73
6	21	27,4	27	26,8	28	28,7	28,9	30,2	31,7	32	28,4	1,72	42,72	50,84	4505	55,70	87,61	90,39
7	21	28,6	27,2	27	28,2	29,3	29,4	31	32,7	33,1	29	1,37	34,03	40,50	3589	52,68	82,87	85,49
8	21	30,5	28,8	29,1	30,2	31	31,2	32,5	34	33,8	31	1,12	27,82	33,11	2934	43,07	67,75	87,37
9	21	33	30	30,4	31,5	32,4	32,6	33,5	35,1	35,3	32,5	0,67	16,64	19,80	1755	31,06	48,86	66,02
10	21	37,4	32,6	32,2	33	34,3	35,6	37,8	39,2	40	36	0,5	12,42	14,78	1310	25,63	40,31	67,33

Оцінка похибок вимірювання експериментальних даних виконувалась базуючись на теорії ймовірності та теорії похибок [194087]. Довірчий інтервал шуканої величини визначався з ймовірністю $\alpha = 0,95$ (ступінь ризику $p = 0,05$). Результати записувались у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \Delta_x, \quad (3.29)$$

де: \bar{x} – середнє арифметичне значення величини;

Δ_x – значення абсолютної похибки вимірювання, залежить від умов проведення експерименту та складається з суми систематичної та раптової похибок.

Сумарна абсолютна систематична похибка вимірювальної системи, визначається за залежністю

$$\Delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (3.30)$$

де: n – загальна кількість похибок по кожному елементу вимірювальної системи;

Δ_i – систематична похибка i -го елемента системи (зазвичай дорівнює похибці вимірювального приладу), визначається згідно

. Середня квадратична похибка методу вимірювання, визначається за залежністю

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{(n-1)}}, \quad (3.31)$$

де: n - кількість вимірювань в досліді;

$(\bar{x} - x_i)^2$ - квадрат абсолютного відхилення величини x_i від його середнього арифметичного значення \bar{x} .

Необхідна кількість паралельних вимірювань для ймовірності $\alpha = 0,95$, знайдено з урахуванням недоцільності зменшення величини раптової похибки Δ_p до значення меншого однієї другої сумарної величини систематичної похибки вимірювальної системи [40].

Сумарна похибка результату прямого вимірювання розраховується за залежністю

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta + t_{\alpha n} \cdot \sigma_n = \Delta + t_{\alpha n} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.32)$$

де: $t_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стюдента, приймається при ймовірності $\alpha = 0,95$ та кількості дослідів n ;

σ_n – середня квадратична похибка вимірювання середнього арифметичного значення \bar{x} .

Відносна похибка результату прямого вимірювання розраховується

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (3.33)$$

У випадку, коли невідома величина є функцією двох або більшої кількості незалежно змінюваних величин $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, абсолютне значення похибки визначаємо за залежністю

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot \Delta_{\Sigma_i} \right)^2}, \quad (3.34)$$

де: $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ – часткова похідна по змінній X_i , сумарна абсолютна похибка якої дорівнює Δ_{Σ_i} . Відносна похибка результатів непрямих вимірювань розраховується за залежністю, де замість величини \bar{x} розглядається Y , а замість сумарної похибки Δ_{Σ} – ΔY .

Загальна абсолютна похибка результату непрямого вимірювання (ΔY_{Σ}) знаходиться за допомогою залежності

$$\Delta Y_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta Y_i)^2 + k^2 \sum_{j=1}^m (\Delta Y_j'')^2}, \quad (3.35)$$

де: n, m – кількість складових похибки, що мають відповідно нормальний та рівномірний закон розподілення; параметри, що позначені одним штрихом розподілені за нормальним законом, що позначені двома штрихами розподілені за рівномірним законом;

k – константа, що залежить від довірчої імовірності, з якою потрібно визначити величину похибки.

Для довірчої ймовірності $\alpha=0,95$ параметр $k \approx 1$, а вираз 3.35 можна представити в більш простій формі

$$\Delta Y_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n+m} (\Delta Y_i)^2}, \quad (3.36)$$

Сумарна похибка усіх вимірювальних систем становила 3,9%.

Характеристики вимірювальних пристроїв

№	Назва величини	Назва приладу	Одиниця вимірювання	Границі вимірювання	Одиниця молодшого розряду	Гранична допустима похибка приладу, %	Додаток
1	Швидкість повітря	Анемометр testo 405-V1	м/с	0÷10	0,01 м/с	±1%	-
2	Температура абсорбера	Перетворювач термоелектричний ТЭРА ТХА 2-2к-К-2-Н-2000-ТТ – (-40..+250)°С	°С	-40÷+270	0,1 °С	±2, 5%	Послідовно через вимірювач И8л та порти RS-485-USB лані реєструються на ЕОМ
3	Температура повітря	Термометр лабораторний ТЛ-4	с	0÷55	0,1 °С	±0,1%	-
4	Потужність нагріву	вольтметр, амперметр ГОСТ 8711-60	В А	0-20 0-150	0,5 5	±2%	-

3.4 Експериментальне визначення аеродинамічних характеристик повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна

Метою експериментального дослідження аеродинамічних характеристик комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером з вуглеграфітового трикотажного полотна є визначення коефіцієнту гідравлічного тертя для різних способів укладки ВТП. Дослідження проводилися для способів укладки показаних на Рис. 3.9 та для продувки поперек хвиль і вздовж.

Вимірюванню підлягали наступні параметри: швидкість повітря $v_{нов}$, температура повітря на вході $t_{вх}$ і на виході $t_{вих}$, різницю статичних тисків ΔP .

Витрата повітря через визначалась КСЕП

$$G = v \cdot \rho_{em} \cdot F_n, \quad (3.37)$$

де: v – швидкість повітря у повітропроводі перед КСЕП, м/с;

ρ_{em} – густина повітря при заданій температурі, що визначається за формулою $\rho_{em} = 353 \cdot (273 + t)^{-1}$, кг/м³.

F_n – площа перерізу повітропроводу, м².

Перепад тиску до і після КСЕП визначався з виразу

$$\Delta P = P_{cm1} - P_{cm2}, \quad (3.38)$$

P_{cm1} – статичний тиск в перерізі 1 (Рис. 3.14), Па;

P_{cm2} – статичний тиск в перерізі 2 (Рис. 3.14), Па.

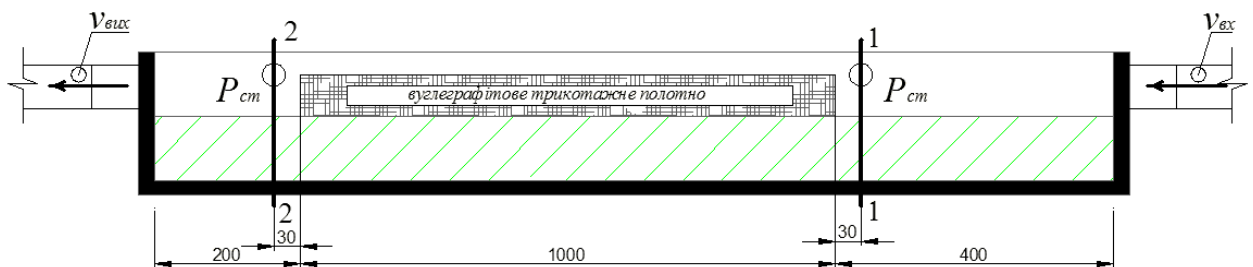


Рис. 3.14. Схема аеродинамічних вимірів.

Також було проведено експеримент для гладкого каналу утвореного світлопрозорим та світловідбиваючим покриттям без укладеного в середині вуглеграфітового трикотажного полотна. Результати показали добру сходимість з відомими залежностями Блазіуса і Кармана-Нікурадзе ()

Коефіцієнт гідравлічного тертя χ , виходячи з формули Дарсі [108], визначається з виразу

$$\chi = \frac{26 \cdot 10^6 \cdot \Delta P \cdot \rho \cdot D_{екв} \cdot F_{II}^2}{l \cdot G^2}, \quad (3.39)$$

де: F_n – площа перерізу КСЕП, м²;

l – довжина продувального ВТП, м;

Експериментальне дослідження проводилося у відповідності з методикою і визначалися наступні величини:

- залежність перепаду тиску до укладеного ВТП і після від витрати повітря через КСЕП для різних способів укладки;
- залежність вигляду $\chi=f(Re)$ для різних способів укладки вуглеграфітового полотна;
- оптимальний спосіб укладки ВТП по відношенню до аеродинамічних властивостей КСЕП.

Вхідними факторами, впливаючими на втрати тиску повітря в КСЕП ΔP (Па), являється витрата повітря через КСЕП G (кг/(с·м²)) і кут розкриття гофри γ° . Вихідним параметром, що підлягає дослідженню, є втрати тиску повітря у КСЕП ΔP (Па) і коефіцієнт гідравлічного тертя χ . Центральними точками плану експерименту вибирались $G = 0,038$ кг/(с·м²) і $\gamma=90^\circ$, а кроками варіювання факторів $\Delta G = 0,005$ і $\Delta \gamma = 15^\circ$. Перехід до кодованих величин здійснювалось по формулам

$$X_1 = \frac{G - G^0}{\Delta G}; X_2 = \frac{\gamma - \gamma^0}{\Delta \gamma}, \quad (3.40)$$

Дослідження проводилось по методиці повного факторного експерименту. Матриця плану дана в табл. 3.9 Для реалізації плану проводилось чотири досліди ($N=4$). Для більшої вірогідності результату і

статистичних оцінок тричі дублювались досліди в кожній точці плану ($n=3$). Таким чином, загальна кількість дослідів склала $N \cdot n = 12$. Перед реалізацією плану експерименту рандомізувався план з таблиці випадкових чисел. Порядок виконання дослідів був наступним: перша серія ($m=1$) 3,1,2,4; друга серія ($m=2$) 1,3,4,2; третя серія ($m=3$) 3,4,2,1.. По даним вимірювань визначались середнє значення (математичне очікування) ΔP і χ в точках плану по формулі (3.14).

Таблиця 3.9

Матриця планування повного факторного експерименту для двох факторів

Номер дослідів	Фіктивна величина	Планування		Взаємодія факторів	Значення вихідної величини
		X_1	X_2		
g	X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	$\Delta P, \text{Па}$
	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	
1	+	-	-	+	6,2
2	+	+	-	-	9,7
3	+	-	+	-	1,6
4	+	+	+	+	2,8

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії здійснювався за рівнянням (3.13), і вони рівні $b_0 = 9,25$, $b_1 = 4$, $b_2 = -7$, $b_{1,2} = -3,75$. Отримано слідуєчі рівняння регресії, що зв'язують вхідні фактори з втратою тиску повітря в колекторі

$$\Delta P = 9,25 + 4x_1 - 7x_2 - 3,75x_1 \cdot x_2, \quad (3.41)$$

Проводилась статистична обробка результатів експериментального дослідження, що полягає у визначенні однозначності дисперсій і що підтверджує адекватність рівняння (3.41).

В результаті експериментального дослідження аеродинамічних характеристик КСЕП отримані залежності зміни різниці тисків ΔP до і після повітропідігрівача від зміни витрати повітря G при укладці гофрованого ВТП вздовж і впоперек напрямку руху повітря.

Визначені значення коефіцієнтів гідравлічного тертя для різних способів укладки. Результати представлені Рис. 3.16, Рис. 3.17

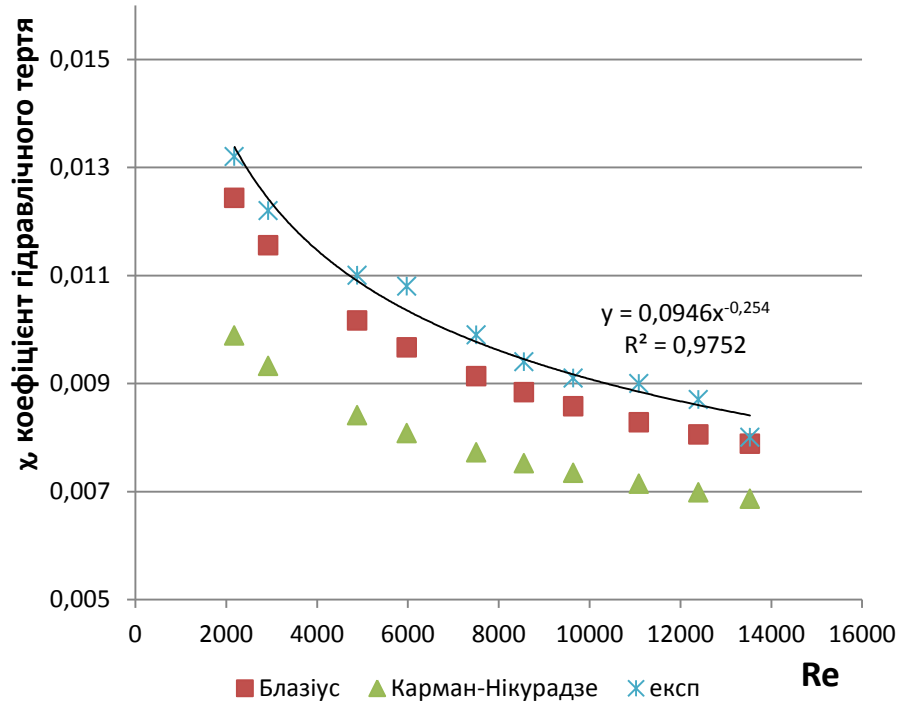


Рис. 3.15. Залежність $\chi=f(Re)$ для експериментального гладкого каналу

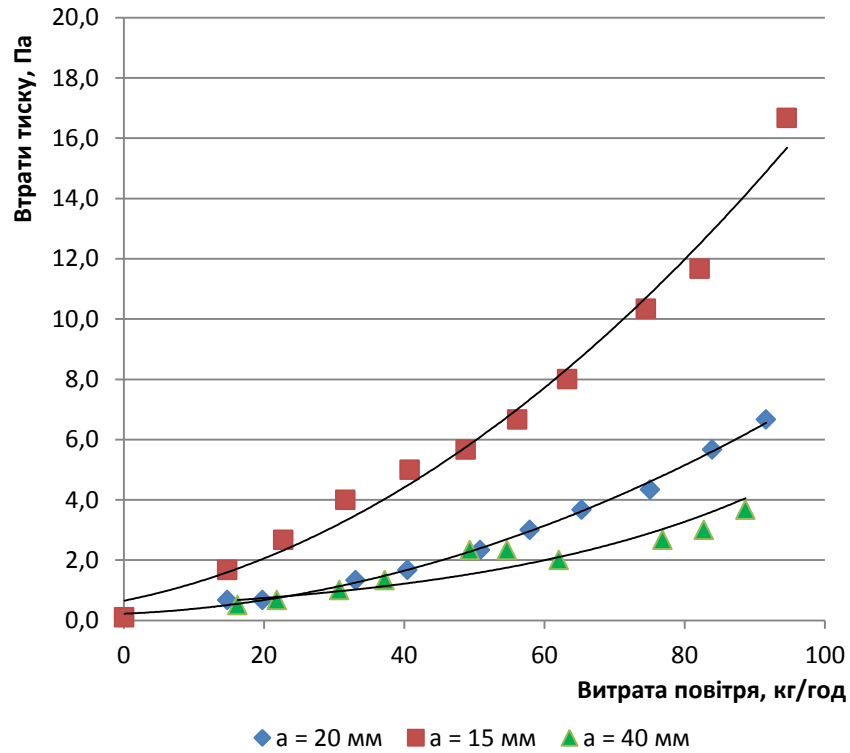


Рис. 3.16. Залежність втрат тиску ΔP від витрати повітря G через КСЕП для різних кутів розкриття гофри γ° .

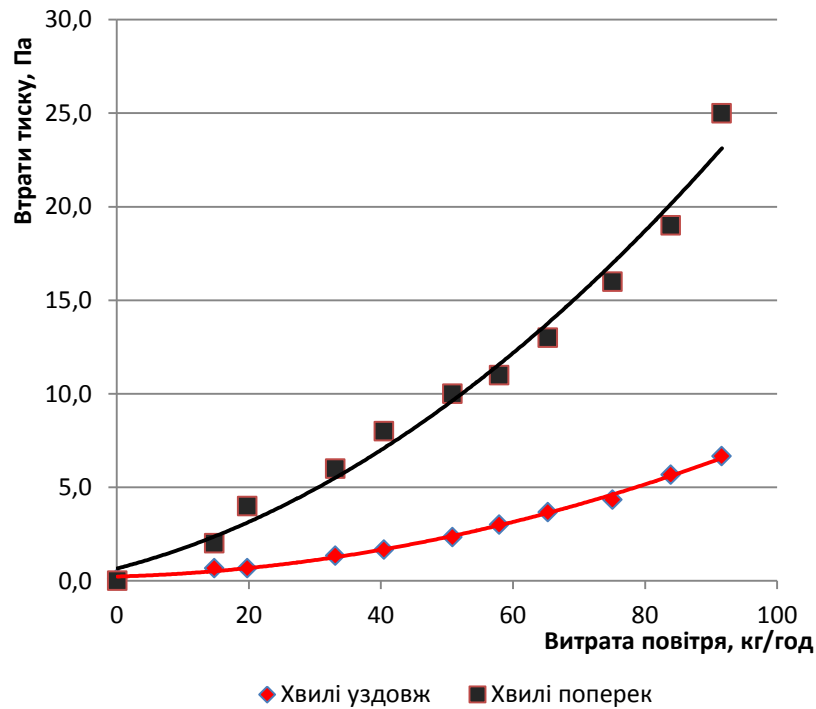


Рис. 3.17. Залежність втрат тиску ΔP від витрати повітря G через КСЕП для різних напрямів укладки при $\gamma=90^\circ$

Експериментально визначено залежності $\chi=f(Re)$ для різних способів укладки ВТП, які корелюють з рівняннями

- для $\gamma = 75^\circ\text{C}$

$$\chi = 343 \cdot Re^{-0,81}, \quad (3.42)$$

- для $\gamma = 90^\circ\text{C}$

$$\chi = 32,7 \cdot Re^{-0,68}, \quad (3.43)$$

- для $\gamma = 135^\circ\text{C}$

$$\chi = 72 \cdot Re^{-0,8}, \quad (3.44)$$

В результаті пошуку оптимального способу укладки ВТП у КСЕП виявлено, що при зменшенні кута розкриття гофри до 90° ($a=20\text{мм}$) коефіцієнт гідравлічного тертя зростає на 5-7% на кожні 30° , а після 90° на 20-25% на кожні 15° . Оптимальним способом укладки з точки зору теплообміну та аеродинаміки являється гофрована укладка ВТП з кутом розкриття гофри 90° і хвилі розташовуються вздовж напрямку потоку повітря.

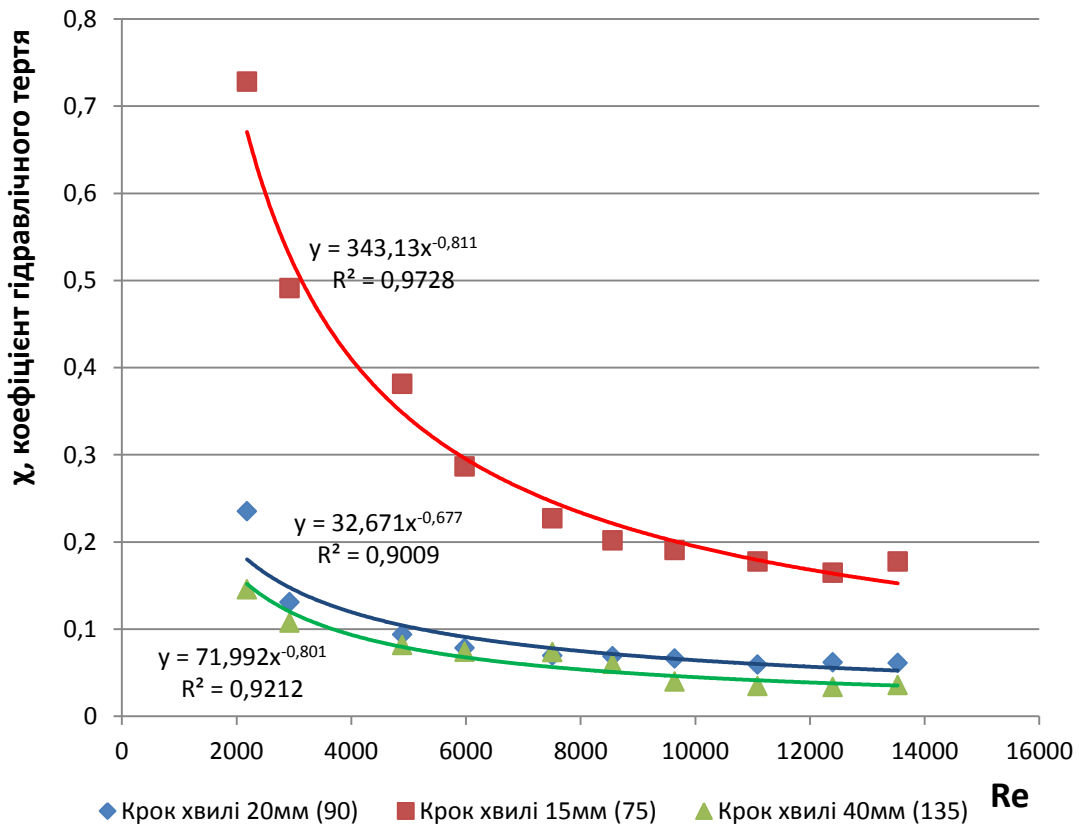


Рис. 3.18. Залежність $\chi=f(Re)$ для різних способів укладки ВТП у КСЕП

3.5 Експериментальне визначення питомого електричного опору вуглеграфітового трикотажного полотна

Дослідження електричного опору проводилося на експериментальному стенді (Рис. 3.1). Довжиною провідника приймалась відстань між вживленими мідними провідниками, дослід проводився при змінних значеннях напруги. Згідно закону Ома

$$R_{ВТП} = \frac{u}{i}, \quad (3.45)$$

де: i – сила струму, А;

u – напруга, В.

Електрична схема комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача представлена на Рис. 3.19.

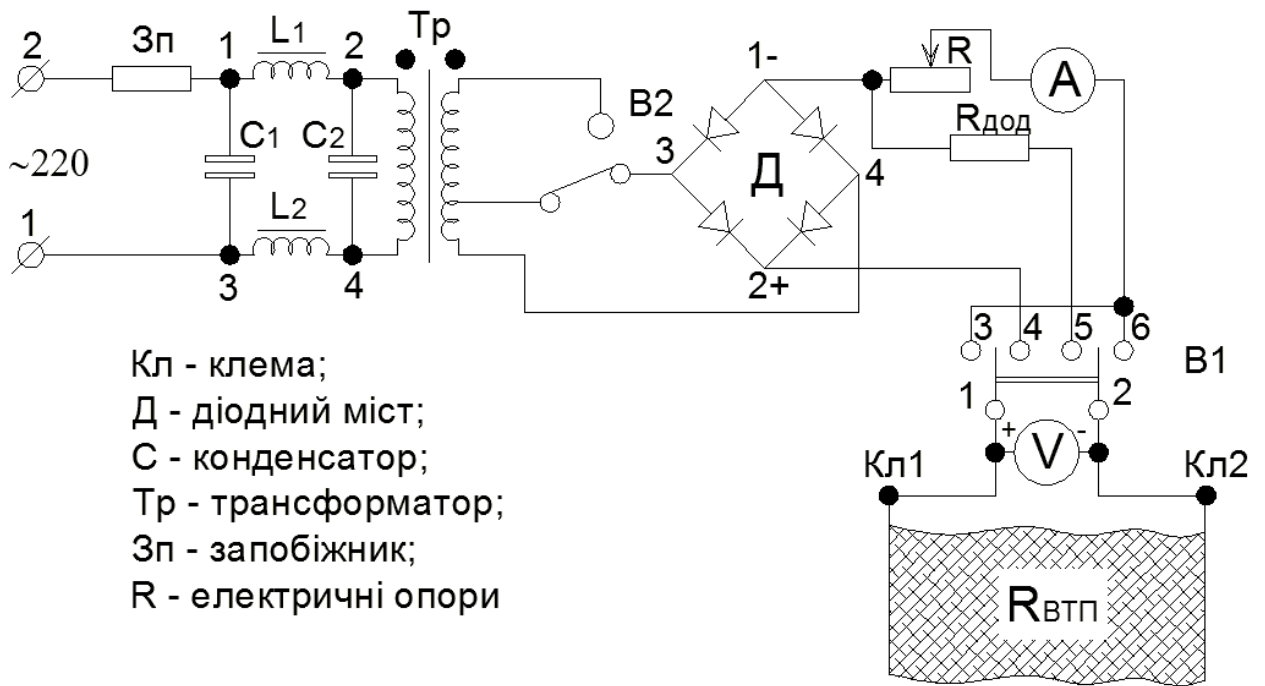


Рис. 3.19. Електрична схема КСЕП.

Вимірювання сили струму і напруги проводилися для трьох довжин l провідника (відстань між мідними пластинами) 0,3 м; 0,5 м; 1 м. Результати експериментальних досліджень приведені в таблиці 3.10

Таблиця 3.10

Експериментальні дані

l	u	i	R	ρ/S	$\bar{\rho}$
<i>м</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом/м</i>	<i>Ом/м</i>
0,5	45	6	7,50	15,00	15,07
	100	13	7,69	15,38	
	125	17	7,35	14,71	
0,3	40	10	4,00	13,33	
	75	15	5,00	16,67	
	90	19	4,74	15,79	
1	35	2,5	14,00	14,00	
	60	4	15,00	15,00	
	110	7	15,71	15,71	

Середньоінтегральне значення питомого електричного опору ρ/S складає 15,07 Ом/м.

3.6 Висновки

1. Встановлено, що використовуване вуглеграфітове трикотажне полотно має високу поглинаючу здатність ($As = 0,94$) при гофрованій укладці при куту розкриття гофри $\gamma = 90^\circ$, стійкість до тривалої експлуатації та не потребує нанесення селективного покриття, що значно знижує його вартість.

2. Експериментально отримані критеріальні рівняння, що описують теплообмінні процеси у випадку обдуву нагрітого вуглеграфітового трикотажного полотна в пласкому каналі при $1000 > Re > 12\ 000$: для прямої $Nu = 0,14 Re^{0,62}$ та для гофрованої укладки (відстань між хвилями близько 20мм) $Nu = 0,122 Re^{0,8}$.

3. Експериментально отримані критеріальні рівняння для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя повітря у випадку обдуву гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна в пласкому каналі з при $1000 > Re > 12000$ $Nu = 32,67 \cdot Re^{-0,677}$.

4. Визначено оптимальний спосіб укладки вуглеграфітового трикотажного полотна – це гофрована укладка, хвилями вздовж напрямку потоку повітря, з кутом розкриття гофри 90° з точки зору теплообміну, аеродинаміки та поглинаючої здатності.

5. Експериментально визначено питомий електричний опір вуглеграфітового трикотажного полотна типу УТП виражений величиною ρ/S складає 15,07 Ом/м.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З КОМБІНОВАНИМ СОНЯЧНО- ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОВІТРОПІДГРІВАЧЕМ

4.1 Використання комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача

- На основі досліджень проведених в розділах 2 і 3 запропоновано конструкцію КСЕП для промислового виробництва. Для зменшення коефіцієнту теплових втрат через осклення, зниження ваги приладу та зменшення його крихкості [81, 110] світлопрозоре покриття виконати зі стільникового полікарбонату товщиною 6мм; корпус з протиударного АБС-пластику (акрилонітрилбутадієнстирол); тепла ізоляція з мінеральної вати (густина 70-100 кг/м³); світловідбиваюча плівка на яку укладений абсорбер з вуглеграфітового трикотажного полотна типу УТП; відстань від плівки до світлопрозорого покриття 20мм [84, 147, 146]; в полотно вживлено на протилежних боках мідні провідники діаметром 4мм; провідники мають клеми для під'єднання електродротів; ВТП укладається гофровано, хвилями уздовж потоку повітря – відстань між піками хвиль 20мм (кут розкриття гофри $\gamma=90^\circ$).

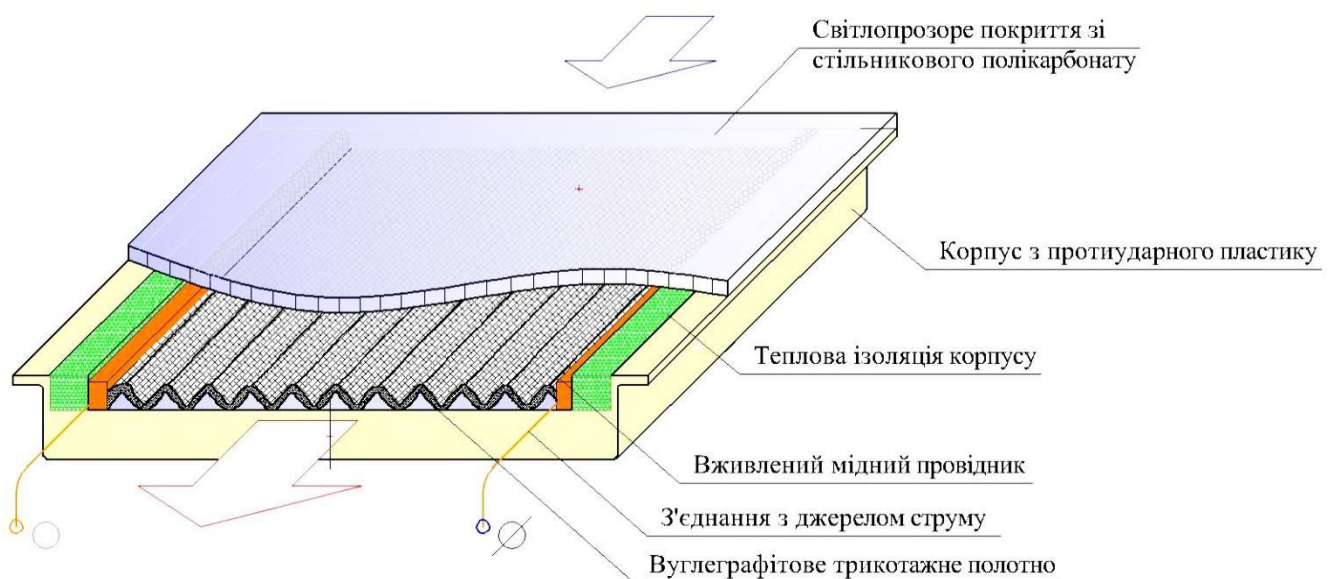


Рис. 4.1. Вигляд промислового зразка КСЕП.

Сонячний колектор працює так:

Поглинач сонячної енергії виготовлений з вуглеграфітового трикотажного полотна, укладеного гофровано. Сонячні промені проникають через світлопрозоре захисне покриття та потрапляють на абсорбер, тим самим нагріваючи його. Повітря, проходячи через повітропідігрівач, контактує та частково продувається з ВТП і нагрівається. Також повітропідігрівач оснащений підключенням до електромережі, що догріває абсорбер при недостатній енергетичній освітленості. Корпус комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача теплоізолюваний та електроізолюваний. Стільниковий полікарбонат, яким накрито КСЕП за рахунок стільникового прошарку виконує роль верхнього шару теплоізоляції приладу, тим самим підвищуючи його ефективність.

4.2 Визначення частки теплового навантаження, що заміщується енергією сонця та вітру для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем

З метою узагальнення результатів моделювання був використаний метод теорії подібності, суть якого зводиться до того, що результати будь-якого дослідження опрацьовуються в критеріях подібності, що представляють собою безрозмірні комплекси, що об'єднують всі величини, що характеризують явище або процес, що розглядається [62]. До переваг критеріїв подібності потрібно віднести те, що їх використання дозволяє встановити вплив навіть тих параметрів, які в ході експерименту підтримувались незмінними [62].

По аналогії з відомим f -методом [3] для розробленої системи було введено безрозмірні параметри Z та J , які представляють собою відношення кількості поглинутого геліополем сонячного випромінювання і можливої виробки електроенергії вітрогенератором до теплового навантаження споживача за розрахунковий період [7]

$$Z = \frac{F_R \cdot A_{\text{КСЕП}} \cdot (\overline{\tau\alpha}) \cdot \overline{I_K} \cdot n}{E_{\text{П}}}, \quad (4.1)$$

$$J = \frac{\overline{\rho_{\text{П}}} \cdot \eta_{\text{П}} \cdot \xi \cdot A_{\text{БК}} \cdot \overline{v_B^3} \cdot k_n \cdot n}{E_{\text{П}}}, \quad (4.2)$$

де: $A_{\text{КСЕП}}$ – площа геліополя, м²;

$\overline{\tau\alpha}$ - середній оптичний ККД КСЕП за розрахунковий період;

$\overline{I_K}$ - середня інтенсивність сонячного випромінювання за розрахунковий період, Вт/м²;

n – кількість годин розрахункового періоду, год;

$E_{\text{П}}$ – теплове навантаження споживача за розрахунковий період, Дж;

$\overline{\rho_{\text{П}}}$ - середня густина повітря за розрахунковий період, кг/м³;

$A_{\text{БК}}$ – площа обдуву вітрового колеса, м²;

$\eta_{\text{П}}$ – ККД вітрогенератора ($\eta_{\text{П}} \approx 0,85$);

ξ - коефіцієнт використання вітру ($\xi \approx 0,4$);

k_n – коефіцієнт, що залежить від висоти розміщення вітрового колеса.

Для кожного значення коефіцієнту f було вибрано два значення параметрів Z і J , що розраховуються по формулам (4.1) та (4.2). В результаті для різноманітних періодів року зіставлено безліч двомірних таблиць, що мають вигляд як в табл.1 і відображують залежність коефіцієнту заміщення від параметрів Z та J [5, 120].

Таблиця 4.1

Загальний вигляд двомірної таблиці, що показують залежність f від Z та J .

	Z_1	Z_2	Z_3	...	Z_k
J_1	f_{11}	f_{12}	f_{13}	...	f_{1k}
J_2	f_{21}	f_{22}	f_{23}	...	f_{2k}
J_3	f_{31}	f_{32}	f_{33}	...	f_{3k}
J_4	f_{41}	f_{42}	f_{43}	...	f_{4k}
...
J_n	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	...	f_{nk}

На рисунку 2 показано графік залежності коефіцієнту заміщення від параметрів Z і J побудований для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем при кліматичних умовах Київської області.

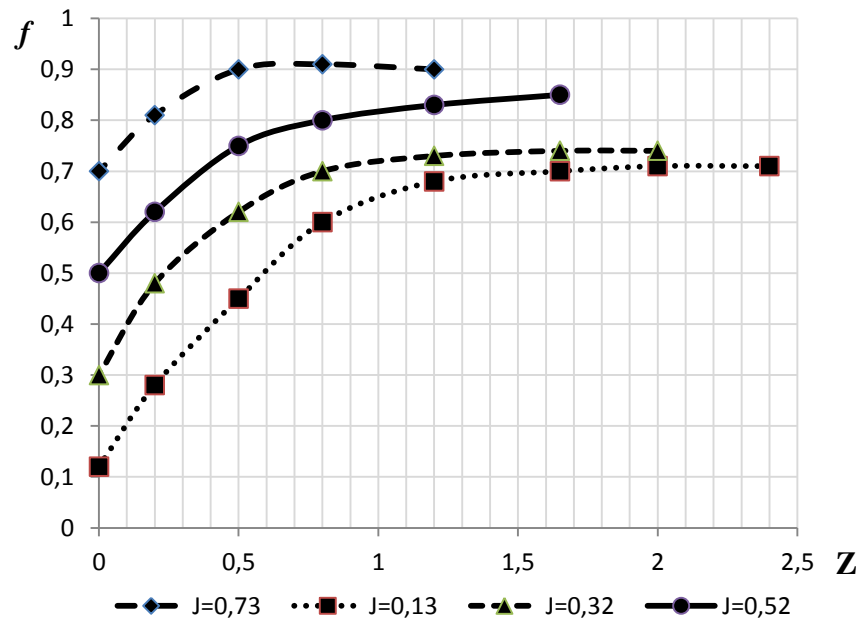


Рис. 4.2. Графік залежності коефіцієнту заміщення системи тепlopостачання з КСЕП від параметрів Z та J (Київська обл.).

Аналіз результатів моделювання дозволив встановити, що при $J = \text{const}$ значення коефіцієнту заміщення установок, що розглядаються, достатньо добре апроксимується залежністю вигляду

$$F = A - B \cdot \exp(-\varrho \cdot Z), \quad (4.3)$$

A – граничне значення коефіцієнту заміщення системи тепlopостачання з КСЕП, що досягається при $Z \rightarrow \infty$;

B – граничне значення коефіцієнту заміщення СЕ, досягається при її сумісній роботі з ВЕ коли $Z \rightarrow \infty$ (при використанні тільки СЕ параметр $B=A$)

ϱ – показатель степені.

В ході подальших досліджень було встановлено, що при $J = \text{var}$ параметри A , B і ϱ також змінюються і апроксимуються наступними виразами

$$A = c_1 + c_2 J - c_3 J^2; \quad (4.4)$$

$$B = c_1 - c_4 J; \quad (4.5)$$

$$Q = c_6 + c_5 J^2; \quad (4.6)$$

де: $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ – постійні коефіцієнти (табл.4.2).

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнтів $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$

Розрахунковий період	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
Січень	0,43	0,61	0,42	0,22	$4 \cdot U_0^{-0,55}$	$3,4 \cdot U_0^{-0,55}$
Лютий	0,51	0,45	0,33	0,3	$4 \cdot U_0^{-0,42}$	$2,7 \cdot U_0^{-0,43}$
Березень	0,62	0,42	0,18	0,45	$4 \cdot U_0^{-0,24}$	$2,9 \cdot U_0^{-0,4}$
Квітень	0,85	0,25	0,12	0,78	$4,8 \cdot U_0^{-0,3}$	$2,2 \cdot U_0^{-0,35}$
Травень	0,87	0,15	0,06	0,84	$5 \cdot U_0^{-0,24}$	$2,3 \cdot U_0^{-0,26}$
Червень	0,97	0,13	0,07	0,84	$5,9 \cdot U_0^{-0,31}$	$1,7 \cdot U_0^{-0,23}$
Липень	0,88	0,1	0,03	0,85	$4,8 \cdot U_0^{-0,24}$	$1,4 \cdot U_0^{-0,2}$
Серпень	0,85	0,13	0,03	0,8	$4,7 \cdot U_0^{-0,22}$	$1,8 \cdot U_0^{-0,24}$
Вересень	0,77	0,33	0,15	0,68	$4,4 \cdot U_0^{-0,28}$	$2,3 \cdot U_0^{-0,34}$
Жовтень	0,58	0,55	0,2	0,5	$1,4 \cdot U_0^{-0,39}$	$2,7 \cdot U_0^{-0,34}$
Листопад	0,4	0,57	0,38	0,32	$5 \cdot U_0^{-0,48}$	$3,4 \cdot U_0^{-0,36}$
Грудень	0,27	0,42	0,42	0,23	$3,7 \cdot U_0^{-0,27}$	$3,2 \cdot U_0^{-0,52}$
Рік	0,73	0,43	0,18	0,59	$4,4 \cdot U_0^{-0,34}$	$2,4 \cdot U_0^{-0,35}$

Величина U_0 , що входить в коефіцієнт c_5 та c_6 відображає теплотехнічну досконалість сонячного повітропідігрівача і визначається з формули [29]

$$U_0 = \frac{U_L}{(\tau\alpha)}, \quad (4.7)$$

де: U_L – коефіцієнт теплових втрат сонячного повітропідігрівача, Вт/(м²К).

При подальших дослідженнях було встановлено, що значення коефіцієнту f достатньо добре апроксимуються рівнянням вигляду

$$f = c_1 + c_2 J - c_3 J^2 + (c_4 J - c_1) \exp(-(c_5 J^2 + c_6) \cdot Z), \quad (4.8)$$

де: c_n – коефіцієнти, що змінюються в залежності від пори року (табл.2) для конкретного природного регіону.

Остання залежність представляє собою узагальнену залежність частки теплового навантаження споживача, що заміщується за рахунок СЕ і ВЕ, від технічних показників системи тепlopостачання з КСЕП і кліматичних характеристик району.

4.3 Тепловий акумулятор для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем

Дослідження [2,15,28,84] щодо використання насадочних (галькових) акумуляторів теплоти для систем сонячного тепlopостачання, показують, що насадка з гальки має наступні технічні характеристики:

- в якості теплового акумулятора вона може використовуватись для акумулювання і холоду (природного), тобто її використання можливе як в режимі опалення, так і в режимі охолодження;

- має значну теплосприймаючу поверхню теплообміну в шарі гравію, що забезпечує практично повну передачу тепла при дуже невеликих різницях температур гравія та повітря;

- поєднує в одному агрегаті теплообмінник і тепловий акумулятор;

- представляє протиточний теплообмінник, в об'ємі якого здійснюється сприятливий для умов експлуатації розподіл температур;

- просування повітря через шар насадки може здійснюватись як примусово, так і природньо (з допомогою гравітації);

- вартість самої насадки (гальковика, гравія) і тари (контейнера) для неї малі;

- відсутні проблеми захисту внутрішніх стінок контейнера від якого кородуюча дія теплоносія і затоплення місця розміщення акумулятора внаслідок відсутності течії теплоносія через розгерметизацію тари.

Однак при розробці насадкових акумуляторів теплоти важливе значення має правильна оцінка теплотехнічних і аеродинамічних характеристик шару насадки.

Інтенсивність зарядки чи розрядки галькової насадки при інших рівних умовах залежить від ефективного коефіцієнта теплообміну між повітрям та елементами насадки $\left(\alpha_{\text{эф } f-n}\right)$ та величини теплообмінної поверхні шару насадки, що припадає на одиницю об'єму (a_v) .

Ефективний коефіцієнт теплообміну можна отримати якщо ввести поправочний множник в коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\text{эф } f-n}$ [15]:

$$\alpha_{\text{эф } f-n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{к } f-n}} + \frac{d}{2\lambda_m\psi}} = \frac{\alpha_{\text{к } f-n}}{1 + \frac{Bi}{\psi}} \quad (4.9)$$

де: $Bi = \frac{\alpha_{\text{к } f-n} d}{2\lambda_m}$, а ψ - коефіцієнт форми, для кулеподібних тіл

дорівнює 1).

Теплообмінна поверхня кулеподібних елементів акумулятора (кульової насадки), яка припадає на одиницю його об'єму, може бути визначена за виразом [3]

$$a_v = 6(1 - m_0)d^{-1} \quad (4.10)$$

Значення $\alpha_{\text{к } f-n}$, m_0 і d в формулах (4.10) і (4.9) відповідно можуть бути визначені з критеріальних рівнянь

$$Nu = 0,106Re \text{ при } Re < 200 \quad (4.11)$$

$$Nu = 0,106Re^{0,67} \text{ при } Re > 200 \quad (4.12)$$

які отримані на основі обробки численних експериментальних даних різних авторів і співвідношень

$$m_0 = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_m} \quad (4.13)$$

$$d = \left(\frac{6V}{n\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.14)$$

де V і n – відповідно загальний об'єм і число елементів у шарі насадки.

Підставляючи (4.10)– (4.14) в (4.9), помічаємо, що для визначення ефективного коефіцієнта теплообміну $\left(\alpha_{\text{эф } f-H} \right)$ потрібно знати коефіцієнт теплопровідності матеріалу насадки $\left(\lambda_m \right)$.

Теплофізичні і механічні характеристики ряду будівельних матеріалів відомі [65]. Дані щодо теплофізичних характеристик річкового гальковика наведені в [3] середнє значення c_{p_m} і ρ_m 840 Дж/(кг. $^{\circ}$ С) і 2560 кг/м 3 , а m_0 =0,37. Середнє значення α_m , визначене методом регулярного режиму 0,455.10 $^{-6}$ м 2 /с. Значення коефіцієнта теплопровідності гальковика складає 0,98 Вт/(м. $^{\circ}$ С) [3].

Отримані дані дозволяють оцінювати вплив температурного градієнта всередині фракцій (елементів) на теплотехнічні характеристики насадкового акумулятора теплоти.

Одна із найбільш важких характеристик насадкового акумулятора теплоти – коефіцієнт акумуляції елемента (K_{ψ}), який численно дорівнює відношенню теплоти, акумульованого елементом насадки діаметром d , до теплоти, яка акумульована елементом насадки нескінченно малим діаметром $d \rightarrow 0$ із того же матеріалу, при тих же умовах нестационарного нагріву [15], т.е.

$$K_{\psi} = \frac{Q_{ak}}{Q_{d \rightarrow 0}} \quad (4.15)$$

Для визначення коефіцієнту акумуляції елементів насадкового акумулятора теплоти скористаємося рівнянням теплового балансу, в якому прийнято умову рівності швидкості накопичення теплоти в об'ємі елементів і інтенсивності надходження його до їх поверхні із потоку теплоносія для одиничного об'єму насадки

$$(1 - m_0) \rho_m C_{p_m} \frac{dt_n}{dZ} = \alpha_{k_{f-n}} a_v (t_f - t_n), \quad (4.16)$$

Початкові і граничні умови

$$\left. \begin{aligned} t_n = t_{n1} = \text{const} \text{ при } Z = 0, H \geq 0 \\ t_f = t_{f_{ex}} = \text{const} \text{ при } H = 0, Z > 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Рішення рівняння (3.59) при граничних умовах (3.60) має вигляд

$$t_n - t_{f_{ex}} = (t_{n1} - t_{f_{ex}}) \exp(-3BiF_0) \quad (4.18)$$

$$BiF_0 = \frac{2\alpha_{k_{f-n}} Z}{C_{p_m} \rho_m d}, \quad (4.19)$$

Для різниці температур в елементі насадки на початку (t_{n1}) і в кінці (t_{n2}) процесу зарядки акумулятора теплоти рішення (4.19) має вигляд

$$t_{n2} - t_{n1} = (t_{f_{ex}} - t_{n1}) [1 - \exp(-3BiF_0)], \quad (4.20)$$

Кількість теплоти, акумульованої в елементі насадки, для одиничного об'єму насадки при цьому дорівнює

$$Q_{ak_v} = \frac{Q_{ak}}{V_{ak}} = (1 - m_0) C_{p_m} \rho_m (t_{n2} - t_{n1}), \quad (4.21)$$

З урахуванням (4.20) вираз (4.21) може бути переписано

$$Q_{ak_v} = (1 - m_0) \rho_m C_{p_m} (t_{f_{ex}} - t_{n1}) [1 - \exp(-3BiF_0)], \quad (4.22)$$

Для елементів насадки з нескінченно малим діаметром (т.е. $d \rightarrow 0$ або $\lambda \rightarrow \infty$) вираз (4.22) має вигляд

$$Q_{акv(d \rightarrow 0)} = (1 - m_0) \rho_m C p_m (t_{f_{ex}} - t_{H1}), \quad (4.23)$$

Підставляючи (4.21) і (4.22) в (4.15) маємо

$$K_\psi = 1 - \exp(-3BiF_0), \quad (4.24)$$

На рис.3.5 приведена залежність $K_\psi = f(BiF_0)$. Як видно з рис.3.5, збільшення BiF_0 від 0 до $1,0 \div 1,2$ приводить до помітного збільшення K_ψ . Подальше збільшення BiF_0 значно не збільшить K_ψ .

Інша значна характеристика насадкового акумулятора теплоти – енергетичний коефіцієнт (коефіцієнт ефективності по теплообміну), який визначається відношенням кількості акумульованого тепла ($Q_{ак}$) до енергії, витраченої на рух (фільтрацію) теплоносія через шар насадки (NZ) [15,84]:

$$E = \frac{Q_{ак}}{N_Z} \quad (4.25)$$

$$\text{де } N = \frac{G_f \Delta P}{\rho_f}, \quad (4.26)$$

$$\text{а } G_f = \rho_f v_f F_{nc} \quad (4.27)$$

$$\text{з урахуванням } V_{ак} = F_{nc} H \quad (4.28)$$

Отже,

$$E = \frac{K_\psi H C p_m \rho_m (1 - m_0) (t_{f_{ex}} - t_{H1})}{\Delta P v_f Z}, \quad (4.29)$$

Величина ΔP в (3.72) – перепад тиску при фільтрації теплоносія через шар насадки.

Однією з найбільш поширених практичних формул для визначення ΔP являється двочленна формула С. Ергуна [3], яка отримана на основі обробки багаточисленних експериментів даних різних авторів

$$\Delta P = \frac{H}{d} \frac{1 - m_0}{m_0} \rho_f v_f^2 \left[\frac{150(1 - m_0)}{\text{Re}} + 1,75 \right] \quad (4.30)$$

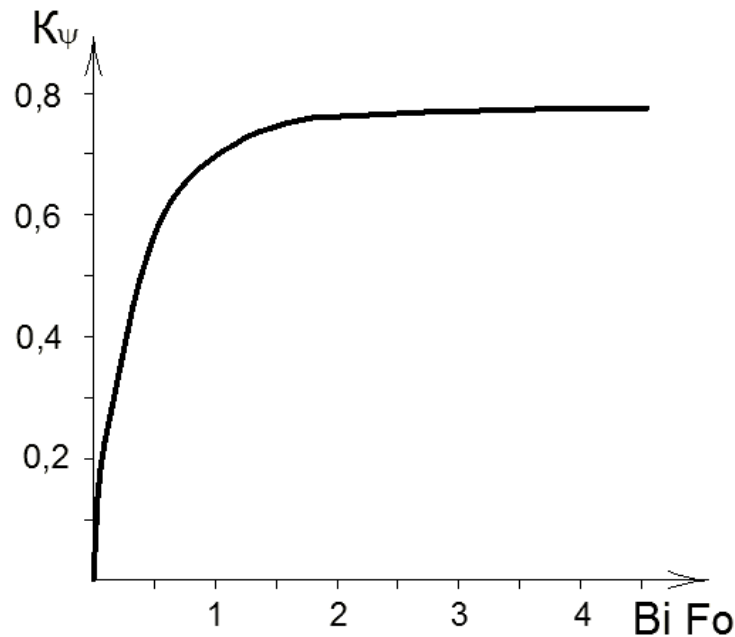


Рис. 4.3. Залежність коефіцієнту акумуляції теплоти елемента насадочного акумулятора від добутку критеріїв $BiFo$.

На відміну від інших відомих формул [15,84,117] формула (4.30) дозволяє правильно врахувати перепад тиску в шарі насадки при малій (в'язкий режим) і великій (інерційний режим) швидкостях потоку теплоносія.

З урахуванням (4.30) виразу для енергетичної ефективності прийме вигляд

$$E = \frac{C_{p,m} \rho_m m_0^3 d (t_{f,ex} - t_{n1})}{\rho_f v_f^3 \left[\frac{150(1-m_0)}{Re} + 1,75 \right] Z} \quad (4.31)$$

Як впливає зі спільного розгляду формул (4.8), (4.9), (4.19), (4.26) і (4.30) значне збільшення розмірів елементів насадкового акумулятора тепла з метою зменшення перепаду тиску в шарі насадки приводить до зменшення теплообмінної поверхні насадки і до істотного температурного градієнту всередині елементів в результаті зменшення коефіцієнту акумуляції тепла (K_ψ).

Використання більш маленьких елементів, хоч і дозволяє підвищити коефіцієнт акумуляції тепла і теплообмінну поверхню насадки, сприяє

збільшенню перепаду тиску і потребує збільшеної потужності вентилятора, проганяє теплоносій (повітря) через акумулююче середовище.

Вказані суперечливі одна одній умови означають, що існує оптимальне значення розмірів елементів насадки (при фіксованих швидкостях теплоносія), забезпечуючи максимальне значення енергетичного коефіцієнта (E).

Оптимальне значення розміру (еквівалентного діаметру) елементів насадкового акумулятора може визначитися з умови

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 0, \quad (4.32)$$

Вираз для кількості теплоти, акумульованого в шарі насадки (Q_{ak}), отриманого з умови рівності швидкості накопичення теплоти в насадці і інтенсивності надходження (підведення) його до насадки, має вигляд

$$Q_{ak} = \alpha_{e\phi_{f-M}} a_v (t_f - t_M) Z, \quad (4.33)$$

Підставляємо (4.26) – (4.28) і (4.33) в відношення (4.25), з врахуванням маємо:

$$E = \frac{\frac{12m_o^3 \lambda_f \lambda_M (t_f - t_M)}{18,87 v_f \lambda_M + \lambda_f \vartheta_f d}}{\rho_f \vartheta_f \left[\frac{150(1 - m_o) v_f}{d} + 1,75 \vartheta_f \right]}, \quad (4.34)$$

при $Re < 200$ і

$$E = \frac{\frac{12m_o^3 \lambda_f \lambda_M (t_f - t_M) \vartheta_f^{0,67}}{3,28 \lambda_M d^{0,33} v_f^{0,67} + d \lambda_f \vartheta_f^{0,67}}}{\rho_f \vartheta_f \left[\frac{150(1 - m_o) v_f}{d} + 1,75 \vartheta_f \right]}, \quad (4.35)$$

при $Re > 200$.

Підставляємо (3.77) в (3.75), після деяких перетворень для режиму $Re < 200$ маємо:

$$d_{opt} = 40,215 \frac{v_f}{v_f} \sqrt{\frac{(1 - m_o) \lambda_M}{\lambda_f}}, \quad (4.36)$$

З врахуванням числових значень $m_o = 0,37$, $\lambda_M = 0,98 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$,
 $\lambda_f = 0,0267 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $\nu_f = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (при $t_f = 30^\circ\text{C}$) рішення (4.36) може бути
написано в вигляді:

$$d_{opt} = \frac{0,0031}{\nu_f}, \text{ м}, \quad (4.37)$$

Підставляючи (4.36) в (4.33) для режиму $\text{Re} > 200$ отримаємо:

$$\lambda_f (\mathcal{G}_f d)^{1,67} + 0,33 \mathcal{G}_f d - 188,29 (1 - m_o) \nu_f^{0,67} \lambda_M = 0, \quad (4.38)$$

З врахуванням числових значень λ_f , λ_M , ν_f і m_o вирішуючи рівняння
(4.38) методом дотичних, маємо

$$d_{opt} = \frac{0,0012}{\nu_f}, \text{ м}, \quad (4.39)$$

Із зіставлених розв'язків (4.37) і (4.39) можемо зробити висновок, що
при забезпеченні турбулентності потоку теплоносія (коли 200) максимальне
значення енергетичного коефіцієнта досягти при відносно менших (в 2,6
рази) значеннях швидкості потоку теплоносія через шар насадки в порівнянні
з ламінарним режимом, коли $\text{Re} > 200$.

На основі результатів дослідження оптимізацій розмірів елементів
насадкового акумулятора теплоти можна встановити оптимальне значення
висоти шару насадки. Для цього використаємо поняття ефективності
акумуляції теплоти в насадковому акумуляторі, яка представляє собою
відношення кількості теплоти, акумульованого в шарі насадки за час Z , до
кількості тепла, підведеному до входу насадки за той самий час [3]

$$\eta_{dk}^T = \frac{Q_{dk}}{Q_{подв}}, \quad (4.40)$$

Величина підведеного до входу перетину насадки тепла ($Q_{подв}$) за час Z
визначається з

$$Q_{подв} = G_f C_{p_f} (t_{f_{ex}} - t_{M_1}) Z, \quad (4.41)$$

Підставляємо розглянуті залежності в (4.40) маємо:

$$\eta_{dk}^T = k_{\Psi} \frac{H(1-m_o)\rho_M C_{P_M}}{\rho_f \nu_f C_{P_f} Z}, \quad (4.42)$$

Як випливає з (4.42), при інших рівних умовах (мається на увазі k_{Ψ} , ρ_M , C_{P_M} , m_o , ρ_f , C_{P_f} і Z) η_{dk} прямо пропорційна висоті шару (H) і зворотно пропорційна швидкості теплоносія у вільному від насадки перетині акумулятора. Дійсно, при відносно великих швидкостях теплоносія і малої висоти шару насадки збільшується скидне тепло і ефективність акумулятора знижується.

$$H_{onm} = 2,678 \cdot 10^{-6} \frac{\eta_{dk}^T Z}{k_{\Psi} d}, \text{ м, при Re} < 200 \quad (4.43)$$

$$H_{onm} = 1,037 \cdot 10^{-6} \frac{\eta_{dk}^T Z}{k_{\Psi} d}, \text{ м, при Re} < 200 \quad (4.44)$$

Для встановлення значення H_{onm} в стадії передпроектних опрацювань систем сонячного опалення с насадковими акумуляторами тепла можна допустити, що $\eta_{dk}^T \approx k_{\Psi}$, а максимальна тривалість періоду зарядки акумулятора тепла системи (Z) складає не більше 6 годин, тоді

$$H_{onm} = \frac{0,0578}{d}, \text{ м, при Re} < 200 \quad (4.45)$$

$$H_{onm} = \frac{0,0224}{d}, \text{ м, при Re} > 200 \quad (4.46)$$

Зокрема, при $d = 0,03\text{м}$ значення H_{onm} складає 1,927м при $\text{Re} < 200$ і 0,747м при $\text{Re} > 200$.

Мале значення H_{onm} в режимі $\text{Re} > 200$ порівняно з режимом, коли $\text{Re} < 200$, пояснюється збільшенням перепаду тиску по висоті насадки при завихренні (турбулізації) потоку теплоносія.

4.4 Вплив вітру на ефективність роботи КСЕС і розрахунок вітрогенератора

Головною причиною низької адаптованості геліосистем теплопостачання в реальні енергозатратні галузі промисловості та народного господарства є доволі низька ефективність цих систем і їх елементів. Основним елементом будь-якої геліосистеми є сонячний колектор. Його ефективність суттєво залежить від мінливих погодних умов, таких як напрям та сила вітру, хмарність, туманність і т.д. Відомі шляхи збільшення ефективності колекторів – це зменшення тепловтрат колектора, збільшення ефективності відводу теплоти від абсорбера, оптимізація способу установки колекторів (кут нахилу, орієнтація і т.д.). Дослідженню цих шляхів присвячено безліч наукових та інженерних праць [36, 39, 47, 66, 81, 84, 149, 155], в яких досить широко описані ті чи інші методи оптимізації технічних характеристик сонячних нагрівачів. Та все ж при розробці нових, нестандартних конструкцій сонячних теплових колекторів з'являється необхідність в пошуку нестандартних шляхів підвищення їх ефективності.

Єдиним корисним використанням енергії вітру може бути її перетворення в електричну енергію. Важливою проблемою у генерації електроенергії є нестабільність вітрового потоку, що призводить до використання коштовних інверторів, акумуляторів, стабілізаторів та ін. Використання нових типів сонячних повітропідігрівачів з абсорбером із електропровідної вуглеграфітової тканини [75, 76] дає можливість подавати «брудну» електроенергію відразу з вітрогенератора на нагрівач перетворюючи її в корисну теплову енергію

Однією з визначальних енергетичних характеристик сонячних колекторів є коефіцієнт відведення теплоти від колектору F_R [29, 123]

$$F_R = \frac{G \cdot c_p}{U_L} \left(1 - e^{-\frac{U_L \cdot F'}{G \cdot c_p}} \right), \quad (4.47)$$

де G - витрата теплоносія через колектор, кг/с;

c_p – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·К);

U_L - повний коефіцієнт тепловтрат сонячного колектора, Вт/(м²·К);

F' - коефіцієнт ефективності поглинача сонячної енергії.

Повний коефіцієнт теплових втрат геліоколектору рівний [29]:

$$U_L = U_l + U_b, \quad (4.48)$$

де U_l – коефіцієнт тепловтрат через світлопрозоре покриття колектора, Вт/(м²·К);

U_b – коефіцієнт тепловтрат через дно і бокові стінки колектору, Вт/(м²·К).

$$U_l = \left(\frac{1}{\alpha_{A-C}^K + \alpha_{A-C}^P} + \frac{1}{\alpha_{C-NC}^K + \alpha_{C-NC}^P} \right)^{-1}, \quad (4.49)$$

де α_{A-C}^K - коефіцієнт теплопередачі конвекцією від абсорбера до світлопрозорого покриття Вт/(м²·К);

α_{A-C}^P - коефіцієнт теплопередачі випромінюванням від абсорбера до світлопрозорого покриття Вт/(м²·К);

α_{C-NC}^K - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від світлопрозорого покриття до навколишнього середовища;

α_{C-NC}^P - коефіцієнт теплопередачі випромінюванням між світлопрозорим покриттям і навколишнім середовищем.

Вітер впливає на коефіцієнт F_R лише через α_{C-NC}^K , який розраховується згідно [12, 29]

$$\alpha_{C-NC}^K = 5,7 + 3,8 \cdot V_B, \quad (4.50)$$

де V_B – швидкість вітру, м/с.

Зазвичай у плоских повітряних сонячних колекторах $U_b \gg U_l$, а $\alpha_{C-NC}^K \gg \alpha_{C-NC}^P$ - це означає, що тепловтрати прямопропорційні швидкості вітру, який обдуває геліоколектор.

При розрахунку потужності вітрогенератора спочатку визначають потужність вітрового потоку [121, 16, 50]

$$P_{II} = 0,5 \cdot \rho \cdot S_p \cdot V_B^3, \quad (4.51)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

S_p – площа круга обертання ротору.

При перетворенні механічної енергії в електричну отримуємо значні втрати енергії, тому отримана електрична потужність буде визначатися з виразу [116]

$$P_{BE} = 0,5 \cdot \rho \cdot S_P \cdot V_B^3 \cdot C_Z \cdot N_b \cdot N_g, \quad (4.52)$$

де C_Z – коефіцієнт використання енергії вітру (0,35 - гарний конструктив);

N_b – ККД генератора (0,6 для автомобільного, 0,8 для генератора на постійних магнітах);

N_g – ККД підвищувального редуктора (0,7-0,9).

4.5 Розрахунок теплової потужності системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем

Метою розрахунку системи тепlopостачання є визначення теплових характеристик кожного елемента системи і системи в цілому за тривалий період роботи (наприклад, за рік). Динамічне моделювання здійснюється за допомогою ЕВМ і класифікується як машинний експеримент геліосистеми тепlopостачання, оскільки попередньо задані вихідні параметри елементів системи можуть корегуватися після завершення всього циклу розрахунку до їх оптимальних розмірів. При цьому критерії оптимальності задаються користувачем.

Метою цього розділу є не створення моделюючої програми динамічної роботи ГСВТ, а розробка і уточнення теплових розрахунків елементів системи, на основі яких будується динамічна модель, а також принципів і особливостей структури динамічної моделі.

Найбільш оптимальним кроком при динамічному моделюванні системи тепlopостачання з КСЕП являється крок по часу в 1 годину, що були прийняті в цій роботі [39, 64, 81, 84, 125, 130, 141].

Точність динамічної моделі ГСВТ, прогнозуючої її роботу за рік, об'єктивно не повинна перевищувати 5%. При цьому абсолютна більшість похибки повинна приходиться на частку моделі клімату.

Основними величинами, визначеними в результаті динамічного моделювання системи теплопостачання, являється температура повітря після кожного елемента системи та їх теплова потужність, споживана потужність електродвигуном (якщо він присутній в елементі), теплова потужність усієї системи і сумарні витрати електроенергії. В якості вихідної інформації використовується сумарна інтенсивність сонячного випромінювання на площину КСЕ (розраховану по моделі кліматичних даних), температура навколишнього середовища, витрата теплоносія (повітря), площа КСЕ, об'єм АТ, теплова потужність ТН ДТЕ і навантаження теплопостачання. Перераховані параметри, крім температури навколишнього середовища і сумарної інтенсивності сонячного випромінювання, можуть змінювати свої значення і в залежності від обраного критерія оптимальності, а значення T_{OC} і I_K змінюються кожну годину.

В якості температур відліку приймаються температура повітря, що подається в приміщення $T_{BK} \geq 35^{\circ}C$, температура повітря в середині приміщення $T_{BV} = 18^{\circ}C$, температура навколишнього середовища, при якій починається опалювальний період $T_{OC} \leq 10^{\circ}C$.

При моделюванні роботи геліосистеми теплопостачання необхідно враховувати теплові втрати в повітропроводах. Згідно [12] тепла ізоляція повітропроводів повинна складатися із скловолокна товщиною 2,5 см.

В початковий період часу температура навколишнього середовища приймається рівною $T_{OC} = 273,16^{\circ}K$, сумарна інтенсивність сонячного випромінювання на площину КСЕ $I_K = 0 \text{ Вт/м}^2$.

В запропонованій динамічній моделі в якості вихідних даних використовуються часові значення температури навколишнього середовища і сумарної інтенсивності сонячного випромінювання на площину КСЕ, розрахованої по моделі кліматичних даних [84,152].

Корисна кількість теплоти, вироблена повітряним КСЕ, можна визначити з виразу

$$Q_{\Pi} = \eta_K * I_K * A \quad (4.53)$$

де: A - площа КСЕП, m^2 .

Для першої години розрахунку приймаємо $T_{ВН}=T_{ОС}$.

Температуру повітря після КСЕ можна визначити з рівняння

$$T_{BK} = T_{ВН} + \frac{Q_{П}}{G * c_p} \quad (4.54)$$

Температура повітря на вході в акумулятор теплоти (для випадку коли в опаленні немає потреби) або на вході в опалюване приміщення, з врахуванням тепловтрат в повітропроводах, можна визначити з рівняння

$$T_{ВН}^{AT}(T_{ВП}) = T_{BK} - \frac{A_B * K_{ПВ} * (T_{BK} - T_{ОС})}{G * c_p} \quad (4.55)$$

де: A_B - площа поверхні повітря від КСЕ до АТ або до будівлі, m^2 .

Температура повітря після АТ при його зарядці визначається з виразу

$$T_{BK}^{AT} = T_{ВН}^{AT} - \frac{\alpha_{об} * S * \Delta X}{(G * c_p)} * (T_{ВН}^{AT} - T_{ГК}) \quad (4.56)$$

де $T_{ГК}$ - температура насадки в кінці АТ, К,

і може бути визначена з виразу

$$T_{ГК} = \frac{\alpha_{об} * S * \Delta X * (T_{ВН}^{AT} - T_{ТН}) - Q_{пот}}{(\rho * S * c * \Delta X)_T} * \Delta \tau + T_{ТН} \quad (4.57)$$

Кількість акумульованої теплоти за кожен годину можна визначити з такої формули

$$Q_{П}^{AT} = G * c_p * (T_{BK}^{AT} - T_{ВН}^{AT}) \quad (4.58)$$

Температура повітря після АТ при його розрядці може бути визначена з формули

$$T_{BK}^{AT} = T_{ВН} - \frac{\alpha_{об} * S * \Delta X}{(G * c_p)_B} * (T_{ТК} - T_{ВН}^{AT}) \quad (4.59)$$

а $T_{ТК}$ в свою чергу з виразу

$$T_{ТК} = \frac{\alpha_{об} * S * \Delta X * (T_{ВН}^{AT} - T_{ТН}) - Q_{пот}}{(\rho * c * S * \Delta X)_T} * \Delta t + T_{ТН} \quad (4.60)$$

У випадку, коли необхідно опалювати будівлю, потрібно розрахувати температуру рециркуляційного повітря T_{PB} після приміщень будівлі, розрахувати тепловтрати в залежності від T_{OC} та визначити кількість повітря, що подається в приміщення.

Кількість тепла, необхідного для покриття навантаження опалення в залежності від T_{OC} визначається згідно [38, 101], а кількість повітря, що подається L з рівняння

$$L = Q_{OT} / c_p * (T_{ВП} - T_{ВВ}) \quad (4.61)$$

де $T_{ВВ}$ - температура повітря в середині приміщення, К.

Температура рециркуляційного повітря $T_{PB} = 18^\circ\text{C}$.

У випадку необхідності вмикання теплового насосу на потребу ГВП необхідно визначити коефіцієнт перетворення $E_{\text{сист}}$ в залежності від температури низькопотенційного джерела теплоти та температури теплоносія (повітря) в акумуляторі, за умови, що ТН повністю покриває навантаження опалення за даний час (рис.4.5). А з рівняння [21, 61, 65, 122] можна визначити затрати електроенергії на привід компенсатора ТН

$$Q_{\text{ел}} = Q_{\text{ТС}} / E_{\text{сист}} \quad (4.62)$$

У ряді випадків, коли відсутні детальні кліматичні дані, прийняті для динамічного моделювання системи, обмежений доступ до ЕВМ та задовольняє результат з 15% точністю, розрахувати основні параметри геліосистеми повітряного теплопостачання можна за допомогою емпіричних методів, f , Φ , $f\text{-}\Phi$ – діаграм та інших

Для системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем кореляція між коефіцієнтом заміщення f та безрозмірними комплексами Z і J описані в розділі 4.2.

Зміна витрати повітря впливає на температурну стратифікацію в гальковій насадці. Зі збільшенням витрати повітря через колектор коефіцієнт

F_R збільшується, а температурна стратифікація в акумуляторі тепла зменшується. Перший з цих факторів покращує характеристики системи, а другий погіршує їх.

Результати математичного моделювання роботи геліосистеми повітряного теплопостачання з гальковим акумулятором тепла об'ємом від 0,125 до 1 м³ на 1 м² площі колектору показали, що в порівнянні з системами нагріву рідини характеристики повітряних геліосистем слабше залежать від об'єму акумулятора. Для сучасних геліосистем повітряного теплопостачання економічно виправдовується зниження об'єму галькового акумулятора до 0,1 м³ на 1 м² КСЕ [13]. Більш слабка залежність коефіцієнта заміщення f від місткості акумулятора пов'язана з можливістю роботи системи в режимі без використання акумулятора, коли нагріте повітря після колектору надходить безпосередньо в будівлю і з сильною стратифікацією температури в гальковій насадці. При збільшенні об'єму засипки фактично зростає об'єм холодної частини акумулятора, яка різко нагрівається і охолоджується в рівній мірі, як і його гаряча частина.

Значний вплив на коефіцієнт заміщення f надає вітрогенератор, приєднаний паралельно до КСЕП. Застосування вітрогенератора дозволяє компенсувати втрати теплоти КСЕП від коливання сили вітру і отримувати теплову енергію у КСЕП в похмурі години та вночі. Тобто температурний діапазон нагрітого повітря після колектору може бути розширений до нижнього значення, що дорівнює температурі рециркуляційного повітря. При цьому підвищується загальний к.к.д геліосистеми повітряного теплопостачання, проте збільшуються капітальні затрати на створення системи теплопостачання.



Рис. 4.4. Алгоритм розрахунку системи теплопостачання з КСЕП.

Порівняння f - графіків для рідинних та повітряних геліосистем теплопостачання показує, що при однакових значеннях безрозмірних параметрів повітряна система забезпечує більш високий коефіцієнт заміщення. Це особливо помітно при більших значеннях f та пояснюється кількома причинами. В режимі опалення середня температура теплоносія на вході в колектор в геліосистемах повітряного теплопостачання нижче, тобто

ефективність колектору вища, ніж в геліосистемі з рідинним теплоносієм. Другою причиною є те, що в галькових акумуляторах теплоти температурна стратифікація зазвичай сильніша, ніж в баках з водою. Частково це пояснюється меншими значеннями повної теплоємності в повітронагрівачах.

Третя причина пов'язана з тим, що в системах з повітряним теплоносієм не потрібен теплообмінник для передачі теплоти від акумулятора до повітря, що подається в будівлю, а тому, відсутній додатковий перепад температур. Четвертою причиною є те, що застосування в системі теплового насосу типу «повітря-повітря» дозволяє використовувати тепле повітря після колектору з температурою рівною чи більшою температури повітря в середині приміщення, тобто більш широкий температурний діапазон роботи колектору. І нарешті, в геліосистемах повітряного теплопостачання не відбувається викид тепла як в рідинній при досягненні температури рідини точки кипіння [84,147].

Проте в більшості випадків неможна стверджувати, що геліосистеми повітряного теплопостачання ефективніші систем з рідинним теплоносієм. Коефіцієнт відводу теплоти F_R для повітряних колекторів сонячної системи зазвичай нижче, ніж для рідинних. Отже, значення безрозмірних комплексів для геліосистем з повітряним теплоносієм менше. Щоб комплекси X і Y [138] для геліосистем повітряного теплопостачання та з рідинним теплоносієм були рівними, необхідно площу повітряних колекторів сонячної енергії, а означає і капітальні затрати на будівництво геліосистеми, збільшити.

4.6 Висновки

1. Розроблена конструкція комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача для промислового виробництва, яка складається з неметалевих матеріалів (окрім елементів кріплення), що значно знижує вартість, крихкість і вагу КСЕП.
2. Розроблено методику визначення частки теплового навантаження споживача, яке заміщується енергією сонця і вітру, в залежності від

кліматичних умов і технічних характеристик системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем.

3. Отримано аналітичне рівняння для визначення коефіцієнту заміщення для системи теплопостачання з КСЕП, що має вигляд $f = c_1 + c_2 J - c_3 J^2 + (c_4 J - c_1) \exp(-(c_5 J^2 + c_6) \cdot Z)$, де коефіцієнти c_i – обчислені для різних місяців року.
4. Вивчено енергетичні характеристики насадкових акумуляторів тепла і на цій основі встановлені вирази: для коефіцієнту акумуляції елементів насадки; для енергетичної ефективності насадкових акумуляторів тепла; для оптимальних розмірів елементів насадки при фіксованих швидкостях теплоносія, при яких забезпечуються максимальні значення енергетичного коефіцієнту; для оптимальних значень висоти шару насадки в залежності від режиму течії теплоносія, також забезпечуючих максимальні значення енергетичного коефіцієнту.
5. Визначено вплив вітру на ефективність роботи колектора сонячної енергії та приведено метод інженерного розрахунку вітрогенератора.
6. Результати інженерного методу розрахунку основних теплових характеристик комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача з абсорбером із вуглеграфітового трикотажного полотна можуть бути використані науково-дослідницькими і проектними організаціями для проектування, експлуатації та будівництва комбінованих сонячно-вітрових систем теплопостачання.
7. Розроблено алгоритм інженерного розрахунку системи теплопостачання комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача придатного для розрахунку таких систем за допомогою ЕВМ.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

5.1 Методика оцінки економічної ефективності використання сонячної та вітрової енергії для отримання тепла

Сонячна та вітрова енергії відносяться до особливої групи джерел, так як беруть участь у вирішенні проблем не тільки енергетичного, а й екологічного характеру. У зв'язку з цим велике наукове і практичне значення набувають методи дослідження ефективності застосування цих джерел.

На сьогодні вченими виконано багато робіт по розвитку методології оцінки економічної ефективності відновлюваних джерел енергії. Однак, незважаючи на це, до цих пір відсутній єдиний підхід, що разом з високою вартістю устаткування для нетрадиційної енергетики є стримуючим фактором широкомасштабного застосування НВДЕ.

Енергоустановки на базі сонячної і вітрової енергії не претендують на повне заміщення теплового навантаження споживача, тому, як правило, дублюються установками на традиційному паливі. Виходячи з цього, оцінка економічної доцільності використання сонячної та вітрової енергії проводиться методом порівняльної ефективності [7, 120]. Суть даного методу зводиться до зіставлення наведених витрат базового і альтернативного варіантів. В якості базового варіанту будемо розглядати установку, яка використовує традиційний енергоносіє. Альтернативним буде являтися варіант, заснований на установці базового варіанту, доповнений відновлюваним джерелом енергії.

Узагальнюючим показником економічної ефективності альтернативного варіанта є величина економічного ефекту за розрахунковий період експлуатації енергоустановки на базі НВДЕ. У відповідності з методикою [120] економічний ефект при реалізації енергозберігаючої технології визначиться по різниці експлуатаційних витрат в порівнюваних варіантах

$$\Delta Z = Z_{E1} - Z_{E2}, \quad (5.1)$$

де: Z_{E1} — експлуатаційні витрати, пов'язані з базовим варіантом, грн.;

Z_{E2} — експлуатаційні витрати, пов'язані з варіантом з поновлюваним джерелом енергії, грн.

Доцільність використання енергоустановки на базі поновлюваного джерела виявляється з умови

$$\Delta Z \geq 0. \quad (5.2)$$

Експлуатаційні витрати в разі базового варіанту розраховуються за виразом

$$Z_{E1} = I_{a1} + I_{mp1} + I_{зп1} + I_{e1} + I_{пр1} + \frac{\beta_{п} \cdot Q_{п}}{\eta_{ек} \cdot Q_{н}^p}, \quad (5.3)$$

де: I_{a1} — амортизаційні відрахування на реновацію, грн.;

I_{mp1} — витрати на поточний ремонт і обслуговування, грн.;

$I_{зп1}$ — складова витрат на заробітну плату, грн.;

I_{e1} — складова витрат на енергію на власні потреби, грн.;

$I_{пр1}$ — витрати на утримання персоналу, що управляє, охорону праці, техніку безпеки та ін., грн.;

$\beta_{п}$ — вартість палива, грн./т;

$Q_{т}$ — теплове навантаження об'єкта, кВт·год;

$\eta_{ек}$ — експлуатаційний коефіцієнт корисного використання палива;

$Q_{н}^p$ — нижча теплота згоряння палива, кВт·год/т.

Оскільки енергоустановки на базі сонячної і вітрової енергії лише доповнюють традиційні джерела теплоти і служать для зниження паливної складової експлуатаційних витрат, будемо вважати, що застосування даних установок не приведе до зміни складових $I_{зп1}$, I_{e1} , и $I_{пр1}$.

З урахуванням прийнятого допущення вираз для визначення експлуатаційних витрат у разі альтернативного варіанту запишеться в наступному вигляді:

$$Z_{E2} = I_{a1} + I_{mp1} + I_{зп1} + I_{e1} + I_{пр1} + I_{a2} + I_{mp2} + \frac{\beta_{\Pi} \cdot Q_{\Pi}(1-f)}{\eta_{ек} \cdot Q_{H}^P}, \quad (5.4)$$

де I_{a2} и I_{mp2} — амортизаційні відрахування на реновацію і витрати на поточний ремонт установки, що використовує відновлюване джерело енергії, грн.;

f - коефіцієнт заміщення.

Після підстановки формул (5.3) і (5.4) у вираз для ΔZ отримаємо

$$\Delta Z = \frac{\beta_{\Pi} \cdot Q_{\Pi} \cdot f}{\eta_{ек} \cdot Q_{H}^P} - (I_{a2} + I_{mp2}), \quad (5.5)$$

або з врахуванням екологічного збитку

$$\Delta Z = \left(\frac{\beta_{\Pi}}{\eta_{ек} \cdot Q_{H}^P} - Y_{ЕК} \right) \cdot f \cdot Q_{\Pi} - (I_{a2} + I_{mp2}), \quad (5.6)$$

де $Y_{ЕК}$ — питомий екологічний збиток грн/кВт·год (табл. 5.1)

Таблица 5.1

Шкода навколишньому середовищу при виробництві теплової енергії на установках різного типу [25]

Теплогенеруюча установка	Шкода навколишньому середовищу, грн./кВт·ч
Котельня на вугіллі	1,94
Котельня на мазуті	0,82
Котельня на дровах	0,5

Амортизаційні відрахування на реновацію I_{a2} зазвичай виражають у відсотках від сумарних капіталовкладень і в загальному випадку визначаються за формулою

$$I_{a2} = a_a \cdot K_2, \quad (5.7)$$

де a_a - частка амортизаційних відрахувань на реновацію;

K_2 — сумарні капіталовкладення в енергоустановку, що використовує відновлюване джерело енергії, грн.

Частка амортизаційних відрахувань на реновацію визначається за формулою

$$a_a = \frac{1}{T_{cl}}, \quad (5.8)$$

де T_{cl} - термін служби енергоустановки на базі сонячної і (або) вітрової енергії (при відсутності точних даних приймається рівним 15 років).

Витрати на поточний ремонт I_{mp2}

$$I_{mp2} = a_{mp} \cdot K_2, \quad (5.9)$$

де a_{mp} — частка відрахувань на поточний ремонт ($a_{mp} = 0,2 \cdot a_a$ - для геліополя [14], $a_{mp} = 0,025$ –для ВЕУ [116]).

Капіталовкладення K_2 в нетрадиційне джерело енергії в загальному випадку складаються з витрат на придбання необхідного обладнання та затрат на будівельно-монтажні роботи.

Для геліосистем капіталовкладення визначаються за формулою:

$$K_{ГЕУ} = K_{СГР} + K_{СР} + K_{СК} + K_{БА} + K_{КІП}, \quad (5.10)$$

$K_{СГР}$ — вартість будівельно-монтажних робіт, грн.;

$K_{СР}$ — вартість сантехнічних робіт, грн.;

$K_{СК}$ — вартість сонячних колекторів, грн.;

$K_{БА}$ — вартість баків-акумуляторів і теплообмінників, грн.;

$K_{КІП}$ — вартість контрольно-вимірювальної апаратури, грн.

Згідно з дослідженнями роботи [14] структура витрат (%) на геліоустановках, виглядає наступним чином:

Будівельні роботи	Сантехнічні роботи	Сонячні колектори	Баки- акумулятори, теплообмінники	Контрольно-вимірювальна апаратура	Разом
30-40	5-7	30-50	15-18	1-3	100

З аналізу представлених в таблиці даних випливає, що вартість будівельних робіт і додаткового устаткування геліосистем приблизно дорівнює вартості сонячних колекторів. Це вказує на значні резерви зниження капітальних витрат, які можуть бути реалізовані на стадії проектування і монтажу елементів геліосистем.

Для проведення порівняльних розрахунків величину $K_{ГЕУ}$ найзручніше висловити через питому вартість сонячних колекторів

$$K_{ГЕУ} = \gamma_{Г} \cdot k_{УД}^{СК} \cdot A_{СК}, \quad (5.11)$$

де $k_{УД}^{СК}$ — питома вартість сонячного колектора, грн./м ;

$A_{СК}$ — площа сонячних колекторів, м²;

$\gamma_{Г}$ — коефіцієнт, що враховує вартість будівельно-монтажних робіт і додаткового устаткування ГЕУ ($\gamma_{Г}=1,6$ - для ГЕУ з баками зі звичайної сталі, $\gamma_{Г}=2$ - для ГЕУ з баками з нержавіючої сталі [11]).

Капіталовкладення в вітроенергетичні установки (ВЕУ) складаються з вартості комплексу обладнання $K_{ОБ}$; (лопаті, генератор, вежа і т.д.) і будівельно-монтажних робіт $K_{СТР}$

$$K_{ВЕУ} = K_{ОБ} + K_{СТР}, \quad (5.12)$$

Дослідженнями автора встановлено, що структура вартості (%) комплексу обладнання ВЕУ $K_{ОБ}$ виглядає приблизно наступним чином:

Базовий комплект (генератор, лопаті)	Вежа	Випрямно-зарядний пристрій і інвертор	Акумуляторні батареї	Силовий кабель, монтажний комплект	Разом
30 – 50	8 – 12	30 – 50	7 – 14	2 – 4	100

Як видно з таблиці, вартість додаткового обладнання (акумуляторних батарей, випрямно-зарядного пристрою, інвертора) складає приблизно половину вартості ВЕУ. При використанні останнього виключно для цілей тепlopостачання необхідність в цьому обладнанні відпадає і від нього можна відмовитися, тим самим, знизивши вартість ВЕУ вдвічі.

Величину $K_{ВЕУ}$ можна представити у вигляді

$$K_{ВЕУ} = \gamma_{В} \cdot k_{УД}^{ВК} \cdot A_{ВК}, \quad (5.13)$$

де $k_{УД}^{ВК}$ — питома вартість захопленої площі вітроколеса ВЕУ, грн./м²;

$A_{ВК}$ — обдуваема площа вітроколеса, м²;

γ_B — коефіцієнт, що враховує вартість будівельно-монтажних робіт ($\gamma_B=1,3$ [16]).

На підставі вищевикладеного, запишемо вираження для визначення економічного ефекту (грн.) при використанні системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем ($\Delta Z_{\text{КСЕП}}$):

$$\Delta Z_{\text{КСЕП}} = \left(\frac{\beta_T}{\eta_{\text{ЕК}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}} + \gamma_{\text{ЕК}} \right) \cdot f_{\text{КСЕП}} \cdot Q_T - \gamma_{\Gamma} \cdot \kappa_{\text{УД}}^{\text{СК}} \cdot A_{\text{СК}} (\alpha_{\text{а}}^{\Gamma} + \alpha_{\text{mp}}^{\Gamma}) - \gamma_B \cdot \kappa_{\text{УД}}^{\text{ВК}} \cdot A_{\text{ВК}} (\alpha_{\text{а}}^{\text{В}} + \alpha_{\text{mp}}^{\text{В}}), \quad (5.14)$$

де індекс «Г» відноситься до геліосистеми, а індекс «В» — до вітроенергетичної установки.

Слід зазначити, що вираз (5.14) дозволяє визначати економічний ефект при використанні схеми КСЕП, представленої на рис.1.14.

Окремим показником економічної ефективності енергоустановки на базі відновлюваного джерела є собівартість одержуваної енергії.

Собівартість теплової енергії (грн. / кВт·год), одержуваної за рахунок відновлюваного джерела, в загальному випадку визначається за формулою

$$C_{\gamma E} = \frac{\kappa_{2 \cdot (a_a + a_{mp})}}{f \cdot Q_T}, \quad (5.15)$$

Таким чином, викладена методика дозволяє оцінювати економічну ефективність застосування сонячної і вітрової енергії для отримання теплової енергії з урахуванням використання різних видів традиційних енергоносіїв і екологічного збитку, що набуває особливої актуальності на етапі техніко-економічного обґрунтування проекту енергоустановки, заснованої на цих джерелах. Для найбільш ефективного використання сонячної та вітрової енергії системах тепlopостачання необхідно провести оптимізацію основних параметрів системи тепlopостачання з КСЕП.

5.2 Техніко-економічні показники комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача

На основі проведених досліджень розроблено технічний паспорт для комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача, зокрема типоряд з приведеними технічними характеристиками і характерними діаграмами.

Таблиця 5.2

Технічні характеристики КСЕП

Характеристика	Одиниця виміру	КСЕП 0.5	КСЕП 1.0	КСЕП 2.0
Номінальна витрата повітря	м ³ /год	60	120	240
Номінальна витрата повітря	м/с	1	1	1
Розмір абсорбера Ш x Д	мм x мм	500x2000	1000x2000	2000x2000
Теплова потужність приладу при інсоляції 1000 Вт/м ²	Вт	780	1560	3129
Електрична потужність приладу	Вт	1600	3200	6400
Напруга	В	~220	~220	~380
Сила струму	А	14,5	7,2	16,8
Вага	кг	4,1	8,2	17,5

Характерна діаграма залежності різниці температур повітря на вході на виході з КСЕП від витрати повітря та інтенсивності сонячного випромінювання приведені на Рис.5.1. Ця залежність є узагальненою, де v швидкість повітря є універсальною величиною для всіх типорозмірів КСЕП і відповідає наступним витратам повітря через повітропідігрівач:

- КСЕП 0,5: 0,5 м/с – 30 м³/год; 1 м/с – 60м³/год; 1,5 м/с – 90м³/год.
- КСЕП 1.0: 0,5 м/с – 60 м³/год; 1 м/с – 120м³/год; 1,5 м/с – 180м³/год.
- КСЕП 2.0: 0,5 м/с – 120 м³/год; 1 м/с – 240м³/год; 1,5 м/с – 360м³/год.

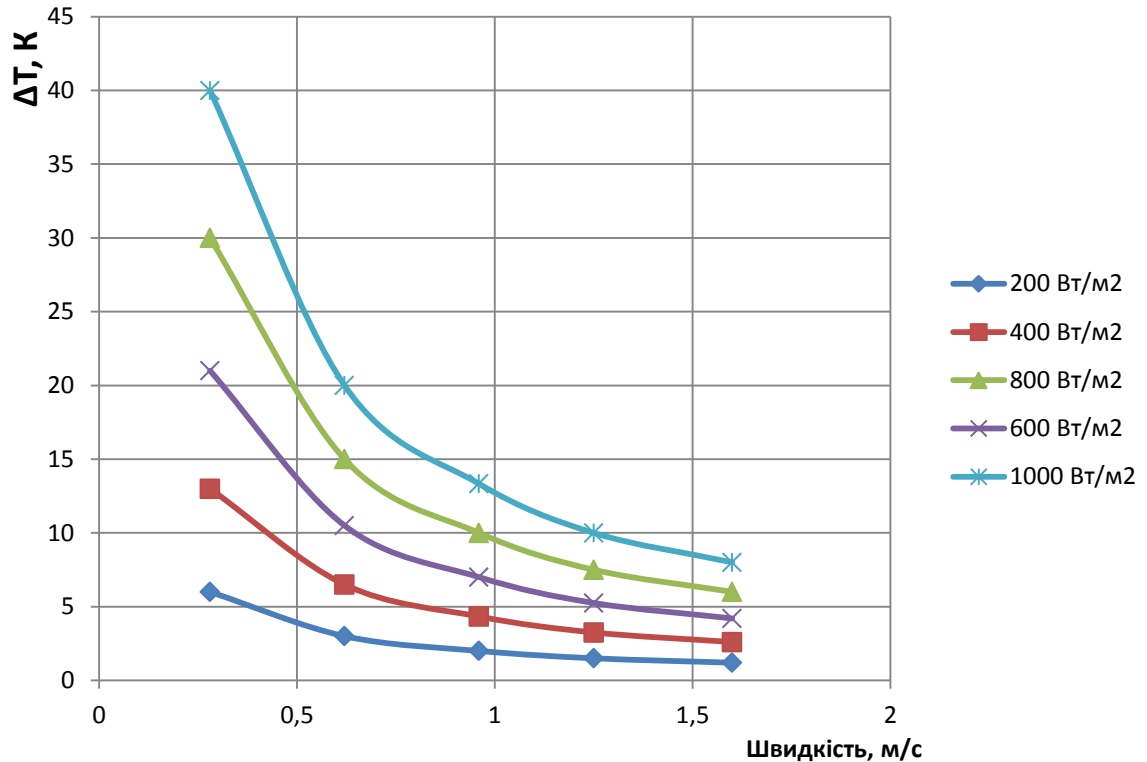


Рис. 5.1. Узагальнена залежність $\Delta T = f(v)$ для КСЕП

Проведено порівняння запропонованого сонячного повітропідігрівача КСЕП із колектором сонячної енергії Jumbosolar німецької компанії Grammer (повітряний колектор Jumbosolar є лідером з кількості виробництва – 10 000 м²/рік, за даними 2012 року [131]). Виявлено, що максимальний ККД КСЕП дещо менший за німецьку модель (Рис. 5.2), проте сезонний коефіцієнт використання сонячної енергії колектора значно зростає за рахунок електричного догріву абсорбера при недостатній інтенсивності сонячного випромінювання, також КСЕП має значно меншу вагу та ціну: вага 4,1 кг/м², вага Jumbosolar 27 кг/м²; вартість 1540 грн/м², вартість Jumbosolar 8400 грн/м².

Як видно з рис. 5.2. ККД КСЕП є дещо нижчим ніж відомого аналога, проте, не враховуючи вартісних та монтажних-експлуатаційних затрат, запропонований прилад поєднує в собі електрокалорифер та повітряний сонячний колектор, що робить його незалежним теплогенератором, який може використовуватись без додаткових джерел теплоти.

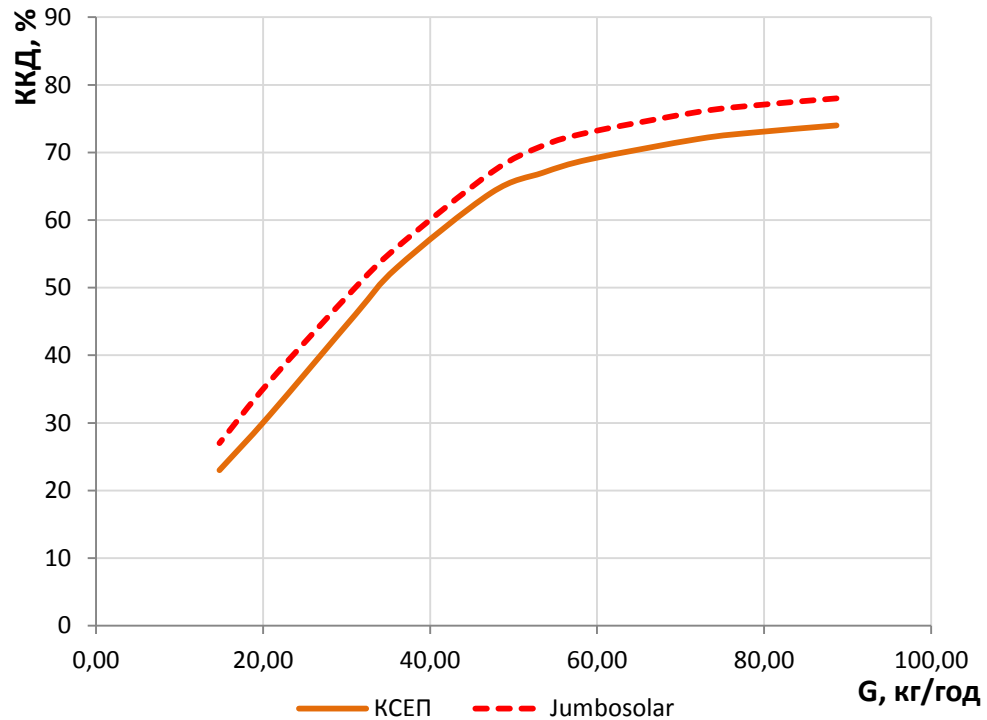


Рис. 5.2. Залежність ККД КСЕП та Jumbosolar від витрати повітря через нього при $I = 1000 \text{ Вт/м}^2$.

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача

Сучасні котеджі володіють високим теплоізоляційними властивостями та герметичністю, що призводить до використання механічної системи вентиляції. Об'єктом впровадження є житловий будинок котедж в жилловому комплексі «ParkTown», де у якості калорифера для системи вентиляції використовується геліополе скомпоноване з трьох модулів КСЕП2.0. Розрахунок ведемо для системи вентиляції котеджу загальною площею 210 м^2 , з витратою припливного повітря $1000 \text{ м}^3/\text{год}$. Котедж знаходиться в Київській області (с.м.т. Гостомель). Середня температура зовнішнього повітря в опалювальний період складає $-0,2^\circ\text{C}$. Тривалість опалювального періоду складає 204 доби. Система вентиляції працює 24 години на добу. Система вентиляції працює протягом опалювального періоду $n = 204 \cdot 24 = 4896$ годин. Розрахункова температура повітря в котеджі складає 20°C .

Середня витрата повітря, що подається в приміщення складає $L = 1000 \text{ м}^3/\text{год} = 0,28 \text{ м}^3/\text{с}$.

Визначимо витрату тепла, який необхідний для нагрівання припливного повітря, протягом опалювального періоду

$$Q_{cp.on.} = cL\rho(t_B - t_{cp.on.}) \cdot n = 1 \cdot 0,28 \cdot 1,22 \cdot (20 - (-0,2)) \cdot 4896 = 33784 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отримане від КСЕП енергія від сонячного випромінювання розраховується за формулою[102]

$$Q_{КСЕП} = I_p \cdot \eta_{КСЕП} \cdot A_{КСЕП},$$

де: I_p – кількість енергії, що падає на поверхню КСЕП, кВт·год;

$\eta_{КСЕП}$ – середній ККД КСЕП;

$A_{КСЕП}$ – площа світлосприйняття КСЕП, м².

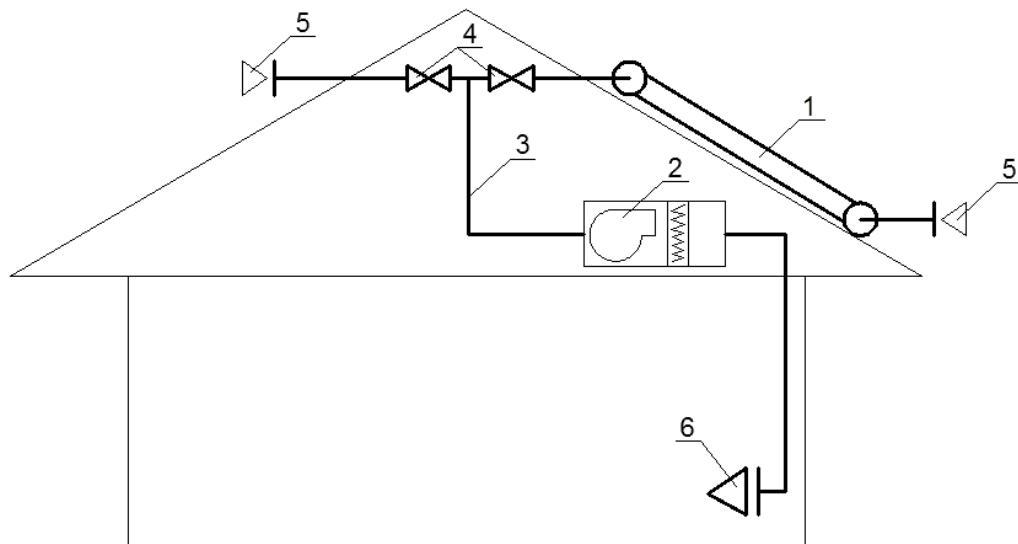


Рис. 5.3. Спрощена схема припливної системи вентиляції котеджу з КСЕП у ролі калорифера: 1- КСЕП; 2- вентиляційна установка; 3-повітропроводи; 4- регулюючі заслінки; 5- забірні решітка; 6-припливна решітка

Прийнята площа геліополя складає 12 м^2 , кількість енергії, що надходить за опалювальний період $300 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$, тобто

$$Q_{КСЕП} = 320 \cdot 0,7 \cdot 12 = 2688 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

Порівняння проводиться з електрокалорифером, що був запропонований на передпроектних рішеннях. Тариф за $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ $c_{ел.} = 1,56$ грн [32]. Отримаємо щорічно економію в гривнях

$$C_{ек.} = c_{ел.} \cdot Q_{КСЕП} = 1,56 \cdot 2688 \approx 4190 \text{ грн}.$$

Варто додати, що КСЕП замінює електрокалорифер, тому до затрат необхідно додати вартість електрокалорифера (вартість електрокалорифера на 18 кВт складає 10500 грн, згідно офіційного прайс-листа ТОВ «ВЕНТС») з розділу 5.2 вартість 1м² КСЕП складає 1540 грн/м², а питома вартість монтажних робіт 300 грн/м², тоді простий термін окупності (без врахування інфляцій, дисконтування і т.і.) складе

$$T = \frac{1540 \cdot 12 + 300 \cdot 12 - 10500}{4190} \approx 2,8 \text{ роки}$$

Висновки

1. Запропоновано уточнена модель оцінки економічної ефективності використання сонячної та вітрової енергії для отримання тепла, що дозволить проводити порівняння ефективності застосування системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем у різних умовах
2. Розроблено типоряд приладів типу КСЕП, а також приведено ряд техніко-економічних показників розроблених комбінованих сонячно-електричних повітропідігрівачів
3. Приведено зіставлення техніко-економічних показників розробленого КСЕП та відомої моделі сонячного повітряного колектора та виявлено переваги запропонованої моделі.
4. Визначено економічну доцільність впровадження КСЕП у якості калорифера системи вентиляції для житлового котеджу: економічний ефект складає 4190 грн/рік, а простий термін окупності 2,8 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз і вивчено особливості використання існуючих повітряних геліосистем теплопостачання у низькотемпературних теплових технологіях; вказані головні недоліки таких систем і визначено основні напрями їх усунення; проаналізовано відомі методи розрахунку геліосистем теплопостачання.

2. Розроблено принципову схему енергоефективної системи теплопостачання з використанням сонячної та вітрової енергії на основі використання комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача та досліджено режими роботи розробленої схеми. Створено ефективну конструкцію комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача в якому у якості абсорбера використовується вуглеграфітове трикотажне полотно.

3. На основі фізичної та математичної моделей досліджено його електричні, аеродинамічні та теплотехнічні характеристики та оптимізовано геометричну форму абсорбера (гофрована укладка уздовж каналу з відстанню між хвилями близько 20мм) і визначено оптимальну витрату повітря через повітропідігрівач близько $0,038 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$.

4. Встановлено, що використовуване вуглеграфітове трикотажне полотно має високу поглинаючу здатність ($A_s = 0,94$), стійкість до тривалої експлуатації та не потребує нанесення селективного покриття, що значно знижує його вартість.

5. Експериментально отримані критеріальні рівняння, що описують теплообмінні процеси у випадку обдуву нагрітого вуглеграфітового трикотажного полотна в пласкому каналі при $1000 > Re > 12\ 000$: для прямої $Nu = 0,14 Re^{0,62}$ та для гофрованої укладки (відстань між хвилями близько 20мм) $Nu = 0,122 Re^{0,8}$.

6. Експериментально отримані критеріальні рівняння для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя повітря у випадку обдуву гофрованого

вуглеграфітового трикотажного полотна в пласкому каналі з $1000 < Re < 12000$ $Nu = 32,67 \cdot Re^{-0,677}$.

7. Розроблено методику інженерного розрахунку енергетичних показників системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем. Визначено залежність частки теплового навантаження, що заміщується нетрадиційними джерелами енергії в розробленій системі теплопостачання від її технічних характеристик та кліматичних чинників навколишнього середовища.

8. Результати дослідження впроваджені в робочих проектах житлового комплексу ТОВ «Парк таун» та ПП «Ірпінь-теплосервіс» Київської області., у якості електрокалориферів для систем загальнообмінної вентиляції. Економія електроенергії на нагрів припливного повітря складає 8% на рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аббасов Е.С., Оценка теплогидравлической эффективности лучепоглощающих поверхностей солнечных воздушных нагревателей / Е.С. Аббасов, М.А. Умурзакова // Гелиотехника, 2005 №2. – С. 45-48.
2. Аvezов Р.Р. и др. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р.Р. Аvezов, М.А. Барский-Зорин, И.М. Васильева и др.; Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328с.
3. Аvezов Р.Р. Повышение эффективности использования низкопотенциальных солнечных нагревателей в системах теплоснабжения. Автореф. дис. ... докт.техн.наук – Ташкент, 1990 – 42с.
4. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий Текст. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 2001 – 280 с.
5. Андрианов В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич, В.Р. Секторов // Москва: Госэнергоиздат, 1960, - 320с.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 736 с.
7. Ахметжанов Р.А. Повышение эффективности использования солнечной и ветровой энергии для теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей. Автореферат дис. ...канд.техн.наук: 05.20.02., Челябинск, 2005. – 20 с.
8. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособ. для хим.-технол. спец. вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. //– [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.
9. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. // Энергоатомиздат. М.: Энергоатомиздат, 1988 г. – 294 с.

10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.:Наука, 1986. – 544 с.
11. Бутузов В.А. Солнечные коллектора на российском и украинском рынках // Гелиотехника, 2006 №3. – С.21-26.
12. Бекман У. и др. Расчет систем солнечного теплоснабжения / Пер. С англ. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
13. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 272с.
14. Валов М.И., Казанджан Б.И., Системы солнечного теплоснабжения, издательство МЭИ, 1991, с. 139.
15. Вардиашвили А.Б., Мурадов М.У., Ким В.Д. Математическая модель галечного аккумулятора тепла и метод его теплотехнического расчета. // Гелиотехника. - №2, - 1987, - С.38-43.
16. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / В.М. Каргиев, С.Н. Мартиросов, В.П. Муругов, А.Б. Пинов, А.К. Сокольский, В.П. Харитонов// Москва: ИнтерСоларЦентр, 2001. – 62с.
17. Воздушный коллектор для нагрева воздуха посредством солнечной энергии. Заявка ФРГ №093611916. Изобретения в СССР и за рубежом. Выпуск 99, №6, 1988.
18. Возняк О.Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у системах теплогазопостачання та вентиляції: навч.посібник / О.Т. Возняк. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 164с.
19. Возняк О.Т., Желих В.М. Основи наукових досліджень у будівництві: Навч. посібник / О.Т. Возняк, В.М. Желих – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 176с.
20. Волков В.А. Регуляторы расхода воздуха VAV-основа системы кондиционирования с переменным расходом // АВОК. -2011. - №4.
21. Высочин В.В. Обобщенная математическая модель абсорбционного теплового насоса для гелиосистемы / В.В. Высочин //Науково-

- технічний збірник «Праці Одеського політехнічного університету». – 2009, № 2 (44), Одеса. – С.69-72.
22. Галимов И.А. Математическое моделирование процесса теплообмена в солнечном коллекторе с учетом времени релаксации тепловых напряжений. / И.А. Галимов, Л.Ю. Уразаева // Вестник Нижневартковского государственного гуманитарного университета, вып. № 3. –2011.
23. Горелов В.П. Низкотемпературные нагреватели из композиционных материалов в промышленности и быту; 2-е изд., стер./ В.П. Горелов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 208с.
24. Горобец В.Г. «Экспериментальное исследование теплоотдачи вертикальных поверхностей с дискретным ребрением при естественной конвекции / В.Г. Горобец, В.В. Трепутнев // Промышленная теплотехника , №1. – 1999.
25. Грицевич И. Протокол конференции по глобальному климату в Киото: новые правила игры на следующее десятилетие.// Энергетическая эффективность, ежеквартальный бюллетень Центра по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ). — 1998. — №18.
26. Дабрундашвили З.Ш. и др. Поглотитель коллектора солнечной энергии. А.С. №992945. В.И. №4, 1993.
27. Данилов М.П., Ветвицкий М.Л. Воздухонагреватель. А.С. №1315755, Б.И. №21, 1987.
28. Данчук М.І. Теплоаккумулятивні властивості солей-кристалогідратів як акумуляторів сонячної енергії в геліосистемах / М. І. Данчук, І. М. Озарків, М. Ф. Федина, В. В. Кочубей // Науковий вісник НЛТУ України. - 2013. - Вип. 23.1. - С. 163-168.
29. Даффи Д. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. / Дж. Даффи, У. Бекман // — М.: Мир, 1977. С. 354.
30. Дзумедзей Р.О. Експлуатаційні характеристики термоелектричних модулів на прикладі системи "Сонячний колектор-термоелектричний

- генератор" / Р. О. Дзумедзей, В. В. Борик // Фізика і хімія твердого тіла. - 2013. - Т. 14, № 3. - С. 659-661.
31. Детлаф А. А., Курс физики: учебное пособие для вузов/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский – 2-е изд. испр. и доп. - Москва: "ВЫСШАЯ ШКОЛА", 1999.—.720с.
32. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – 3.09.2013.
33. Добрундашвили З.Ш. Солнечный тепловой коллектор. Патент СССР А.С. №1346913 Б.И. №39, 1987
34. Дорошенко О.В. Сонячні плоскі металополімерні колектори / О.В. Дорошенко, С.С. Титар, Б.Є. Молчанський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. –2010. – № 4.
35. Дорошенко А.В. Металло-полимерные солнечные коллекторы с многоканальным абсорбером для многофункциональных энергетических систем / А.В. Дорошенко, В.П. Данько, Ю.Т. Турбовец // Проблемы региональной энергетики № 2. – 2012.
36. Желих В.М. Аналіз ексергетичної ефективності низькотемпературних сонячних колекторів / В.М. Желих, Б.І. Пізнак, Х.М. Лесик // Зб. наук. пр. Польської Академії наук «MOTROL» «Motorization and power industry in agriculture» Volume 14С. 2012.
37. Желих В.М. Застосування полімерних матеріалів у виготовленні сонячних колекторів. / В.М. Желих, А.В. Фечан, Б.І. Пізнак // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація» 2013. №758 – 208 С.
38. Зінич П.Л. Вентиляція громадських будівель: Навчальний посібник / П.Л. Зінич, КНУБА. – К: 2002, - 256с.
39. Зияев Т.З. Теплоэнергетическая характеристика солнечного воздухонагревателя / Т.З. Зияев, В.Д. Ким // Гелиотехника, №4, 2006. – С.40-47.

40. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. 2-е испр. и доп. Л., «Наука», Ленинградское отд., 1967.
41. Зоколей С. В. Солнечная энергия и строительство / пер. с англ. под ред. Ю. Н. Малевского. – М.: Стройиздат, 1979.
42. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О.Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
43. Каст В. Конвективный тепло- и массоперенос / Пер. с нем. Под ред. И.Н. Дулькина. – М.: Энергия, 1980. -49с.
44. Керн Д. и Краус А. Развитые поверхности теплообмена/ Д. Керн и А. Краус// Пер. с англ.,- М., «Энергия», 1977. 464с.
45. Клычев Ш.И. Распределенная нестационарная тепловая модель двухканального солнечного воздухонагревателя / Ш.И. Клычев, С.А. Бахрамов, А.И. Исманжанов, Н.Н. Ташиев // Гелиотехника, №3, 2011. – С.52-59.
46. Ковалко О. М. Механізми державного управління і регулювання діяльності з підвищення енергоефективності системи теплопостачання в Україні / О. М. Ковалко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Управління. - 2012. - Вип. 4. - С. 103-110.
47. Козлов Я.М. Оптимізація розташування сонячних колекторів в геліосистемах. / Я.М. Козлов, М.П. Сухий, К.М. Сухий // Восточно-европейский журнал передовых технологий, вып. № 10, -2010.
48. Колектори сонячні. Методи випробування. — Вид. офіц. — К.: Держспоживстандарт України, 2008. — (Національний стандарт України). — Ч. 1 : ДСТУ ISO 9806-1:2005 ; Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT). – К.: Держспоживстандарт України, 2008 – IV. – 55 с.
49. Компания ХИМПРОМ [електронний ресурс]. Код доступа <http://him-prom.perm.ru>.

50. Компанія Winder: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://winder.ua>
51. Концов М.М. Солнечные коллекторы с алюминиевым и полимерным абсорберами / М.М. Концов, Ж.Ф. Дорошенко, О.В. Корейша // Труды Одес. политех. ун-та: Науч. и произв.-практ. сб. – О., 2003. – Вып. 2. – С. 72 – 76.
52. Корбут В.П. Природна турбулентна конвекція між вертикальними тепловіддавальними поверхнями / В.П.Корбут. – К: Наукова думка, 1996. – 215с.
53. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федоренко, В. Щербань // Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. – 984 с.
54. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография/ В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин// Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столипіна.2013. – 290с.
55. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Москва: Атомиздат, 1979, 416с.
56. Луцык Р.В., Тепломассообмен при обработке текстильных материалов/ Р.В. Луцык, Э.С. Малкин, И.И. Абаржи // Ин-т техн. теплофизики АН Украины, Киевск. технолог. ин-т. легк. пром. – Киев: Наукова думка, 1993. – 344с.
57. Луцык Р.В., Тепломассообмен при обработке текстильных материалов/ Р.В. Луцык, Э.С. Малкин, И.И. Абаржи // Ин-т техн. теплофизики АН Украины, Киевск. технолог. ин-т. легк. пром. – Киев: Наукова думка, 1993. – 344с.
58. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник / А.В. Лыков – М.:Энергия, 1972. – 560с.
59. Малкін Е.С., Тимощенко А.В. Гідродинаміка та теплообмін в концентричних кільцевих мікроканалах з різним ступенем обробки поверхонь, стосовно компактних тепломасообмінних апаратів // Зб.

- наук. праць ювілейної міжнар. науково-технічної конференції „Сучасні екологічно безпечні тепломасообмінні процеси в технологіях легкої промисловості”. – Київ: КНУТД, 2006. – С. 50-52.
60. Малкин Э.С., Тимощенко А.В., Коваленко А.Н., Приймак А.В. Использование вторичных энергоресурсов в энергоэффективных системах технологического горячего водоснабжения предприятий // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №4. – С. 161-163.
61. Мартиняк М. А. Аналіз роботи систем централізованого постачання тепла споживачам [Електронний ресурс] / М. А. Мартиняк, Й. С. Мисак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. - 2014. - № 792. - С. 17-20
62. Михеев М.А., Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева // Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. - 344с.
63. Мишуров Н.П., Энергосберегающее оборудование для обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях. Научный аналитический обзор / Н.П. Мишуров. - Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. – 82 с
64. Метод расчета солнечных водонагревателей при использование солнечной энергии/ АН СССР, № 1, 1957, с. 177-201.
65. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы/ Н.М. Мхитарян . – Киев: НАУКОВА ДУМКА, 1999. – 314с.
66. Мусій Р. Й. Сонячний тепловий повітряний колектор на основі нового типу селективного покриття / Р. Й. Мусій, Г. Г. Мідяна, Р. Г. Макітра, Я. М. Васютин, Г. І. Хованець, А. Б. Заборовський // Наука та інновації. - 2014. - Т. 10, № 1. - С. 24-31.
67. Мышко Ю.Л. Оптимизация толщины воздушного зазора и тыльной тепловой изоляции плоского солнечного коллектора / Ю.Л. Мышко,

- В.А. Моисеенко, С.И. Смирнов // Гелиотехника. – 1991. – № 1. – С. 15 – 17.
68. Наказ Міністерства Фінансів України від 04.07 2006 № 631 «Про визначення пріоритетних напрямів енергозбереження» // Офіційний вісник України від 16.08 2006 – 2006. № 31. – С. 206.
69. ОАО «СветлогорскХимволокно» [електронний ресурс]. Режим доступу <http://www.sohim.by>.
70. ООО «Виссманн». Книга о «солнце» /- К.: Злато-Граф, 2010, 195с.
71. Орозбаєв М.Т. К определению теплотехнических характеристик плоских солнечных воздухонагревательных коллекторов / М.Т. Орозбаєв // Гелиотехника, 2007 №1. – С. 62-64.
72. Основные численные методы и их реализация на микрокалькуляторах / П.М. Сулима, С.И. Гавриленко, И.А. Радчик, Я.А. Юдицкий. – К.: Вища школа, 1987. – 312с.
73. Павел Пасечник. Особенности воздушных солнечных систем теплоснабжения / П. Пасечник, А. Приймак // Czestochowa, Czestochowa University of Technology, Construction of Optimized Energy Potential, vol.1(15)2015, с.152-158.
74. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / Пер. с англ., под ред. Г.Г. Янькова. – М.: Изд. МЭИ, 2003. – 311 с.
75. Пасічник П.О., Аналіз властивостей текстильних матеріалів для поглинаючого елемента повітряного колектора сонячної енергії / П.О. Пасічник, О.В. Приймак // Енергоефективність в будівництві та архітектурі – Вип. 4/– К.: КНУБА, 2013. – С.201-204.
76. Пасічник П.О. Проблеми застосування повітряних геліосистем / П.О. Пасічник, О.В. Приймак // Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Вип. 6. – К.: КНУБА, 2014, с.322-327.

77. Пасічник П.О. Сонячно-електричний повітряний тепловий колектор// Патент України на корисну модель №97541 від 25.03.2015 р., Бюл. №6.
78. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. – М.:Наука, 1984. – 288с.
79. Петухов Б.С., Ройзен Л.И. Анализ и обобщение опытных данных по теплоотдаче в трубах при турбулентном течении газов с переменными физическими свойствами // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12, №2. – С. 304-315.
80. Пізнак Б.І. Моделювання теплових процесів полімерного сонячного колектора / Б.І. Пізнак, В.М. Желих // Науковий вісник НЛТУ України : Зб. наук.-техн. пр. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2012. – Вип. 22.4.
81. Пізнак Б.І. Підвищення ефективності використання сонячної енергії полімерними геліоколекторами для систем гарячого водопостачання. Дис... канд. тех. наук: 05.23.03. / Національний університет «Львівська політехніка» - Львів, 2014 – 163 с.
82. Поз М.Я. Инженерный метод теплотехнического расчета гелиоприемников / М.Я. Поз, Д.Я. Коган // Гелиотехника. – 1986. – №2. – С. 47 – 51.
83. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Пер. с нем. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
84. Приймак А.В. Гелиосистема теплоснабжения с воздушным коллектором солнечной энергии матричного типа. Дис... канд. тех. наук: 05.23.03. / КИСИ - Киев, 1989 – 177 с.
85. Приймак О.В. Визначення частки теплового навантаження, що заміщується енергією сонця та вітру для системи тепlopостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем / О.В. Приймак, П.О. Пасічник, Р.В. Білан, О.С. Нагорний // Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Вип. 8. – К.: КНУБА, 2016, с.251-256.

86. Приймак О.В. Дослідження тепловіддачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна / О.В. Приймак, П.О. Пасічник // «Вісник КНУТД» серія «Технічні науки» №1(94), 2016, с.85-92.
87. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности “Автоматизация теплоэнергетических процессов.” 3-е изд., перераб. – М.: “Энергия”, 1978. – 704 с., ил.
88. Редько А. О. та ін., Низькопотенційна енергетика / Під ред. академіка НАНУ А.А. Долинського. – Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016. – 412с.
89. Рекомендации по расчету и проектированию систем горячего водоснабжения с солнечными водонагревательными установками, Ташкент, АН УзбССР.ФТИ, 1977
90. Ройзен Л.И. и Дулькин И.Н. Тепловой расчет ребренных поверхностей/ Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин// Под ред. В.Г.Фастовского, - М., «Энергия», 1977, 256 с.
91. Самиев М. Эффективность солнечных пластинчатых воздухонагревателей / М.Самиев // Гелиотехника, №4, 2008. – С.18-24.
92. Сиворакша В.Е. Влияние конструкции тепловоспринимающего элемента на эффективность работы гелиоколлектора / В.Е. Сиворакша, К.Е. Золотько, В.Л. Марков, Б.Е. Петров // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – № 2. – С. 70 – 73.
93. Солнечный воздухонагреватель. Патент США №4458673, изобретения в СССР и за рубежом, выпуск 96, №3, 1985.
94. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1987. – 592 с.
95. Севернев М.М. и др. Надувной солнечный коллектор. А.С.№1359589, Б.И. №46, 1987.

96. Севернев М.М. и др. Солнечный тепловой коллектор. А.С.№1386815, Б.И. №13, 1988
97. Севернев М.М. и др. Надувной солнечный воздухонагреватель. А.С. №1453125, Б.И. №3, 1989.
98. Сезоненко Б.Д. Децентралізоване виробництво теплової енергії та розробка енергоефективних водонагрівачів для його реалізації / Б.Д. Сезоненко, В.Ю. Нікітін, О.Ю. Сезоненко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – №3. – С. 30 – 36.
99. Сорин М.В., Бродянский В.М., Методика однозначного определения эксергетического КПД технических систем преобразования энергии и вещества// Изв. вузов сер. Энергетика, 1985, №3, С78-88.
100. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем/ А.С. Юрьев, С.Ю. Пирогов, В.М. Низовцев, И.Г. Григорьев и др.; Под ред. А.С. Юрьева – С.-Пб: АНО НПО „Мир и семья”, 2001. – 1154 с.
101. Староверов И.Г. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха/ И.Г. Староверов и др.// Под ред. к.т.н. Н.Н. Павлова и инж. Ю.И.Шиллера// Москва: Стройиздат, 1992. – 480 с.
102. Строй А.Ф. Расчет и проектирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха/ А.Ф.Строй, В.В.Колодяжный// Киев: ООО «Вентсервис», 2014. – 343с.
103. Супрун А.В., Стронский Л.Н. Солнечный воздухонагреватель. А.С. №1474394. Изобретения в СССР и за рубежом. Выпуск 99, №7, 1989.
104. Судол В., Хендигер Я., Системы VAV. Руководство. Пер. с пол. ООО «Белимо Украина с.а.р.». – Краков: группа FORTIS, 2009. – 80с.
105. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200с.
106. Тарнавська Н. Стратегічний менеджмент: практикум. Навч. пос. / Н. Тарнавська, О. Напора // – Тернопіль: Карт-бланш, К.: Кондор, 2008. – 287 с.

107. Тимченко В.А., Оптимальные системы отопления для птичников / В.А. Тимченко // Птица и птицепродукты №4, 2011 – С.54-57
108. Ткачук А.Я. Аеродинаміка вентиляції. Навчальний посібник / А.Я.Ткачук, В.Б. Довгалюк. – ІВНВКП «Укрґеліотех», 2009. – 376 с.
109. Трофименко В.В., Трофименко А.В. Солнечный воздухонагреватель А.С. №1495595. Б.И. №27, 1989.
110. Трушевский С.Н., Вакуумированные стеклопакеты и солнечные коллекторы / С.Н. Трушевский, И.В. Митина // Гелиотехника, 2008, №3, С. 31–37.
111. Умурзакова М.А. Расчет эффективного коэффициента теплоотдачи солнечных гелиоприемников с турбулизаторами / М.А.Умурзакова //Гелиотехника, 2005 №1. – С. 35-49.
112. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник. – Москва: Атомиздат, 1979. – 216с.
113. Фахретдинова Э.М. Разработка и исследование солнечных установок для сушки сельскохозяйственной продукции: дис... канд. тех. наук: 05.14.05. / Научно-производственное объединение «Солнце» - Ашхабад, 1984 – 147 с.
114. Фукс Л.Г. Свободная конвекция в нагретой вертикальной щели / Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1961, №3, С.59-65.
115. Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В., Влияние скорости течения на нестационарный теплообмен при резком изменении теплового потока. Структура гидродинамических потоков: Вынужденное течение, тепловая конвекция, Новосибирск, Наука, 1986, сс. 25-39.
116. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки / В.П. Харитонов // Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280с.
117. Харченко Н.В. Солнечные теплогенерирующие установки для систем теплоснабжения / Н.В. Харченко, Г.Н. Делягин.// Москва: МИСИ, 1987. – 205 с.

118. Холмирзаев Н.С. Тепловой баланс солнечного воздухонагревателя с рекуперативным утилизатором тепла / Н.С. Холмирзаев, В.Д. Ким, Б.Э. Хайриддинов // Гелиотехника, №3, 2005. – С.35-43.
119. Шендрик В.В. Актуальность моделирования распределенных энергосистем эффективного использования возобновляемых источников энергии / В.В. Шендрик, С.М. Ващенко, О.В. Шулима, К.А. Омелянченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. –Вып. № 8, -2013.
120. Шерьязов С.К. Совершенствование метода расчета теплоэнергетической системы, основанной на солнечной и ветровой энергии / С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов // Вестник ЧГАУ, - Челябинск, 2005, т. 44, с.143-146.
121. Шефтер Я.И., Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты / Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. – Москва: Колос, 1967. – 376 с.
122. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика / А.Н. Криволапов, И.Классен, Э.П.Островский, В.Ф.Резцов, И.И. Стоянов; Под ред. А.К. Шидловского – К.: Українські енциклопедичні знання, 2000. – 302 с.
123. Badescu Viorel. Optimal control of flow in solar collectors for maximum exergy extraction. International Journal of Heat and Mass Transfer 2007;50:4311–22.
124. Bonzer B., Lufinus Z., Shinnik L. Modern Poultry Housing, Extension Circular 516/ South Dakota Agricultural Extension Service, 1955.
125. Casper J.K. Energy: powering the past, present, and future / Julie Kerr Casper. – New York: Chelsea House An imprint of Infobase Publishing, 2007. – P. 225.
126. Coney J.E.R., Kaztvinejad H., Sheppard C.G.W., An experimental study of separated flow over a thick plate, Second UK National Conference on Heat Transfer, Glasgow, vol. 1, 1988, pp. 761-772.

127. Donets, Ya.I. Mathematical modelling of flat solar collectors with liquid heat carriers. Heat pipes and heat pumps. – Minsk: 1991. – P. 131 – 137.
128. Hollands K.G.T. Directional Selectivity, Emittance and Absorptance Properties of Vee Corrugated surface / Solar Energy. V.3. №7. 1995. P.108-116.
129. Enerconcept Distribution inc. [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.enerconcept.com>.
130. Gay L.T. Method and Apparatus for Collecting and Domestic Use of Solar Heat. – USP 4.211.209. – Int. Cl. F 24 J 3/02. – Official Gazette. – 1980. – Vol. 996. – N 2. Christopher A. Homola, PE. “Solar Domestic Hot Water Heating Systems Design, Installation and Maintenance”.
131. Grammer Solar GmbH [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.grammer-solar.com>
132. Hubbard, Руководство по выращиванию. Родительское стадо / Lyon, France – 40с.
133. Jaurker A.R., Saini J.S., Gandhi B.K., Heat transfer coefficient and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness // Solar Energy, 2006 80(8). – P.895-907.
134. Kadi L., Le calcul analytique des performances des systèmes solaires actifs de production d'eau chaude: modeles et methode simplifiée, PhD. thesis, Ecole centrale Paris, Paris, 1989, p. 139.
135. Kahlen S., Wallner G., Fischer J., Meir M.G., J. Rekstad J., Basic characterisation of Polymeric materials for solar collector absorbers, in: Proceedings of the NORTHSUN 2003 Conference, Vilnius, Lithuania, pp. 32 – 40.
136. Kanayama K. Analysis of thermal performance on an air-type solar collector with 2-glass using carbon fiber sheet as collecting material / K.Kanayama, H. Baba, N. Endoh, Jiang X.M. // ISES Solar World Congress Jerusalem, Israel. Vol.3 1999, - 542 p.

137. Kartashev A.L. Development of a mathematical model of installation of self-contained heating based on solar thermal collector. / A.L. Kartashev, E.V. Safonov, M.A. Kartasheva // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: энергетика. Вып. № 34, -2011.
138. Klein S.A., TRNSYS-A Transient simulation program, solar energy laboratory, University of Wisconsin, Madison, report № 38, 1973, pp. 3-16.
139. Klein S.A., Beckman W.A., Duffie J.A., A method of simulation of solar processes and its application, Solar energy, vol. 17, № 1, 1975, pp. 29-37.
140. Kovacs P. A Guide to the standard EN12975, Quality Assurance in Solar Heating and Cooling Technology, SP – Technical Research Institute of Sweden Peter Kovacs, SP, 2012.
141. Martinopoulos G., Missirlis D., Tsilingiridis G., Yakinthos K., Kyriakis N. CFD modeling of a polymer solar collector. – Renewable Energy, 2010. – №35. –P.1499 – 1508.
142. Matuska T. Detailed modeling of solar flat-plate collectors with design tool kolektor 2.2. / T. Matuska, V. Zmrhal, J. Metzger // Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland July 27-30, -2009.
143. Mcqueen H.J. Selection of materials for flat plate solar collectors. / H.J. Mcqueen, M.M. Shapiro, D. Feldman // Journal of Materials for Energy Systems, June 1980, vol. 2, – pp. 65 – 82.
144. Michelson E. Shitzer A. Is there a need a rock bed store? Simulation and optimization of solar air heating systems for offices with large thermal capacity walls/ Solar Energy № 36(2), 1996, P.99-114.
145. Mukund P.R. Wind and Solar Power System / P.R. Mukund // New-York: CRC, 1999. – P.353.
146. Niller R.M., El-Reface M.M., Heat Transfer by Natural Convection from corrugated plates to air / IJHMT. 1978. V.21. №3. P.357-359.
147. Parker B.F., Colliser D.G., Walton L.A. Sensitivity of Air-Type Solar Collector Efficiency to Design Changer.// TRANSACTIONS of the ASAE - №3. – V.23. – 1984. – P.915-920.

148. Sachin Chaudhary, Varun, Manish Kumar Chauhan, Heat transfer and friction factor characteristics using continuous M shape ribs turbulators at different orientation on absorber plate solar air heater / International Journal of Energy and Environment - V.3, I.1, 2012. – P.33-48.
149. Sen Zekai. Solar energy fundamentals and modeling technique: atmosphere, environment, climate change and renewable energy, - London: Springer-Verlag, 2008. – P. 276.
150. Solrico. Agency for solar market research and international communication, [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.solrico.com>.
151. Sukhatme S.P., Nayak J.K. Solar Energy. Principles of Thermal Collection and Storage. Third edition, - New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008. – P.433.
152. Torres-Reyes E., Cervantes de Gortari J.G., Ibarra-Salazar B.A., Picon-Nunez M. A. Design method of flat-plate solar collectors based on minimum entropy generation. Exergy. – 2001.
153. Trombe F. Le Chauffage par Rayonnement Solaire//Amenag and Nature. 1974. №33. P 15-17.
154. Weiss W., Mauthner F., Solar heat worldwide. Marcets and contribution to the Energy Supply 2010. Edition 2012 / AEE – Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Austria, 62.
155. Yogi Goswami D. Principles of Solar engineering. / D. Yogi Goswami, F. Kreith, J.F. Kreider // – New York: Taylor & Francis Group, 2000. – p. 694.

ДОДАТКИ

Додаток 1

«Затверджую»

Директор ТОВ «ПАРКТАУН»

Ю.Д.Штодлер



« _____ » _____ 2015 р.

впровадження результатів кандидатської дисертації Пасічника Павла Олександровича «Система теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем»

Ми ті, що нижче підписалися, від ТОВ «ПаркТаун» директор Ю.Д. Штодлер, інженер з технічного нагляду Луц О.Б., від КНУБА завідувач кафедри теплотехніки, д.т.н., проф. Приймак О.В., завідувач лабораторії термодинаміки, тепломасообміну і будівельної теплофізики Погосов О.Г. підтверджуємо, що з 2015 р. було прийнято до впровадження результати наукових досліджень Пасічника П.О., які є частиною його кандидатської дисертації.

В період з 2016. ТОВ «ПАРКТАУН» розпочинає будівництво котеджного містечка в житловому комплексі «ParkTown» у с.м.т. Гостомель, Київської області. В якості системи вентиляції в котеджах пропонуються механічні припливно-витяжні системи з комбінованими джерелами енергії, де у якості електричного калорифера може бути застосований комбінований сонячно-електричний повітропідігрівач.

Доведено, що впровадження запропонованого приладу забезпечить економію електроенергії для підігріву припливного повітря на 8-12% на рік за рахунок сонячної енергії.

Одержані результати можуть бути використані в подальшому при будівництві об'єктів, де буде передбачуватись електричний підігрів повітря для систем вентиляції.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор ТОВ «Парк Таун»

Ю.Д. Штодлер

Інженер з технічного нагляду ТОВ «Парк Таун»

Луц О.В.

Завідувач кафедри теплотехніки, д.т.н., проф.

О.В. Приймак

Завідувач лабораторії термодинаміки, тепломасообміну та будівельної теплофізики

О.Г. Погосов

Додаток 2

«Затверджую»

Директор ПП «Ірпінь-теплосервіс»



Є.О. Нігован

2015 р.

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертації Пасічника Павла Олександровича «Система теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем»

Ми ті, що нижче підписалися, від ПП «Ірпіньтеплосервіс» керівник відділу продажів Дорошенко А.А., провідний інженер Хмарна І.І., від КНУБА завідувач кафедри теплотехніки, д.т.н., проф. Приймак О.В., доцент кафедри теплотехніки Гламаздін П.М. підтверджуємо, що з 2015 р. впроваджено методику інженерного розрахунку сумісної роботи геліоенергетичних та вітроенергетичних установок для потреб теплопостачання, яка розроблена в дисертаційній роботі Пасічника П.О.

Застосовано інженерну методику для розрахунку необхідної площі геліополя та обдуваної площі вітроколеса при сумісній роботі геліосистеми та вітроенергетичної системи для потреб теплопостачання при досягненні бажаного річного коефіцієнту заміщення традиційних енергоносіїв енергією вітру та сонця. Запланованим об'єктом теплопостачання є брудер-хауз на 400 курчат в птахівницькому господарстві ФОП Тріпаченко І.Б. с. Боршна, Прилуцький район, Чернігівська обл.

Заданий коефіцієнт заміщення 0,5, що дозволить вдвічі скоротити енергозатрати на опалення брудер-хауза. Простий термін окупності установки складає 2,8 роки.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.
Керівник відділу продажів ПП «Ірпінь-теплосервіс»

А.А. Дорошенко
Провідний інженер ПП «Ірпінь-теплосервіс»

І.І. Хмарна
Завідувач кафедри теплотехніки, д.т.н., проф.

О.В. Приймак
Доцент кафедри теплотехніки

П.М. Гламаздін

Є.О. Нігован
І.І. Хмарна

П.М. Гламаздін

Додаток 3



**Випробувальна лабораторія
ПрАТ «Волтекс-Меланж»**

Акредитована лабораторія. Атестат акредитації зареєстровано у
Реєстрі НААУ за № 2Т898 від 20 червня 2011 р.
Адреса: 2, вул. Карбишева, м. Луцьк, Україна, 43023
тел.: 0332-78-42-73 • факс: +38-0332-78-60-41
ел. адреса: info@edelvika.com

**СЕРТИФІКАТ ЯКОСТІ
на трикотажне полотно**

Замовник: Луцький національний політехнічний університет
Від: 09.11.12 р.

№ п/п	Контрольований параметр,	Од. вим.	Позначення НД на метод випробувань	Фактичне значення параметра
1	2	3	4	5
1	Поверхнева щільність (вага 1м ²)	г/м ²	ГОСТ 8846	1597
2	Кількість петельних (на 10 см) - рядків - стовпчиків		ГОСТ 8846-87	56 54
3	Розтяжність при навантаженнях, що менше розривних - по довжині - по ширині	%	ГОСТ 8847	19 66
4	Залишкова деформація - по довжині - по ширині	%	ГОСТ 8847	4 7
5	Питомий поверхневий електричний опір	ом	ГОСТ 19616	0,4×10 ⁴
6	Водопоглинання	%	ДСТУ ГОСТ 3816	132,6
7	Повітропроникність	дм ³ /м ² с	ГОСТ 12088	90 (72-108)
8	Кислотостійкість (зменшення розривального навантаження) H ₂ SO ₄ – 20% H ₂ SO ₄ – 50%	%	ГОСТ 16166-80	2,4

1	2	3	4	5
9	Вогнестійкість Тривалість залишкового горіння, після 30с контактування зі зразком Тривалість залишкового тління, після 30с контактування зі зразком	сек	ГОСТ 11209-85 П.3.12	0 0 Тканина вогнестійка

Начальник ВЛ



Вас

Тарасевич Н.В.