

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ  
Інженерних систем та екології**

---

(факультет)

Технологічної

---

(назва кафедри)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА  
на тему:  
Підвищення ефективності повітряних геліосистем**

**Руденко Сергій Дмитрович**

Київ – 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**  
Інженерних систем та екології

---

(факультет)

Теплотехніки

---

(назва кафедри)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

---

„\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Підвищення ефективності повітряних геліосистем

Виконав студент

групи :

*ТВмн-23*

192 «Будівництво та цивільна  
інженерія»

Теплозабезпечення і вентиляція

*Руденко Сергій Дмитрович*

Керівник:

*Пасічник П.О.*

доцент, канд. техн. наук

Київ – 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: *Інженерних систем та екології*  
Кафедра: *Тепло техніки*  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: *Магістр*  
Спеціальність: *192 «Будівництво та цивільна інженерія»*  
Спеціалізація: *Тепло постачання і вентиляція*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Декан факультету

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
„\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_  
року

**З А В Д А Н Н Я  
НА ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

*Руденю Сергій Дмитрович*

1. Тема роботи: *Підвищення ефективності повітряних геліосистем*  
затверджена наказом ректора КНУБА № \_\_\_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року
2. Керівник роботи: *Пасічник Павло Олександрович*  
доцент, канд. техн. наук
3. Строк подання студентом роботи до захисту: 19 травня 2025 року
4. Зміст пояснювальної записки за результатами:  
Вступ .
  1. Перспективи розвитку сонячних систем в Україні
  2. Повітряні геліосистеми теплопостачання

3. Сонячний колектор з абсорбером з трикотажного вуглеграфітного полотна

4. Вплив вітру на ефективність роботи ксеп і розрахунок вітрогенератора  
Висновки

5. Графічний матеріал за розділом

Плакат 1. "Сонячні" перспективи України

Плакат 2. Swot-аналіз розвитку сонячної енергетики в Україні

Плакат 3. Класифікація геліосистем теплопостачання

Плакат 4. Існуючі схеми повітряних геліосистем теплопостачання

Плакат 5. Характеристики вуглеграфітного полотна

Плакат 6. Фізична модель теплообмінних процесів у повітряному колекторі

Плакат 7. Теплові характеристики повітряного сонячного колектора

Плакат 8. Теплообмін між повітрям та абсорбером у різних типах колекторів

Плакат 9. Висновки

6. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина; б) практична частина).

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Вступ .	17.09.2024
1. Перспективи розвитку сонячних систем в Україні	08.11.2024
2. Повітряні геліосистеми теплопостачання	28.02.2025
3. Сонячний колектор з абсорбером з трикотажного вуглеграфітного полотна	21.03.2025
4. Вплив вітру на ефективність роботи ксеп і розрахунок вітрогенератора	15.04.2025
Висновки	19.04.2025
Остаточне оформлення роботи	27.04.2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	15.05.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	20.05.2025

7. Консультанти розділів дипломної роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис

8. Дата видачі завдання 01.09 2024 р.

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кириченко М.А.

Керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Пасічник П.О.

Магістр

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Руденко С.Д.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ СИСТЕМ В УКРАЇНІ .....	8
РОЗДІЛ 2. ПОВІТРЯНІ ГЕЛІОСИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ .....	15
2.1. Аналіз існуючих систем.....	15
2.2. Методики розрахунку систем.....	19
2.3. Аналіз відомих конструкцій сонячних повітропідігрівачів та шляхи їх вдосконалення .....	22
2.4. Огляд сучасних сонячних повітропідігрівачів.....	29
2.5. Особливості повітряних геліосистем.....	33
РОЗДІЛ 3. СОНЯЧНИЙ КОЛЕКТОР З АБСОРБЕРОМ З ТРИКОТАЖНОГО ВУГЛЕ-ГРАФІТОВОГО ПОЛОТНА. ....	40
3.1. Абсорбери сонячних повітряних колекторів.....	40
3.2. Абсорбер з вуглеграфітового трикотажного полотна.....	45
3.3. Удосконалена фізична модель теплообмінних процесів в повітропідігрівачу.....	52
3.4. Теплові характеристики сонячного повітропідігрівача .....	54
3.5. Аеродинамічні характеристики повітропідігрівача з абсорбером із трикотажного полотна.....	63
4. ВПЛИВ ВІТРУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ КСЕП І РОЗРАХУНОК ВІТРОГЕНЕРАТОРА.....	67
Висновок.....	74
Список використаної літератури	

## ВСТУП

Збройна агресія російської федерації проти України демонструє вразливість централізованих систем генерації енергії до військових атак. Зокрема, першими під прицілом великі вузли енергогенерації (ГЕС, ТЕС, ТЕЦ та ін.), вузли передачі та транспорту енергетичних ресурсів (трансформаторні електростанції, лінії електропередач, порти тощо) та безпосередньо джерела енергоносіїв (газові сховища, родовища, шахти і т.д.).

Атаки на українську енергосистему мають кілька наслідків, які суттєво впливають на країну:

- Відключення електроенергії: атаки призводять до масових відключень електрики, що впливають на життєдіяльність населення та промисловості.
- Втрати економіки: Пошкодження енергетичної інфраструктури викликає збитки для бізнесу і держави, знижуючи продуктивність і уповільнюючи економічний розвиток.
- Соціальна нестабільність: Відсутність електроенергії може призвести до протестів та невдоволення серед населення, посилюючи соціальну напругу.
- Вплив на критичну інфраструктуру: Відключення електроенергії може загрожувати роботі лікарень, систем водопостачання, зв'язку, що є критично важливими для забезпечення базових потреб населення.
- Екологічні наслідки: Пошкодження енергосистеми може викликати екологічні проблеми, зокрема витіки пального або забруднення внаслідок зупинки підприємств.
- Психологічний тиск: Постійні атаки на енергетичну інфраструктуру посилюють стрес і невизначеність у суспільстві, погіршуючи загальний психологічний стан населення.
- Витрати на відновлення: Відновлення пошкодженої інфраструктури вимагає значних коштів і ресурсів, що може вплинути на бюджет країни.

## РОЗДІЛІ. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ СИСТЕМ В УКРАЇНІ

Основні показники енергетичної системи України станом на лютий 2025 року демонструють значні втрати генеруючих потужностей, що зумовлені регулярними обстрілами об'єктів енергетичної інфраструктури. Протягом 2024 року загальні втрати потужності перевищили 9 ГВт. Суттєве зниження виробничих можливостей торік спостігалось в сегменті теплової та гідро-генерации. Масштабна ремонтна кампанія напередодні опалювального сезону 2024/2025 додала в мережу майже 3 ГВт додаткової потужності (рис. 1). У літній період 2024 року відновлювана генерація досягла рекордних показників у загальному балансі (17-18%), але у зимовий сезон ця частка скоротилася приблизно на 50% [1].

Існуюча ситуація провокує розвиток децентралізованих та альтернативних систем енергопостачання. Найбільш перспективним альтернативним джерелом енергії, як теплової так і електричної, без сумніву являється сонячне випромінювання, оскільки воно безкоштовне і повсюдне [2,3,4].

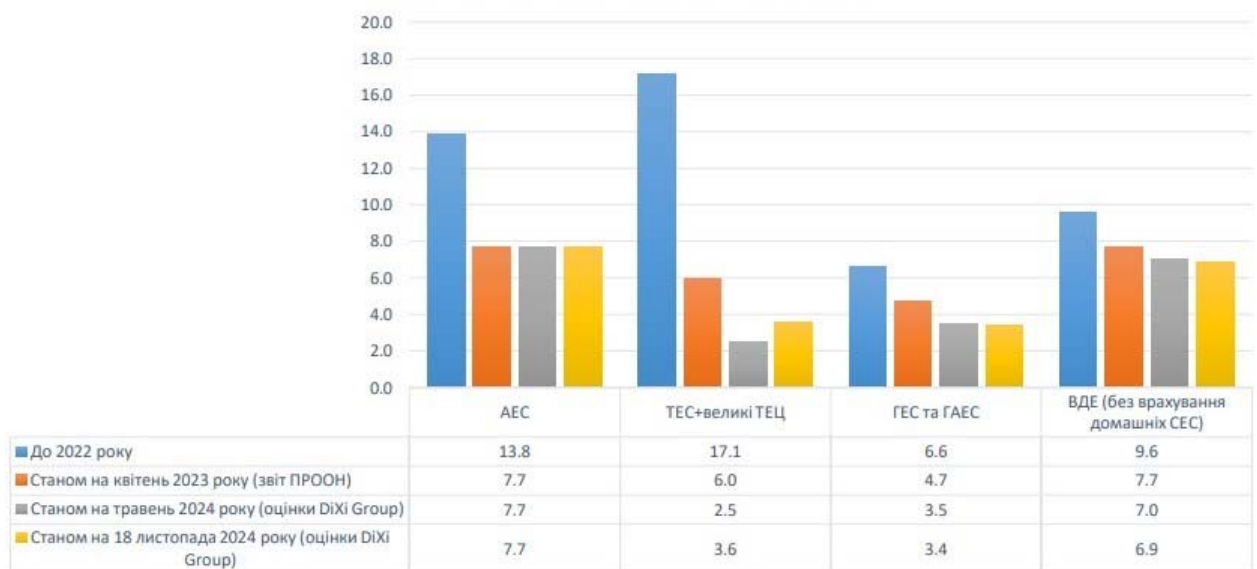


Рис.1 Доступні генеруючі потужності України, ГВт

Сонячна енергетика – найперспективніша та найдинамічніша галузь сучасної відновлюваної енергетики, оскільки в Україні існують достатньо сприятливі природні умови для використання сонячної енергії. Середньорічна

кількість сумарної сонячної радіації, що потрапляє на  $1 \text{ м}^2$  поверхні, на території України знаходиться в межах від  $1070 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  до  $1500 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ . Кількість сумарної радіації – енергія, що потенційно може бути використана на формування всіх природних процесів, перебуває у межах від  $1064,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  на рік до  $1551,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  (рис. 2). Величини середніх річних значень радіаційного балансу, тобто сонячної енергії, засвоєної діяльним шаром земної поверхні, змінюються по території від  $330 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  до  $580 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$  [5].

Для врахунку потенціалу потужності встановлення сонячних електростанцій використовуються не лише показники надходження сонячної радіації, а і територіальні показники, такі як доступна площа для будівництва станцій [3,6] та коефіцієнт потужності гелію юлів, який залежить від типу та розташування сонячних колекторів, відстані між їх рядами тощо. За результатами наукових досліджень, потенціал потужності встановлення сонячних панелей становить  $2\,449$  тис. МВт, а потенціал річної сонячної електрогенерації в Україні становить близько  $3\,082$  млрд. кВт·год/рік [5].

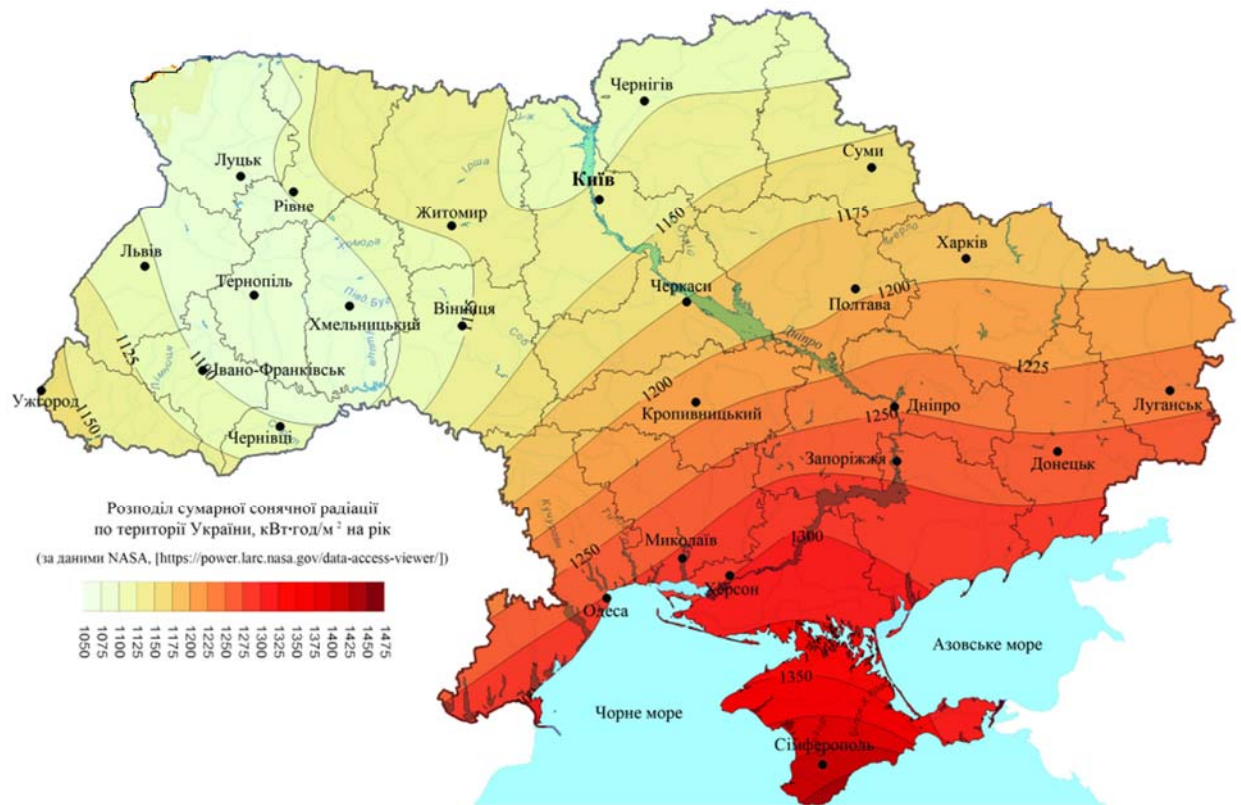


Рис 2 .Розпо діл сумарної сонячної радіації по території України

Соняч ну енергетику можна розділити на теплову та електричну. Теплова геліо енергетика є доволі нішевою галуззю інженерії, що може бути використана індивідуально під конкретні задачі з теплопостачання, в основному це підігрів води для систем ГВП та басейнового господарства в літній та перехідні й періоди року та технологічні системи теплопостачання. Основною проблемою є тотальне неспівпадіння пікового надходження сонячної енергії та споживання теплової енергії (рис.3) [7]. В свою чергу, відсутність ринку теплової енергії для можливості продажу теплової енергії влітку в централізовану мережу теплопостачання обмежує економічну привабливість сонячних систем теплопостачання. Перетворення сонячної теплової енергії в більш ліквідні види енергії є доволі складним і затратним процесом. [3,8] .

Більш перспективним для України наразі є використання сонячного випромінювання для отримання електроенергії на сонячних електростанціях (СЕС) великого діапазону потужностей, від 5кВт на приватних домогосподарствах до 250МВт комерційної Нікопольської СЕС. Це обумовлено тим, що

електрична умова має високий коефіцієнт перетворення у будь-який інший вид енергії, до того ж літні піки електроспоживання (робота кондиціонерів та холодильного обладнання) чітко співпадають з піками активності сонячного випромінювання.

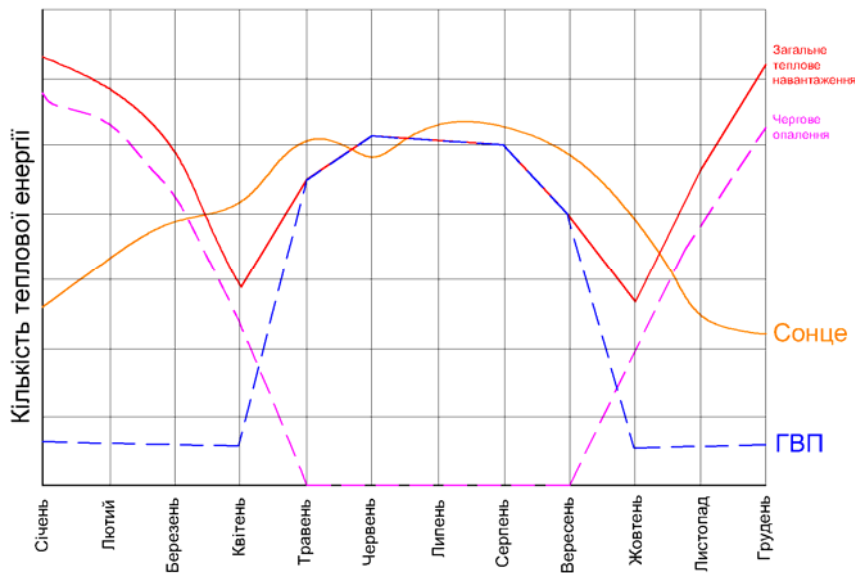


Рис 3 .Орієнтовна кількість теплової енергії для ГПВ і чергового опалення середньостатистичного готелю з оптимальним використанням сонячної енергії.

Сонячна електростанція – це енергетичний об’єкт, що перетворює сонячне випромінювання в електроенергію. Основою станції є фотоелементи, які під впливом сонячної радіації генерують постійний струм за рахунок ефекту р-п переходу [3,9]. Інверторами цей струм перетворюється в змінний, який придатний для використання в електромережі. Ключовими елементами є фотовольтаїчні панелі і інверторне обладнання, монтажні системи та обладнання для моніторингу.

Сонячні електростанції можна умовно розділяються на два типи: домашні СЕС (умовно до 30кВт) та комерційні великі СЕС (від 1 МВт). Домашні електростанції можуть забезпечити енергетичну незалежність домогосподарства та можливість отримувати дохід від продажу надлишків електроенергії в загальну мережу. Термін окупності таких станцій складає 4-6 років при терміні

експлуатації геліотехнічного обладнання більше 25 років. За період повномасштабної війни кількість домашніх СЕС зростає на 25-30% щорічно. В 2025 року кількість проєктів складатиметься близько 100 000 штук. Розвиваються енергетичні кооперативи та системи віртуальних електростанцій на базі об'єднаних домашніх СЕС.

Комерційні СЕС це потужні енергогенеруючі підприємства, що займають значні площі. Такі станції зазвичай розміщуються на промислових територіях або на агропродуктивних землях. Україна активно розвиває велику сонячну енергетику, маючи десятки потужних промислових СЕС. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій перевищує 6,8 ГВт. Найбільшими комерційними СЕС в Україні є Нікопольська СЕС (246 МВт, 400га, Дніпропетровська обл.), Покровська СЕС (230 МВт, 375га, Дніпропетровська обл.), Кам'янець-Подільська СЕС (120 МВт, 250га, Хмельницька обл.), СЕС «Сонячна-Кілія» (110 МВт, 220га, Одеська обл.), СЕС Терновиця (44МВт, 80га, Івано-Франківська обл.), СЕС Старокозача (43 МВт, 80га, Одеська обл.) Димерська СЕС (37 МВт, 60га, Київська обл.) та інші. Також з 2022 року в окупації опинилися потужні СЕС Токмак Solar Energy (50МВт, Запорізька обл.) та ФЕС Костомарове (40МВт, Херсонська обл.), а з 2014 року окуповані кримські СЕС «Перове» (105 МВт), «Охотникове» (82 МВт) та «Миколаївка» (69,7 МВт). Перспектива вироблення електроенергії іншими СЕС станом на 2021рік представлена на рис.4 [5].

В Україні представлена система підтримки за «зеленим» тарифом, що гарантує викуп електроенергії від відновлювальних джерел енергії до 2030 року. Тарифна ставка для комерційних СЕС становить 0,12 євро/кВт·год, а для домашніх, що встановлені у 2024 році (до 30 кВт) – 0,16 євро/кВт·год. Виплати проводяться в національній валюті згідно курсу НБУ. З точки зору розрахунків за собою електроенергії для домашніх СЕС в країні діють два проєктовані методи розрахунку - NET Metering і NET Billing.

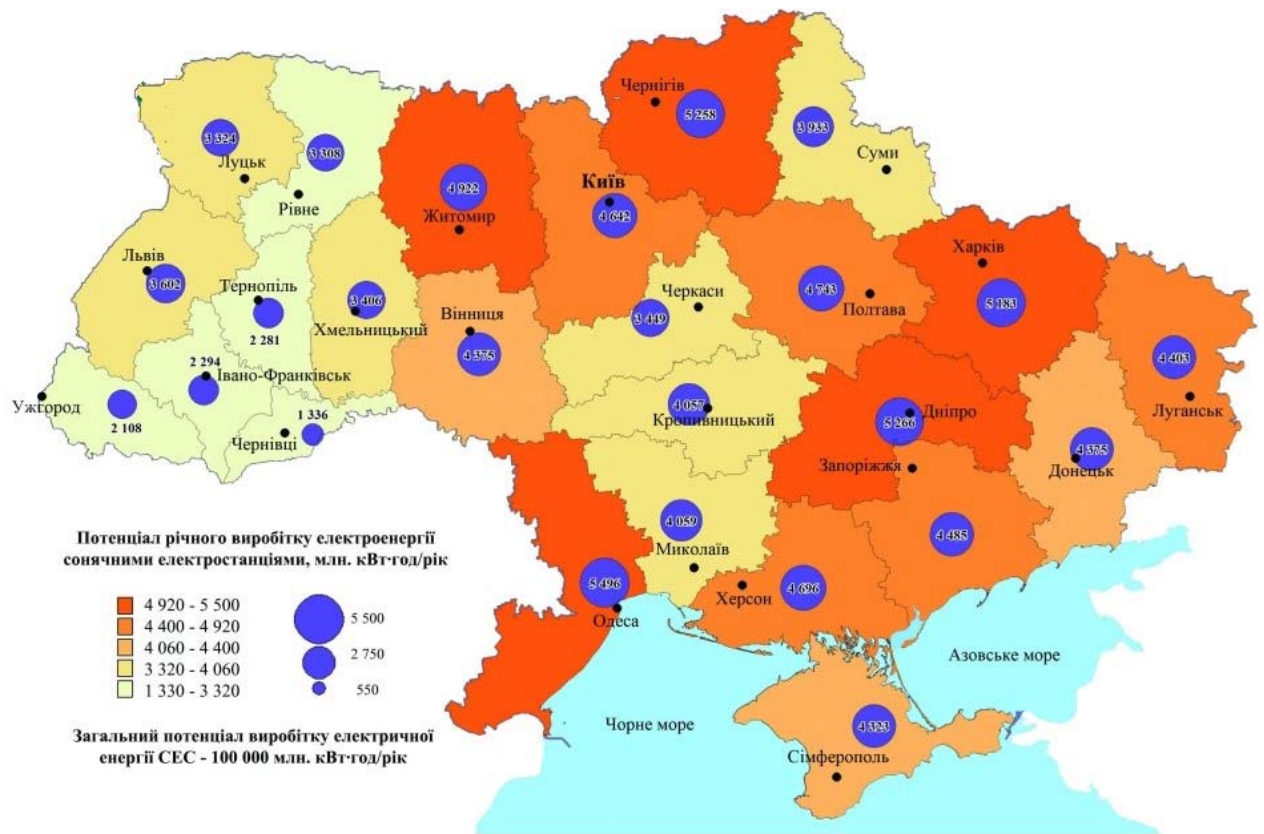


Рис 4 .Орієн тьвна кількість теплової енергії для ГПВ і чергового опалення середньостатистичного готелю з оптимальним використанням сонячно ї енергії.

Щомісячні виплати здійснюються автоматично через ДП “Гарантований покупець”

NET Metering це аналог «зеленого» тарифу, з допомогою якого домогосподарство використовує згенеровану енергію для власних потреб, а надлишки віддаються в єдину енергетичну мережу України. Кількість енергії, що віддасться, зараховується на індивідуальний баланс споживача. В подальшому накоплену енергію можна забирати назад, споживаючи електроенергію із загальної мережі в періоди недостатньої власної генерації (ніч, зима, висока хмарність тощо).

NET Billing – це система аналогічна до NET Metering з однією відмінністю, що накоплена енергія зараховується не у вигляді енергії, а вигляді

гроше й Кількість грошей залежить від вартості електроенергії на момент передач і надлишків до об'єднаної мережі. Особливістю цього метода є те, що накопичені кошти можна використати лише для оплати спожитої з мережі електроенергії

На основі оброблених даних та аналізу економічного та енергетичного стану України було проведено SWOT-аналіз розвитку сонячних енергетичних систем в нашій країні, який приведено на рис.5



Рис 5 .SWOT-аналіз з перспектив розвитку геліосистем в Україні

Воєнні реалії України погіршують економічний та технологічний потенціал країни, а варварські атаки на українську енергетику створюють масу проблем, фінансових та соціальних збитків. Проте руйнація традиційних централізованих джерел енергії спонукає до децентралізації систем енергозабезпечення та розвитку відновлювальних джерел енергії, зокрема і сонячних

енергетичних систем. Україна має достатній природний потенціал для розвитку сонячних енергетичних установок, а також вже має певний технічний, комерційний та правовий ґрунт для реалізації цього величезного потенціалу. Динаміка зростання енергогенерації від домашніх та комерційних СЕС дає надію на ефективне заміщення традиційних джерел енергії та «одужання» української енергосистеми.

## 2. ПОВІТРЯНІ ГЕЛІОСИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

### 2.1. Аналіз існуючих систем

Комплекс обладнання і допоміжних пристроїв, за допомогою яких сонячне випромінювання перетворюється у корисну теплову енергію називається геліосистемою 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 рис. 1.2. В результаті аналізу літературних джерел 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%. Кількісне розподілення відомих типів КСЕ у світі відображено на рис. 1.2.



Рис. 2.1. Класифікація геліосистем теплопостачання (виділено області дослідження дисертаційної роботи).

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

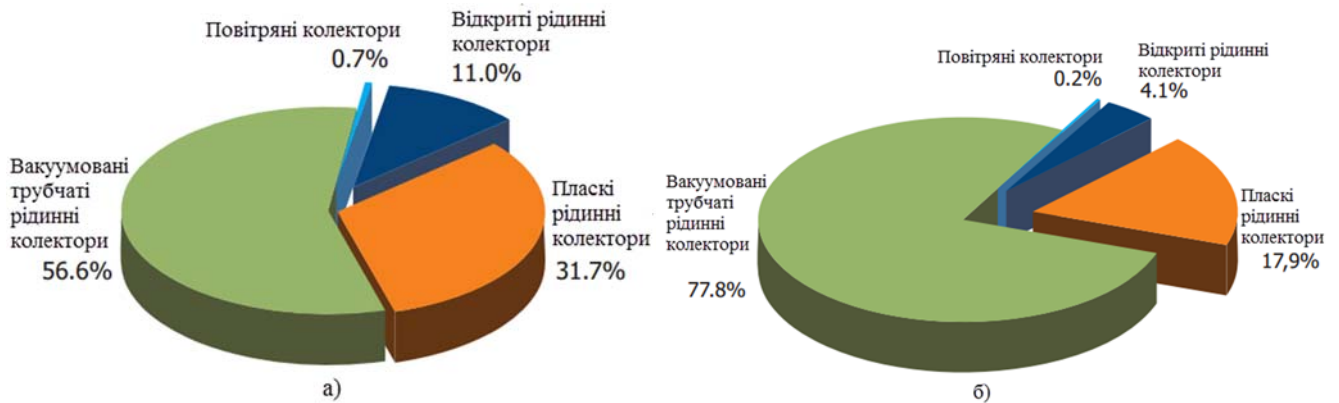


Рис. **Ошибк 4 Текст указанного стиля в документе отсутствует..2** Доля потужностей різних типів геліоколекторів у світі на 2011 рік: а) колектори, що використовуються; б) колектори, новозбудованих систем.

більш простим управлінням і більшою антикорозійною стійкістю. Крім того енергетичний 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) Як правило, сонячний колектор такої системи інтегрований у огорожуючі конструкції будівлі. Рух пові-

тря 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, лікарських трав і т.д.). Такі системи – це по суті спрощені системи першої групи, вони звичайно активні, можуть бути пересувними, без акумулювання і додаткових джерел енергії, адже масово використовуються у південних сонячних країнах Азії (Індія, Китай, Узбекистан і т.д.)

В силу усього, 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 повітрю, що нагнітається у колектор вентилятором 2. Потім по повітроводам 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 додатковому джерелі теплоти (ДДТ) 5. Регулювання потоків повітря (КСЕ-споживач, АТ-споживач, КСЕ-АТ) забезпечують регулюючі заслінки і б.

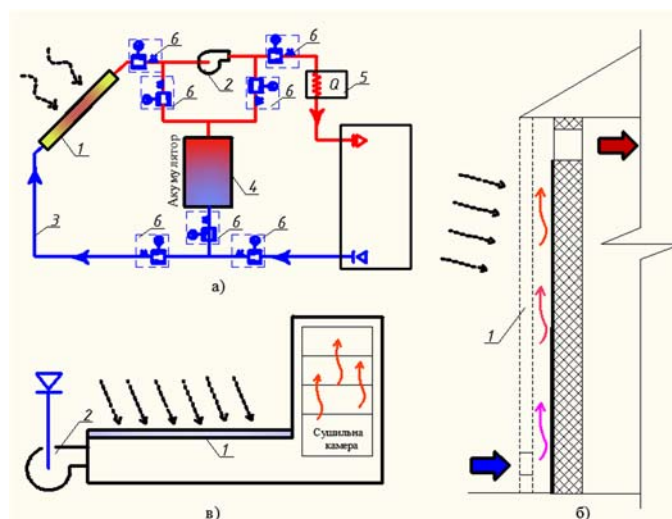


Рис. 2.3. Повітряні геліосистеми теплопостачання: а) активна система; б) пасивна система; в) активна технологічна система.

По суті, найбільш 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  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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. Влітку ж коли температура зовнішнього повітря відповідає температурі внутрішньої, гаряче повітря можна подати в барабанні сушарки посліду, які зараз повсюдно використовуються на птахофабриках.

## 2.2. 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.

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 кожного 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.

Усере дні або довготривалі характеристики визначають роботу системи соняч юго теплопостачання за тривалий проміжок часу: місяць, сезон, або рік.

Одніє ю з перших була методика розрахунку геліоустановок на основі миттє вих значень, розроблена в результаті узагальнення експериментальних даних для водонагрівачів за двадцятирічний період. На основі часових значень інтен сивностей сонячної радіації і температури зовнішнього повітря обчислювалас я 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 (віднош єння фактичного числа годин сонячного сьйва до числа днів у місяці, помно женому на середню тривалість дня). Потім на основі місячних значень тепло вії потужності визначалося її значення за сезон або рік. Розбіжність експерим єнтальних і розрахункових даних н еперевищувало 8-12%.

Основ ним недоліком методу було те, що для визначення теплової потужності сонячного водонагрівача необхідно було виконати графічну побудову залежно стей інтенсивності сонячної радіації і теплових втрат сонячного колектора від часу дня. Крім того, методика не врахо вувала впливу деяких факторів (міст юсті бак-акуму ятора, характеру теплового навантаження об'єкта, конструкц ії сонячного колектора) на характеристики геліоустановки. На основі цієї метод ики в 1977 р були розроблені рекомендації для розрахунку сонячних во - донаг рівальних установок

Пізні шє Хоттелом і Уїллером було запропоновано вираз для визначення годин юї теплової потужності сонячного колектора в залежності від кліматичних, конст руктивних і режимних факторів [16]

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

де  $\tau$  – пропу сьна здатність світлопрозорого покриття колектора;

$a$  – погли наюча здатність абсорбера колектора;

$I_K$  – сумар на інтенсивність сонячного випромінювання на площину колектора, Вт/м<sup>2</sup>;

$U_L$  – загал ьний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/м<sup>2</sup> К;

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

$T_{НС}$  – температура навколишнього середовища;

Потім визначалися інші енергетичні характеристики для кожної години, і під умовами по годинах доби розраховувалася теплова потужність за сезон а рік.

Перша найбільш широко використовувана модель для розрахунку теплових характеристик сонячних систем TRNSYS була розроблена Клейном. Ця квазі-стаціонарна 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 сонячно-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 Основного методу складної залежності коефіцієнта заміщення від безрозмірних комплексів  $X$  і  $Y$ , що включають в себе кліматичні, конструктивні і режимні фактори

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

$$Y = A \cdot F_R \cdot (\overline{\tau a}) \cdot \overline{I}_K \cdot n / E_M,$$

де  $A$  – площа геліополя, м<sup>2</sup>;

$F_R$  – коефіцієнт відводу теплоти в КСЕ;

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

$\Lambda$  - 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  $\Phi, f$ - графіків. На основі цих методів різними дослідниками були розроблені різновиди розрахункових моделей для різних окремих випадків [15,19-20].

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 області 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.

Останнім 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 [12]

### 2.3. Аналіз відомих конструкцій сонячних повітропідігрівачів та шляхи їх вдосконалення

Після аналізу патентних вишукувань виділено чотири напрямки розвитку конструкцій плоских повітряних КСЕ (Рис. 2.4)

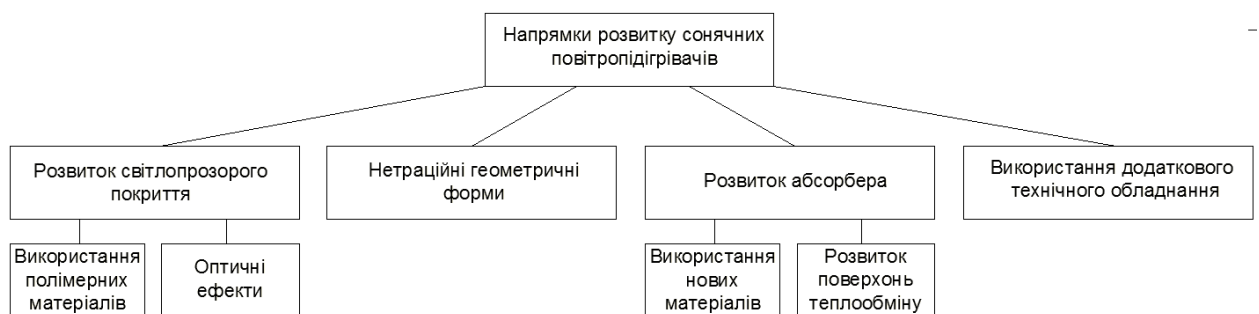


Рис. 2.4 . Напрямки розвитку сонячних повітропідігрівачів.

Розвиток світлопропускнуго покриття зводиться до більш ефективного збору сонячного випромінювання без добових змін кутів установки КСЕ. На-

приклад, в [12] наведено приклад світлопропускну покриття якого, окрім звичайно плоского скла, представляє собою набір фокусуючих скляних призм, які збільшують кількість прийнятого випромінювання (Рис. 2.5). Недоліком такого рішення є збільшена технологічність виробництва скляних призм, тобто збільшення вартості колектора, крім того маса та крихкість таких приладів стає вищою.

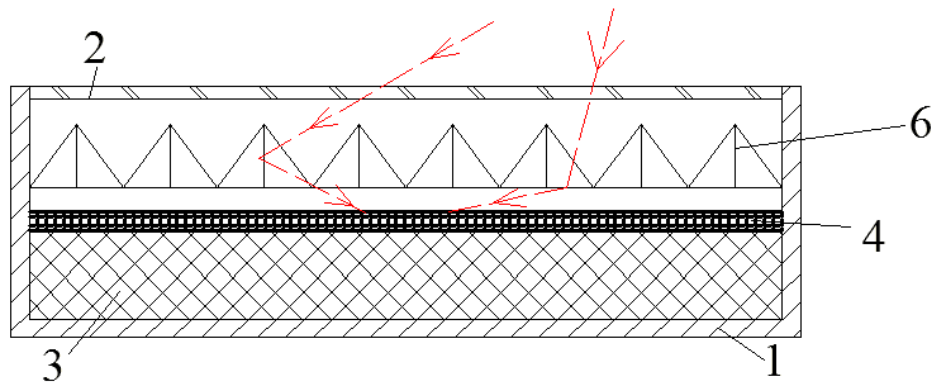


Рис. 2.5 . Фокусуючий сонячний повітропідігрівач: 1-корпус; 2-світлопропускну покриття; 3-теплоізоляція; 4-абсорбер; 5-скляні призми.

Відомий ряд рішень, в яких використовується світлопрозорі плівкові матеріали в якості прозорого покриття. Так в [12] 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 прозорою плівкою, вона також заповнена повітрям, що слугує в цьому випадку тепловою ізоляцією. Схожий принцип реалізовано в технічних рішеннях [33,34-37]. Головною перевагою таких рішень є низька вартість і відносна простота виготовлення. Але відомо [16], що плівкові покриття гірше пропускають випромінювання ніж скло, що знижує ефективність таких КСЕ, а це означає збільшення площі геліополя. Крім того, плівкові покриття не створюють на відміну від скляних парникового ефекту, притаманного повітропідігрівачам зі скляним покриттям. Також, сьогоденні плівкові матеріали мають прискорене

старі ня під дії сонячних променів, при цьому інтенсивно втрачають прозорість, що викликає необхідність їх частоті заміни. Відоме також технічне рішення плівкового КСЕ (Рис. 2.6)[40].

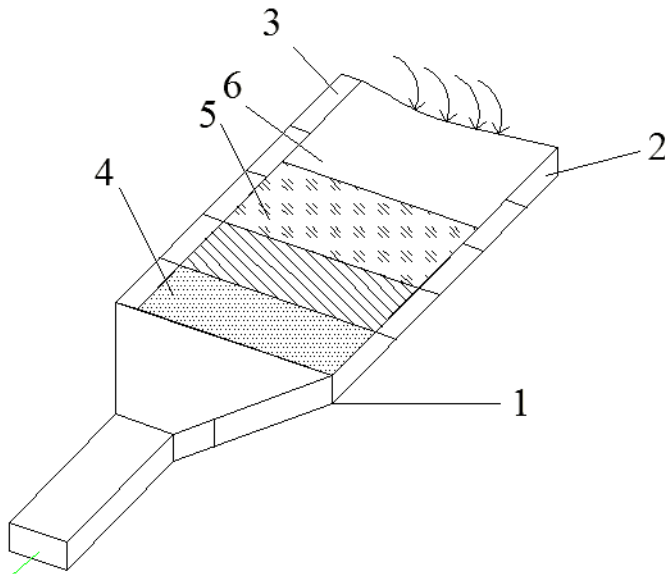


Рис. 2.6 . Пластийний плівковий сонячний повітропідігрівач: 1-корпус, 2,3-корпусні деталі; 4-решітчастий тримач; 5-поглинаюча плівка; 6-світлопрозора плівка.

Таке рішення відрізняється від попередніх формою – він пластийний. 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 геометричне положення покриття та абсорбера. Вона виготовлена із сітки, сплетеної із металічної проволочки або пластику. 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 [14]. 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 дна (Рис. 2.7). Оскільки саме сітки несуть основне навантаження у якості абсорбера,

то дно ще 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 – розв'язок площі поверхні теплообміну з одночасною турбулізацією потоку теплоносія [18].

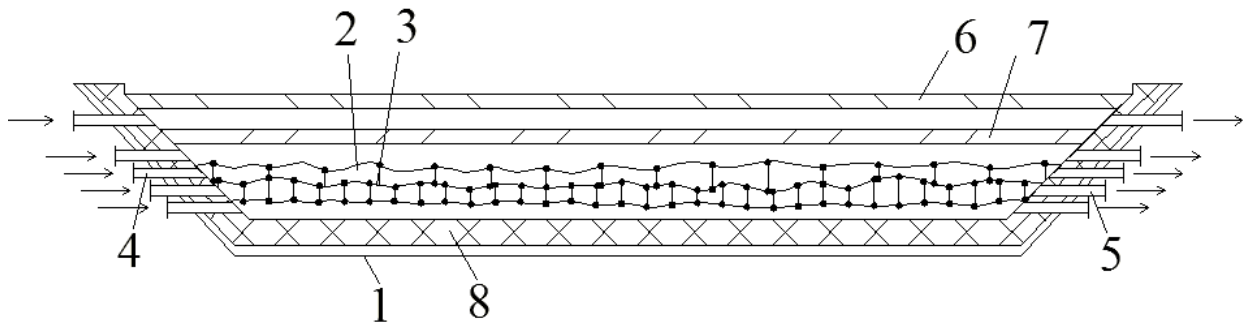


Рис. 2.7 . Повітряний підігрівач з решітчастим абсорбером: 1-корпус з металеві сітки; 4,5-вхідний та вихідний патрубок; 6,7-осклення; 8-теплоізоляція

В [11] 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. 2.8). 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 цьому простіше рішення, технологічно виготовити такий абсорбер досить складно, оскільки для виготовлення його потрібна або спеціальна оснастка у вигляді особливого штамп або виготовляти його зварним з набору пластин, що також доволі непросте. Також проблеми ваги, металемності та необхідності селективних покриттів не знають.

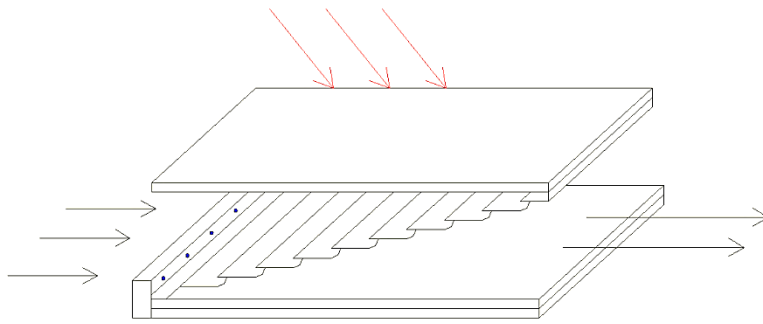


Рис. 2. Ошибка 4 Текст указанного стиля в документе отсутствует..8

.Сонячний повітряний підігрівач зі стрічковим абсорбтором.

В роботі [16] абсорбтор виконаний у вигляді чорної пластини робоча поверхня якої представляє собою капілярну структуру (Рис. 2.9). Виконання поверхні абсорбера у вигляді капілярної структури переслідує ціль збільшити його поглинаючу здатність 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 повітряного підігрівача.

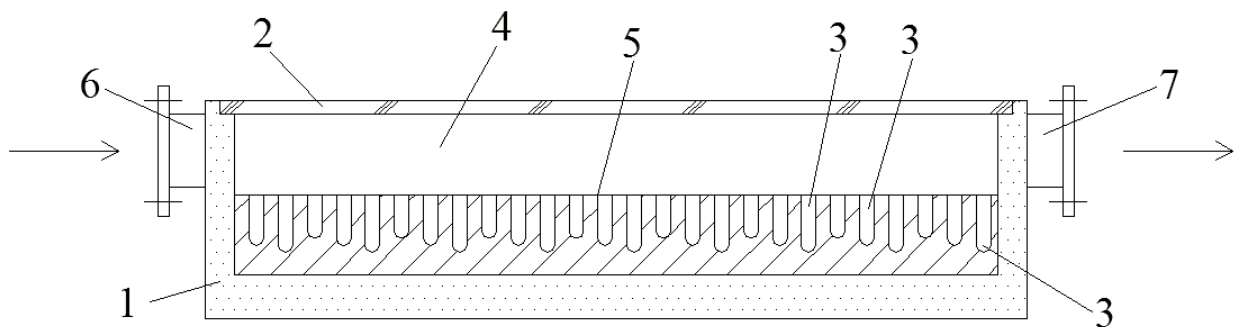


Рис. 2.9. Сонячний повітряний підігрівач з капілярним абсорбером: 1-теплоізолюючий корпус; 2-світлопрозоре покриття; 3-капіляр; 4 – канал для проходження повітря; 5-поверхня абсорбера; 6,7 – вхідний та вихідний патрубок.

Збільшуючи ефективність КСЕ також вдаються до використання додаткових технічних елементів. Так, в [17] запропонований геліоприймач з концентратором, у фокусі якого розміщений випаровувач 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 в часу, що робить роботу всієї системи погано прогнозованою та нестійкою.

Доволі ефективним з теплотехнічної точки зору виглядає рішення [17]. В цьому рішенні в жорсткому теплоізольованому 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. 2.10). Повітря, проходячи через оболонку, створює всередині неї «киплячий шар» з кульок. Відомо, що теплообмін в «киплячому шарі» достатньо інтенсивний, але навряд чи володіє великим аеродинамічним опором, що ставить під питання можливість широкого використання таких геліоприймачів.

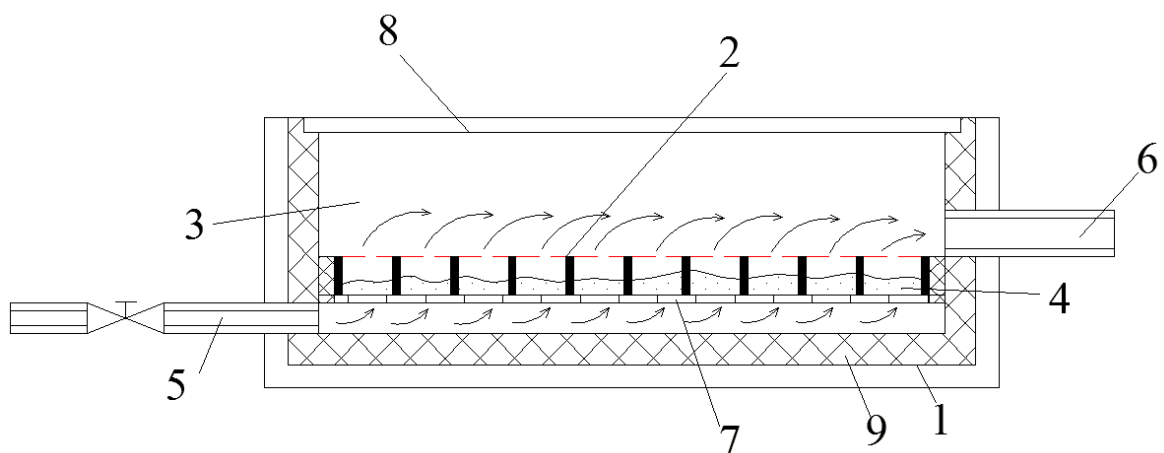


Рис. 2.10 .Сонячний повітряний підігрівач з «киплячим шаром»: 1-корпус; 2,7-обмежувальні сітки; 3-вільний простір; 4-кульова засипка; 5,6-вхідний та вихідний патрубков; 8-світлопрозоре покриття; 9-теплоізоляція.

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 удосконалення та більшої пристосованості до реалій України.

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  $f$ . Коефіцієнт заміщення визначається

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

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 [18]. Це пов'язано з сезонним неспівпадінням найбільшого приходу сонячної радіації та пікових потреб в теплоті споживачем, а також добовою періодичністю сонячного випромінювання. Шляхами вирішення подібних проблем є улаштування теплових акумуляторів (добових, сезонних), використання додаткових джерел енергії

засобів для підвищення енергетичного потенціалу (теплові насоси, термосифони, теплові труби) [19,20]. Проте перераховані способи значно здорожують системи.

Технологічні повітряні ГСТ мають значно вищі значення  $f$  (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 20], в місці з одним з найбільших надходжень сонячної енергії, вночі ж проходить, так званий, «перепочок зерна» для того щоб волога розповсюдилась від ядра зернятка до обшарів країв.

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

## 2.4. Огляд сучасних сонячних повітропідігрівачів

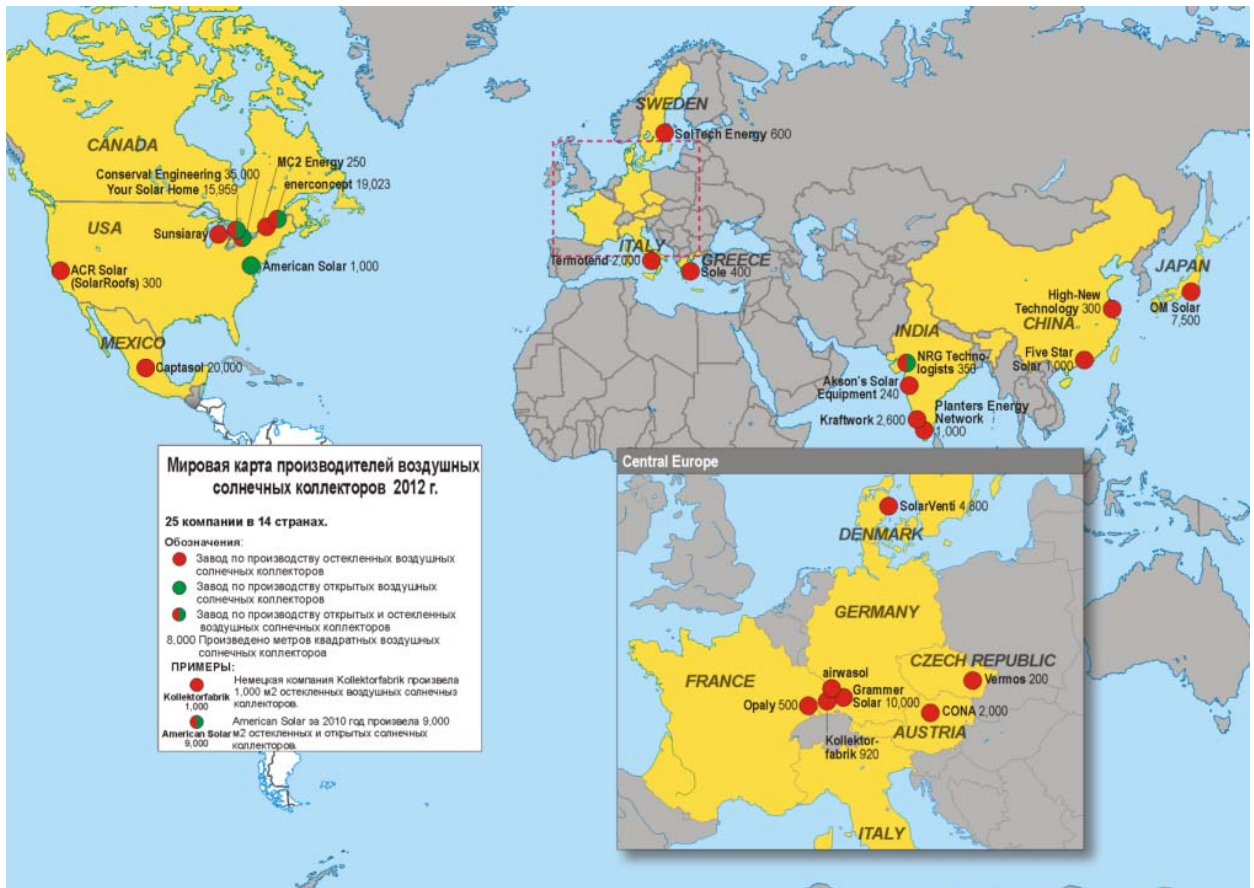


Рис. 2.11 Світо в мапа виробників повітряних колекторів 2012р.

Світо в 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 “Solri” на Рис. 2.11 зображено розподілення світових виробників повітряних КСЕ.

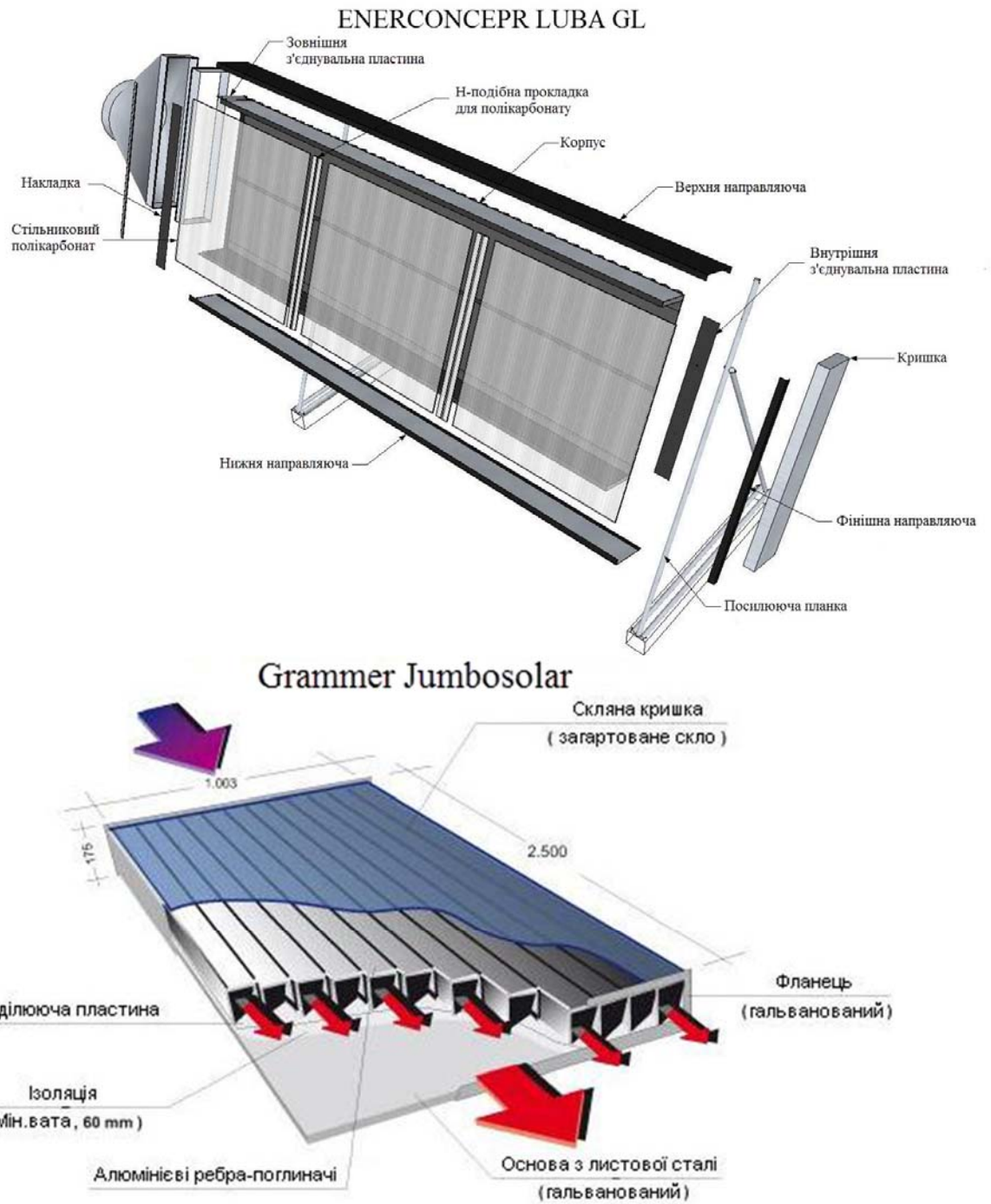


Рис.2.12 . Конструкція сонячних повітропідігрівачів, що найбільш масово виробляються у світі.

Найбільшими виробниками повітряних колекторів для активних систем теплопостачання в світі є німецький бренд Gramm & Solar, канадська корпорація ENERCONCEPT, італійський Thermotend та данський Solar Venti. Всі ці колектори мають принципово однакову будову( рис. 1.5)

у якої абсорбера використовується профільований металевий лист

(стал ь алюміній, мідь); торцевий підвід/відвід повітря; світлопрозоре покриття скла або стільникового полікарбонату. Відмінністю досліджених моделей між собою можна назвати спосіб руху повітря у КСЕ: в моделі Jumbosol а повіт ря продувається під ПЕ; в моделі Luba GL над П Е

Повіт рні КСЕ, які виробляються в світі, мають ряд спіль них істот них недол ків. 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. Ошибки в тексте указанного стиля в документе отсутствует..1

Виробник	Установлена потужність Вт *	Габаритний розмір мм	Площа покривної поверхні, м <sup>2</sup>	Вага кг	Матеріал лабораторія	Матеріал світлопрозорого покриття	Ціна €**
Gramm Solar Jumbo Solar, Німеччина	1675	2500 × 1003 × 175	2,26	0	Алюміній	Скло	00
Solar Venti SV30, Данія	2000	3000 × 1020 × 72	2,98	9,1	Повість	Скло	250
SOLE AIRSO B5, Греція	2700	2833 × 1285 × 140	3,40	0	Алюміній	Скло	100
Termo End Termo Flow, Італія	1400	2000 × 1000 × 95	1,82	9,5	Сталь	Стільниковий полікарбонат	20

Енергосектор Luba GL, Канада	2300	2840 ×915× 205	2,45	2	Сталь	Сті- льний вий карбо- нат
------------------------------------	------	-------------------	------	---	-------	---------------------------------------

Технічні характеристики відомих моделей сонячних повітропідігрівачів

\*Потужність вказана при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м<sup>2</sup>

\*\* Ціна вказана по прайс-листу 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. Ошибка в Текст указанного стиля в документе отсутствует..13 .

Геліо поле повітряної ГСТ на основі колекторів Luba GL в Монреалі.

По-перше, сонячні повітронагрівачі 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, надаючи перевагу різним полімерним і композитним матеріалам при конструюванні колекторів сонячної енергії. По-друге, стандартною вимогою є підвищення міцності і стійкості до впливу ультрафіолетового випромінювання світлопротівоного покриття. Шляхи вирішення цієї задачі відомі: це заміна скла на склопакети, полікарбонати, плівки і т.д.[27]

## 2.5. Особливості повітряних геліосистем

У зв'язку з тенденціями останнього десятиліття та питаннями енергетичної незалежності держав розвиток технологій для використання поновлюваних та альтернативних джерел енергії продовжує набирати актуальності. Одним із найважливіших видів енергії по праву є – тепло, зокрема низькотемпературна, яка служить насамперед для теплопостачання різних споруд. Крім класичних джерел теплової енергії (вуглеводнів, різних видів вугілля, деревини іт.д.) людство вже видобуває тепло з ґрунту, повітря і води, при спалюванні практично будь-яких матеріалів, виробляє органічне паливо зі сміття, рослинних відходів промисловості, використовує сонячну радіацію. Технологічно найпростішим з вище перерахованих способів є збирання, перетворення та відпуск енергії сонячного випромінювання, що забезпечують, так звані, геліосистеми.

Геліосистеми – це комплекс обладнання та допоміжних пристроїв для перетворення електромагнітного випромінювання на корисну теплоту для систем теплопостачання. Встановлено, що в основному в геліосистемах застосовується рідинний теплоносій, однак, у ряді випадків доцільно використовувати як теплоносій також повітря. Геліосистеми повітряного теплопостачання (ГСВТ) мають наступні переваги по відношенню до рідинних: більш простими системними рішеннями; відсутністю можливості розмірення системи та затоплення обладнання більш простим управлінням і більшою антикорозійною стійкістю; більш високим енергетичним ККД [6]. Як відзначають фахівці [3,4, 5] застосування повітряного теплоносія в геліосистемах теплопостачання протягом тривалого періоду (року, терміну служби) цілком може конкурувати з рідинними ГСТ. Важливим є застосування повітря, підігрітого за рахунок сонячної енергії, для технологічних процесів у сільському господарстві (обігрів інкубаторів та брудер-хаузі в сушіння сільськогосподарської продукції, трави, послід тощо). Основне місце у процесі створення вискоелективних ГСВТ надається геліотехнічному обладнанню. До нього повинні пред'являтися підвищені вимоги, що полягає в якісному виконанні, застосуванні ефективних конструкцій та матеріалів.

Основним елементом геліосистем є колектор сонячної енергії (КСЕ). Саме його ефективність визначає якість перетворення сонячного випромінювання в корисну теплову енергію для систем теплопостачання. Якщо розглядати повітряні системи, то КСЕ для них можна поділити на заклені та незаклені (прим. надувні), у свою чергу, перші діляться за типом поглинаючого елемента (ПЕ), так званого абсорбера сонячного випромінювання: з профільованим (плоскі, ребристі, хвилеподібні пластини) і [7]. В якості абсорбера в основному використовують металевий профільний лист (мідний, алюмінієвий, сталевий) з селективними покриттями, полімерні матеріали з розвиненими поверхнями поглинання та теплообміну, різні пористі насадки (відходи металургії промисловості, сітки, кераміка, пакети сотових структур і т.д.). Повітряні КСЕ, які виробляються у світі, за принципом конструкції та процесів теплообміну мало чим відрізняються, маючи при цьому низку істотних недоліків. По-перше, це їх висока вартість (для Grammer jumbo GLK M 298€ за м<sup>2</sup> поглинаючої поверхні [9]), що веде до збільшення капітальних витрат на облаштування та низької окупності систем повітряного теплопостачання. По-друге, велика вага колекторів (для Grammer jumbo GLK M 34,8 кг/м<sup>2</sup> [9]) обмежує їх використання в існуючих будівлях, що призводить до необхідності посилення проектуваних несучих конструкцій або планування додаткових опорних споруд, що знову ж таки неминуче призведе до збільшення капіталу. Такі проблеми формують набір вимог для повітряних КСЕ, щоб створити дієву, ефективну і рентабельну систему теплопостачання.

Для ефективного використання сонячної енергії для повітряного теплопостачання будівель можна запропонувати набір вимог до КСЕ розроблений в основному на базі аналізу умов експлуатації системи.

Важливим заходом є необхідність зменшити величину площі геліополів, кількість та довжину повітроводів та допоміжних будівельних конструкцій, зробити менші витрати на його експлуатацію, пов'язані з періодичними ремонтами та очищенням КСЕ від пилу. Досягти цього можна лише за умови висо-

кої є ефективності використання сонячної енергії. Критерієм теплотехнічної досконалості сонячного колектора є його миттєвий ККД. Розглянемо вираз для визначення миттєвого ККД плоского сонячного колектора, запропонованого в [2]:

$$\eta_k = F' \cdot [(\tau\alpha)_\Sigma - U_K \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{ос}}) / \Pi]; \quad (1)$$

де:

$F'$  - коефіцієнт ефективності поглинаючого елемента;

$(\tau\alpha)_\Sigma$  - наведена ефективна поглинальна здатність колектора;

$U_K$  – загальний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/м<sup>2</sup>К;

$T_{\text{в}}$  - середня температура повітря в КСЕ, К;

$T_{\text{ос}}$  – температура довкілля, К;

$\Pi$  - інтенсивність випромінювання, що падає на КСЕ, Вт/м<sup>2</sup>.

З рівняння (1) видно, що з конструюванні вплинути можна втричі величини  $F'$ ,  $U_K$ ,  $(\tau\alpha)_\Sigma$ . Коефіцієнт ефективності ПЕ  $F'$  визначається його поглинаючою здатністю та теплообмінними властивостями – це означає, що вкрай важливі вибір матеріалу та форми абсорбера сонячного випромінювання. Наведена ефективна поглинальна здатність  $(\tau\alpha)_\Sigma$  залежить, як від властивостей ПЕ так і від виду і якості світлопрозорого покриття (дво-, тришарові скління, використання різної зовнішньої обробки та полімерних матеріалів). Загальний коефіцієнт теплових втрат визначається рівнянням [1]:

$$U_K = U_L + U_b \quad (2)$$

де:  $U_L$ -коефіцієнт теплових втрат колектора через світлопрозоре покриття, Вт/м<sup>2</sup>К;

$U_b$  – коефіцієнт теплових втрат колектора через теплоізований корпус, Вт/м<sup>2</sup> К

Зменшення  $U_b$  досягається простим збільшенням товщини ізоляції. Що стосується  $U_L$ , то для повітряних КСЕ це завдання куди більш складне ніж для

рідин них, тому що простір між склінням і ПЕ, в той же час, є каналом для проходу повітря і його не можна вакуумувати, але рішення знайдено в багатошарових скліннях, покриттях КСЕ вакуумними склопакетами.

Отже, світлопрозоре покриття повинно мати пропускну здатність не менше 85% в діапазоні хвиль від 0,28 до 3 мкм і грати роль екрану теплового випромінювання в інфрачервоній області понад 3 мкм, що досягається різними селективними покриттями [7]. Для ефективної роботи КСЕ поглинаюча здатність абсорбера становить не менше 90%, а також він повинен мати високий коефіцієнт теплопровідності (від 200 Вт/м К) та розвинену шорстку поверхню для збільшення теплопередачі теплоносія.

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

По-перше, сонячні повітрянагрівачі повинні бути максимально легким з тим, щоб обладнання геліополів 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 та стійкості до впливу ультрафіолетового випромінювання світлопрозорого покриття. Шляхи розв'язання цього завдання відомі: заміна скла на склопакети, полікарбонати, плівки і т.д.[7].

Споширюючись теплові та конструктивні вимоги, звичайно, не можна забувати про ціну КСЕ, адже економічний ефект є не менш важливим, ніж енергетичний. Вартість сонячних повітрянагрівачів формується з вартості використаних у 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 поглинаючої здатності. Два ці моменти і призводять до тієї

варто ці сонячних колекторів, яку ми маємо на даний момент. Сама собою з'являється необхідність пошуку та використання неметалічних матеріалів для ПЕ з природною селективністю, заміна скла на полімерні матеріали та виготовлення полімерних корпусів для КСЕ.

Враховуючи необхідних теплових характеристиках елементів КСЕ, і враховуючи особливості використання геліосистем в існуючих спорудах можна висувати ряд вимог до конструкцій колекторів.

По-перше, сонячні повітрянагрівачі повинні бути максимально легкими з тим, щоб обладнання геліополів на дахах не вимагало додаткових опорних конструкцій. Також зменшення маси КСЕ спрощує, а відповідно і здешевлює монтажні роботи. Проблема вирішується відмовою від металевих елементів, надаючи перевагу різним полімерним і композитним матеріалам при конструюванні колекторів сонячної енергії. По-друге, стандартною вимогою є підвищення міцності та стійкості до впливу ультрафіолетового випромінювання світлопрозорого покриття. Шляхи розв'язання цього завдання відомі: заміна скла на склопакети, полікарбонати, плівки і т.д.[7].

Спознаючи теплові та конструктивні вимоги, звичайно, не можна забувати про ціну КСЕ, адже економічний ефект є не менш важливим, ніж енергетичний. Вартість сонячних повітрянагрівачів формується з вартості використаних у 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 підвищення поглинаючої здатності. Два ці моменти і призводять до тієї вартості сонячних колекторів, яку ми маємо на даний момент. Сама собою з'являється необхідність пошуку та використання неметалічних матеріалів для ПЕ з природною селективністю, заміна скла на полімерні матеріали та виготовлення полімерних корпусів для КСЕ.

Геліосистеми повітряного теплопостачання принципово можна поділити на активні та пасивні. У пасивних системах рух повітря обумовлено гравітаційними силами без участі нагнітачів, як правило, вони засновані на принципі

стіни Тромба-Мішел [4]. Для ефективної роботи пасивні повітряні геліосистеми необхідно інтегрувати в будівельні конструкції будівель на стадії проектування, враховуючи розташування будівель щодо сторін світла, що виключає їх використання на існуючих об'єктах, які в першу чергу потребують зниження енергоспоживання. При аналізі літератури та патентних документів визначено, що запропоновані активні геліосистеми повітряного теплопостачання мало відрізняються та принципово відповідають схемі на рис.2.

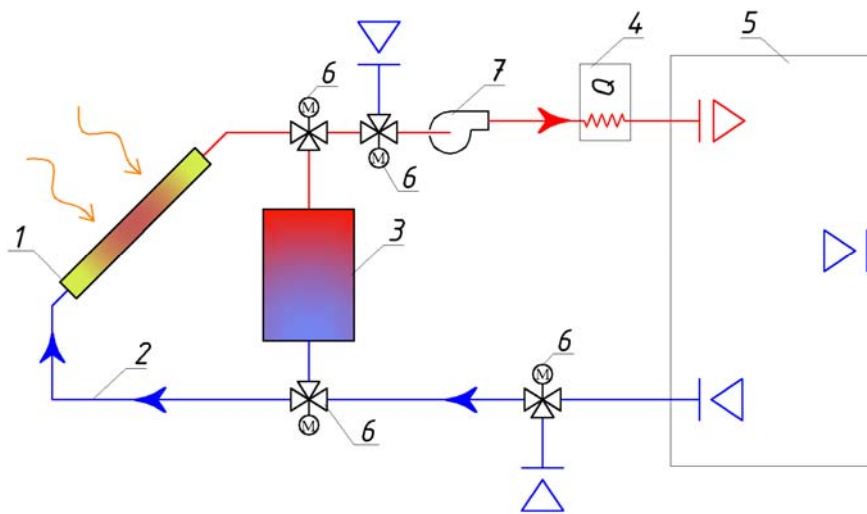


Рис.1 .Схема активної повітряної геліосистеми: 1-колектор сонячної енергії; 2-повітряний трубопровід; 3-акумулятор теплоти; 4-дублююче джерело теплоти; 5-об'єкт теплопостачання; 6-регулююча арматура; 7-вентилятор.

Такі системи працюють в такий спосіб. Повітря, нагріте в КСЕ шляхом перетворення сонячної енергії на теплову, нагнітається вентилятором до об'єкта теплопостачання. Потім з підмішуванням свіжого повітря потрапляє обернено в повітрянагрівач. Якщо інтенсивність сонячного випромінювання надто велика і повітря перегрівається, то теплоносій спрямовується в тепловий акумулятор, заряджаючи його. При недогріві повітря до розрахункових температур він пропускається через акумулятор, тим самим розряджаючи його, якщо ж і в цьому випадку тепла не вистачає включається дублююче джерело тепло ти.

По-справ жньому ефективно в кліматичних умовах сучасної України подібні системи можуть працювати тільки в перехідні сезони (весна-осінь) оскільки взимові місяці денний прихід сонячної енергії занадто малий і все навантаже ня лягає на дублююче джерело, а в літні й час попит на теплову енергію для о палення відсутній. Тому використання геліосистем повітряного теплопостача ня вимагає індивідуального підходу та точкових впроваджень. Це означає, щ необхідно знаходити відповідні об'єкти теплопостачання, прикладом таког ооб'єкта може послужити невеликі птахівницькі комбінати. У пташниках для п ташенят (брудер-хаузи) і молодняку температура повітря необхідна в межах від  $21^{\circ}\text{C}$  до  $36^{\circ}\text{C}$ , в залежності від віку птиці, так само в них потрібно досит ьвеликий повітрообмін (в літку до  $20\text{ м}^3 / \text{год}$  на кг живої ваги), тобто для т жих приміщень характерна необхідна. Влітку ж коли температура зовнішньог оповітря відповідає температурі внутрішньої, гаряче повітря можна подати в барабанні сушарки посліду, які зараз повсюдно влаштовуют ься на птиці-фабри ках. Це один із прикладів можливості ефективно використовувати повіт рні геліосистеми.

### **3. СОНЯЧ НИЙ КОЛЕКТОР З АБСОР БЕРОМ З ТРИКОТАЖНОГО ВУГЛЕ ГРАФІТОВОГО ПОЛОТНА**

#### **3.1. Абсор бери сонячних повітряних колекторів**

Соняч ні теплові колектори за видом теплоносія поділяються на рідинні та по вітряні. В рідинних колекторах в якості теплоносія виступає рідина (вода, пропи лєнгликоль), яка має ряд недоліків, таких як: проблеми з фазовим переходом(з мерзання, скипання), якість мер жної води, проблеми пов'язані з герметичні стю трубопроводів, складність монтажних робіт, необхідність теплообмінни хпристроїв. Ці та інші фактори стримують використання рідинних сонячни хколекторів в рамках гарячого водопостачання та унеможливають їх засто сування для теплопостачання приміщень. Для потреб опалення більше підхо дять сонячні колектори, де теплоносієм є повітря. Повітря позбавлене

пробл є скипання чи замерзання, менше негараздів викликають і витoki повітря у порівнянні з рідинними, їх конструкція та монтажні роботи досить прості, а менша ніж у рідин теплоємність частково компенсується прямим нагрівом с фєдовища приміщення в колекторах со ячної енергії.

Систе ми сонячного повітряного теплопостачання бувають пасивні та актив нї. Пасивні системи можливо застосовувати лише на нових спорудах, що знахо дяться ще в стадії проектування, тому в даній статті будуть розглядатися лише юлектори для активних систем.

До кол єкторів теплової енергії, що використовуються в геліосистемах повіт ряного теплопостачання можна окреслити ряд необхідних вимог. По-перше, чєрез невисоку теплову ефективність даних систем, вартість таких колекторі вмає бути якомога нижчої для задовільної ре ябельності. По-друге геліопр ймачі мають бути достатньо ефективними з тим, щоб зібране з них геліопо є не займало великої площі. По-третє ,установка колекторів повинна супрово джуватися мінімальними змінами в існуючій номенклатурі будівельних конст рукцій ,що використовуються при проектуванні нових будівель і тим бїльше при реконструкції систем опалення та вентиляції вже існуючих та експлуат єваних споруд. І на кінець, вони повинні характеризуватися достатньою надій ністю, високою ремонтпридатністю і просто тю в експлуатації.

Тепло в колектори сонячної енергії можна поділити на три основних групи :плоскі, вакуумні та фокусуючі сонячне випромінєння. В ситемах повітряно ю теплопостачання в бїльшості використовуються плоскі колектори, тому цю вони найбільш задовольняють висунуті вище вимоги. Звісно, в літератур іописано використання різних типів колекторів для таких систем, але практ яного застосування вони не мають.

Всі п лєскі колектори сонячної енергії, що використовуються в низько-темпе ратурних геліосистемах повітряного теплопостачання, можна поділити на дв аосновних типи. До першого типу належать колектори, поглинаючі елементи яких мають плоску, хвилясту, ребристу і т.д. єометричну форму, а рух повіт ря через колектор організовано над, під чи з обох сторін цього елемента.

При цьому в останньому випадку повітря може рухатися над поглинаючим елементом і під ним в одному чи протилежних напрямках одночасно чи послідовно – спочатку над, а потім під ним чи навпаки. Такі типи колекторів являються контактними (на ринку представлені: Gramm & Jumbo Solar [Німеччина], SOLE S.A. AIRSO L[Греція]). Варіанти виконання колектора сонячної енергії по способу руху повітря і з різноманітною формою поглинаючого елемента вказано на рис.1 і рис.2.

Рис.1 .Варіанти виконання колекторів контактного типу по способу руху повітря

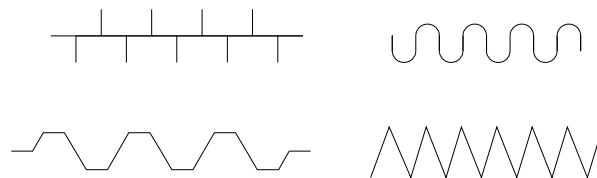


Рис.2 .Поглиняючі елементи колекторів контактного типу

Другий тип повітряних геліоколекторів, в яких рух повітря організовано через пористу структуру поглинаючого елемента прийнято називати колекторами матричного типу (на ринку представлені: Solar Venti SV [Данія], Enerco Expert LubaG L[Канада]). В якості поглинаючого елемента можуть використовуватися різного роду насадки, пористі матеріали, металева сітка, стружка, пакети сотових структур, кераміка, скловолокно.

Повітряні колектори матричного типу ефективніші за контактні внаслідок більшої площі поглинаючого елемента, що контактує з теплоносієм, та більш інтенсивного процесу теплообміну.

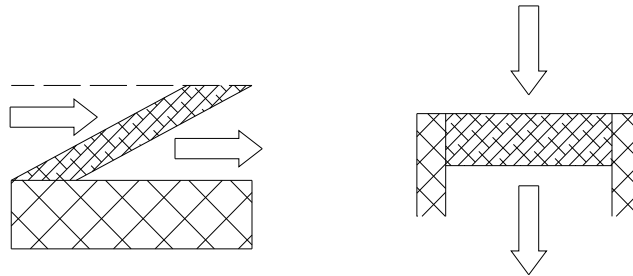
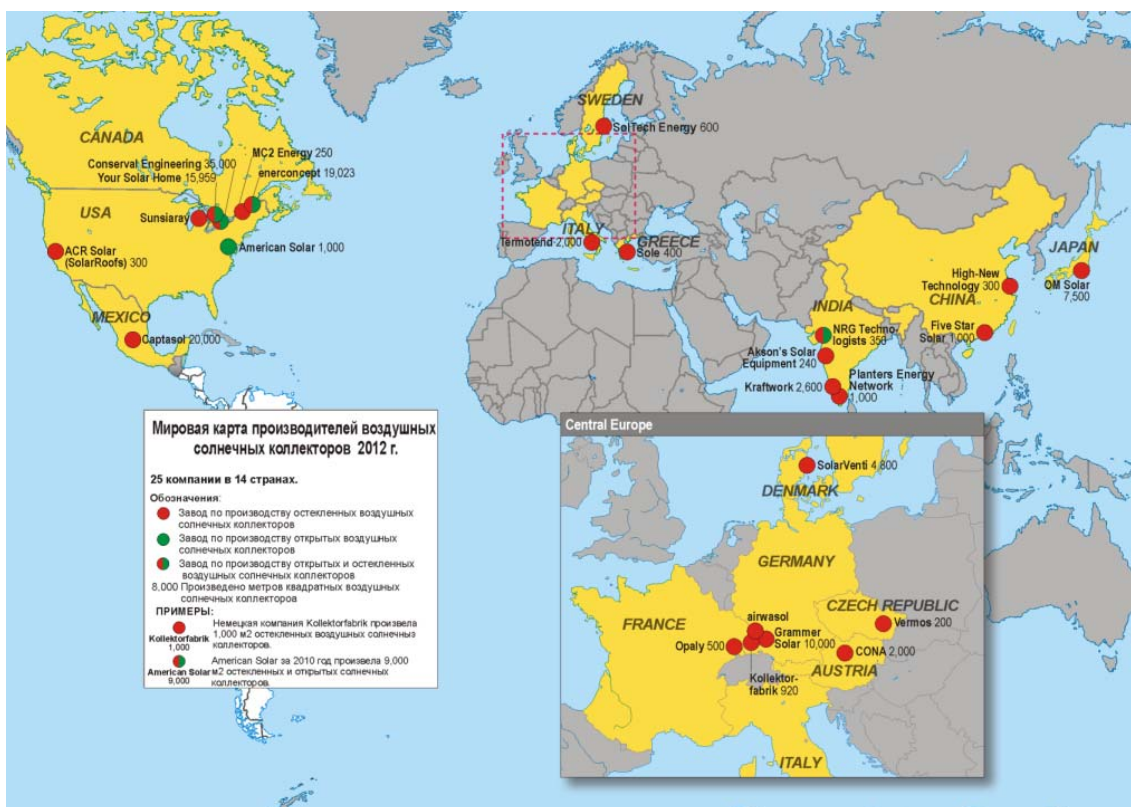


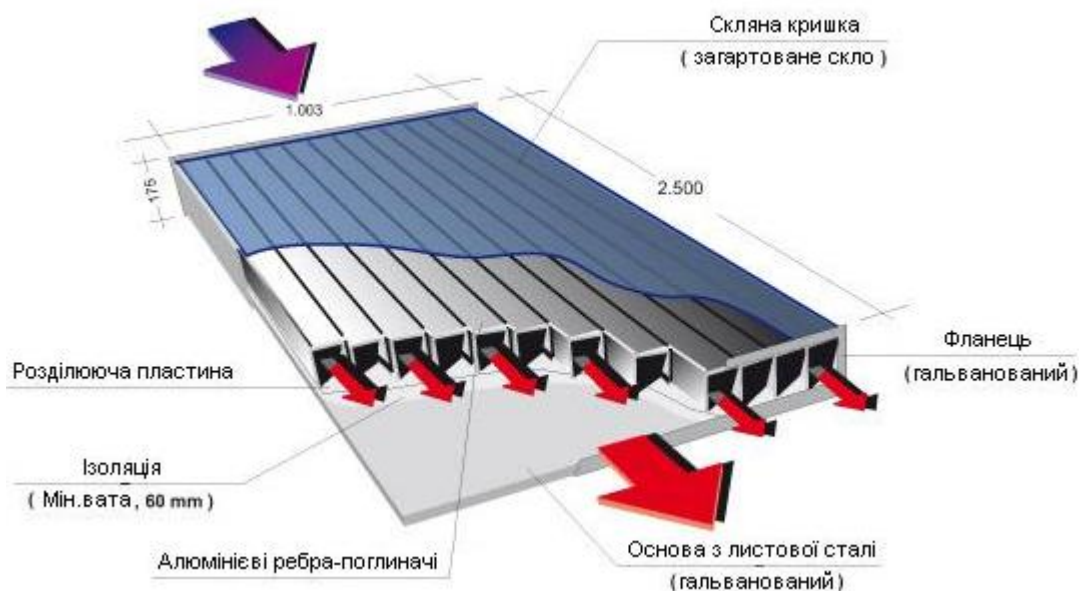
Рис.3 Повітряні колектори матричного типу

На даний час на європейському ринку сонячних колекторів кількість саме повітряних не перевищує 5% від загальної маси. В свою чергу в країнах Північної Америки їх доля складає близько 30-35%, але більшість з них це колектори для пасивних систем теплопостачання чи різного роду сонячних сушарок. На рис.4 представлено мапу світових виробників повітряних сонячних колекторів по даним шостого огляду сонячної теплової індустрії Міжнародного агентства по дослідженню ринку і промисловості в сфері сонячної теплової енергії «SOLRI CO».



**Рис.4.** Світо ~~в~~ мапа виробників повітряних геліоколекторів 2012 р.

В сучасних повітряних геліоприймачах фабричного виробництва досить ~~важ~~кожна конструкція та принцип дії. В якості абсорберів здебільшого використовують метали (алюміній, мідь, сталь) із селективними покриттями або спеціальний порошок. Каркас виготовляють з легких металів або їх сплавів, таких як алюміній, дюраль і т.п. В якості світлопроникного покриття застосовують загартоване скло з низьким вмістом металів або спеціальні полікарбонати. Для теплової ізоляції геліоколекторів використовують класичні теплоізолюючі матеріали: мінеральна вата, пінополістирол, порошок тощо.



**Рис.5** Загальний вигляд сучасного повітряного сонячного колектора на прикладі колектора *Gramm & Jumbo Solar*

Основними недоліками сучасних повітряних геліоколекторів є їх вартість, що значно вища ніж для традиційних джерел тепла, і навіть деяких нетрадиційних. Також серйозним недоліком являється масивність та вага колекторів, що вимагає спорудження силових конструкцій під геліополя, що часто уможливорює монтаж на дахах вже існуючих споруд. В таблиці 1 показані характеристики деяких повітряних сонячних колекторів, що виробляються європейськими брендами геліотехніки.

Таблиця 1

Виробник	Модель	Установлена потужність *, Вт	Габаритний розмір мм	Площа поглиняючої поверхні м <sup>2</sup>	Вага, кг	Матеріал абсорбера	Ціна* , €	Примітка
Gramm e Solar, Німеччина	Jumbosolar	1675	2500×1003×175	2,26	80	Алюміній	700	
Solar Venti, Данія	SV30	2000	3000×1020×72	2,98	29,1	Повість	1250	+ сонячна батарея
SOLE SA, Греція	AIRSO B5	2700	2833×1285×140	3,40	40	Алюміній	1100	
Termo End, Італія	Termo Flow	1400	2000×1000×95	1,82	19,5	Сталь	520	

\*потужність приведена для інсоляції 1000 Вт/м<sup>2</sup>

\*ціни вказані приблизні із прайс-листі постачальників

Ці недоліки зумовлені матеріалами з яких виготовляють колектори (кольорова та чорні метали, селективні покриття, скло і т.д.) Тому безсумнівно перспективним напрямком розвитку повітряних геліосистем є пошук нових матеріалів для виготовлення колекторів. Зважаючи на проблеми в теплоенергетиці України 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. Повітряні ж геліосистеми можуть стати гарним початком у глобальному впровадженню сонячних систем через свою надійність, непримхливість, вартість, простоту експлуатації та довговічність.

### 3.2. Абсорбер з вуглеграфітового трикотажного полотна

Для використання запропонованої схеми теплопостачання необхідно розробити відповідний сонячно-електричний повітропідігрівач. Для того щоб підігріти абсорбер КСЕ електростумом його матеріал з якого він виготовлений повинен бути електропровідним, але мати достатній електричний опір. Теплова потужність визначається із закону Джоуля-Ленца[26]

$$Q = i^2 R t, \quad (\text{Ошибк в Текст указанного стиля в докум ете отсутствует..1})$$

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 рідкими 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 висувуються вимоги як до сонячних теплових колекторів та електронагрівачів. По-перше, високуючи здатність сонячного випромінювання, на рівні  $A_s \geq 0,9$ [33,34-35], це забезпечується властивостями поверхні світлопоглинання, тобто природної селективності. По-друге, мати розвинену поверхню теплообміну з тим, щоб інтенсифікувати теплообмін між абсорбером і омиваючим його повітрям [27,29]. По-третє, володіти відповідними фізичними властивостями: мала вага, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, термостійкість, а також мати низьку вартість для більшої ліквідності геліосистеми [30]. Як для електронагрівача має бути достатній питомий електричний опір та спостерігатися стійкість до впливу електричного струму [28].

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» [30,31] (Рис. 3.14). Використання вуглеграфітових волокон, карбонізованих і графітізованих тканин та вуглецевого паперу у якості електропідігрівачів відоме [35], 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.

Технічні 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.

**Таблиця 2.1. Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..2**

Технічні характеристики вуглеграфітового трикотажного полотна

№ п/п	Характеристика	Розмірність	Значення
1	Поверхня щільність (вага 1 м <sup>2</sup> )	кг/м <sup>2</sup>	1597
2	Питомий поверхневий електричний опір	Ом	0,4·10 <sup>6</sup>

3	Повіт $\rho$ проникність	Дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> с)	90(72-108)
4	Вогне стійкість	сек	(вогн стійка)
5	Товщи на полот на	мм	3-4
6	Вміст вуглецю	%	98,5
7	Вміст золи	%	1,5
8	Серед ня теплопровідність волокна	Вт/(м К)	287
9	Тепло ємність волокна	кДж/(кг К)	0,72
10	Темпе ратуропровідність волокна	м <sup>2</sup> /с	0,181
11	Водоп єливання	%	132,6
12	Залиш юва деформація по довжині	%	4
13	Залиш юва деформація по ширині	%	7
14	Кільк ість петельних (на 10 см)	шт.	56
	- рядкі в - стовп чків		54
15	Розтя жість при навантаженнях, що ме ше розривних	%	
	- по до вжині - по ши рині		19 66
16	Кисло тстійкість (зменшення роз- ривал юго наван тження) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 50%	%	2,4



Активация Windr

1



2

Рис. 3.14. Загальний вид вуглеграфітового трикотажного полотна: 1- досліджуване ВТП, що вироблене ІІМ НАНУ ім.Францевича; 2- тканина марки УРАЛ-ТР (ГОСТ 28005-88) виробництва ОАО «СветлогорскХимволокно» (г.Светлогорск, Республіка Білорусь).

Таблиця 3.3

Порівняльна характеристика ВТП і традиційних для геліотехніки металів

Назва характеристики	Алюміній	Мідь	Сталь	Вуглеграфітове юотно 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 <sup>3</sup>	2675	8795	7850	2200
Температуропровідність, м <sup>2</sup> /с	0,085	0,114	0,008	0,181
Електричний опір, Ом·м·10 <sup>4</sup>	0,0271	0,0175	0,14	0,4
Необхідність сективного покриття	Так	Так	Так	Ні

Згідно [36, 37, 39] підвищення ефективності сонячних теплових колекторів пов'язано з інтенсивністю відведення тепла (теплозйому) від поверхні абсорбера і світлопрозорого покриття, а також від внутрішньої поверхні теплоізоляції колектору.

Один із шляхів підвищення теплопродуктивності сонячних повітропідігрівачів - це оброблення і гофрування поверхні абсорберів. Дякуючи збільшенню

поверхні теплообміну абсорбера досягається підвищення коефіцієнту тепло-  
віддачі  $\alpha_{абс}$  поверхні поглинаючого елемента, віднесеного до фронтальної по-  
верхні укладення. Так, при V-подібному гофруванню (Рис. 3.15) поверхні абсо-  
рбера сонячного повітрянагрівача термічна ефективність (або ККД)  $\eta_{ксп}$  і при-  
ведений коефіцієнт тепловтрат  $U_L$  розраховуються з врахуванням [30]

$$\alpha_{абс.гоф} = \frac{\alpha_{абс.пр}}{\sin \frac{\gamma}{2}}$$

де:  $\alpha_{абс.пр}$  - коефіцієнт тепловіддачі прямо вкладеного абсорбера, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\alpha_{абс.гоф}$  - коефіцієнт тепловіддачі гофровано вкладеного абсорбера, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\gamma$  - кут розкриття гофру, °.

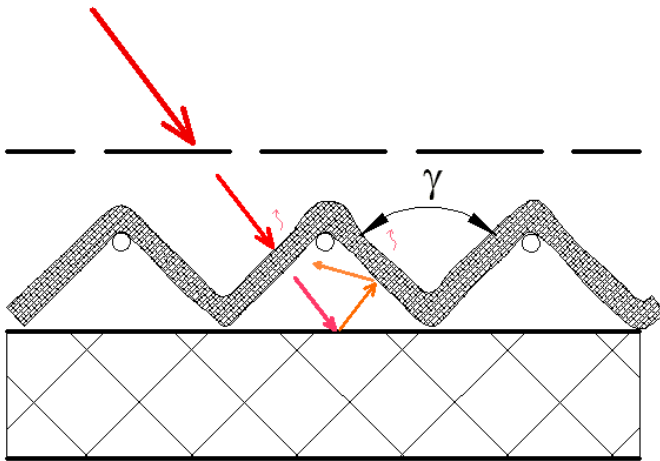


Рис. 3.15. Гофрована укладка ВТП в сонячному повітрянонагрівачі

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  $\eta_{ксп}$ .

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 світлопрозоного 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 [37].

Результати досліджень [38] 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  $\epsilon_p = 0,05$  то гофрування з кутом розкриття  $55^\circ$  дає середню ефективність поглинання 90% і довгохвильове 10%.

Необхідно відмітити також, що надмірне зменшення кута розкриття гофрування з метою збільшення поверхні теплообміну абсорбера призводить до негативних результатів. Згідно [40] існує оптимальна відстань між стінками гофрування, нижче якої значно зменшиться значення коефіцієнту тепловіддачі від абсорбера до оповитого його повітря і значно збільшиться аеродинамічний опір. Використання ВТП звісно виключає можливість оребрення поверхні абсорбера.

### **3.3. Удосконалена фізична модель теплообмінних процесів в повітрі підігрівачу**

В результаті патентних та літературних досліджень було розроблено принципову конструкцію КСЕ [27], яка аналогічна традиційним плоским сонячним колекторам. Вона являє собою дерев'яний ящик розміром  $1250 \times 50 \times 100$  з торцевими отворами по стороні  $550$  розміром  $300 \times 20$  для підведення та відведення повітря. На дно ящика укладено теплоізолюючий матеріал товщиною  $80$  мм, на яку вкладено світловідбиваючу плівку. Бокові борта ящика теплоізолювані товщиною  $20$  мм. На ізоляції дна укладено світловідбиваюче покриття товщиною  $0,1$  мм. На світловідбиваюче покриття укладено ВТП, як описане в розділі 2.1, в бокові краї якого полотна вживлено мідні провідники. Ящик накрито світлопрозорим покриттям (віконним склом товщиною  $5$  мм). Герметизація стику скла і ящика здійснена за допомогою гумового

у щіль новача та силіконового гелю. В торцеві сторо ни ящика в отвори вмонтован оадаптери для переходу на пластиковий повітровід 200x60.

Принц ипова конструкція повітропідігрівача захищена патентом на ко рисну модель [29].

Принц ии роботи КСЕ полягає в наступному. Сонячні промені, що прохо дять через світлопрозоре покриття 1, потрапляють на абсорбер 3, частково прони яючи на світловідбиваюче покриття, від якого відбиваючись погли наєть ся все тим же абсорбером 3. Капілярно пориста ст руктура та нерівності уклад ии ВТП сприяють підвищенню поглинаючої здатності абсорбера, забез печую чи , так звану, природну селективність.

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

Повіт ря, що пропускається через КСЕ, контактує з ВТП, омиваючи його та пр оходячи наскрізь, та нагрівається. Для представлення процесів теплооб міну, що відбуваються у комбінованому сонячно-елект ричному по вітро підігрівачу, розроблена його фізична модель (Рис. 2.16). Аб орбер, нагрі тий з арахунок СЕ та ЕЕ, віддає теплоту шляхом вимушеної конвекції повітря, що ом иває вуглеграфітове трикотаже не полотно, а також шляхом теплового ви промі новання світлопрозорому покриттю зверху і світловідбиваючому пок риттю знизу. Теплові втрат иКСЕ відбуваються теплопровідністю через світ лопр о зрий матеріал, а потім конвекцією та випромінюванням до навколиш нього середовища, а також теплопровідністю через теплову ізоляцію та кор пус, а потім конвекцією та випромінюванням назовні

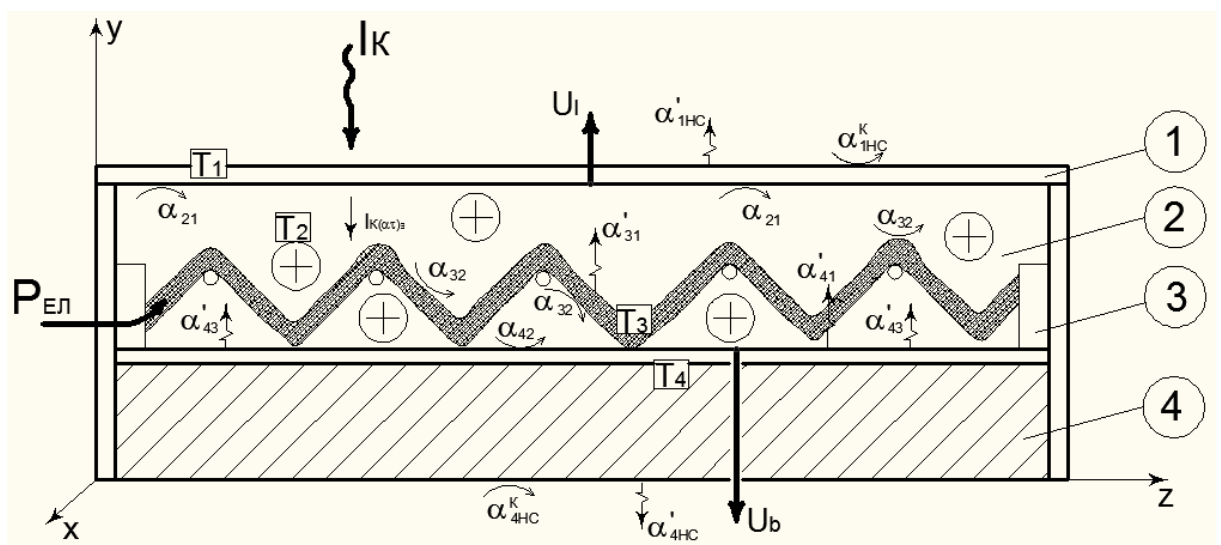


Рис. 2.16. Фізична модель теплообмінних процесів комбінованого сонячно-електричного повітропідігрівача: 1 - світлопрозоре покриття; 2 – повітря (напрямок руху якого перпендикулярний площині зображення); 3 – абсорбер з ВТП; 4 – теплоізоляція повітропідігрівача

### 3.4. Теплові характеристики сонячного повітропідігрівача

Під час теоретичного дослідження КСЕ 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 КСЕ можна представляти як ККД сонячного теплового колектора.

Миттєві значення ККД повітронагрівача визначають з відомого рівняння Хотелла-Уілліса-Блісса [23,25-29]

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

де:  $F'$  - коефіцієнт ефективності абсорбера;

$(\tau\alpha)_{\text{э}}$  – оптичний ККД сонячного повітропідігрівача;

$U_L$  – загальний коефіцієнт теплових втрат КСЕ, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$T_{\text{пов.}}$  – середня температура повітря в нагрівачі, К;

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

Також миттєвий ККД визначається з рівняння

$$\eta_K = F_R \cdot [(\tau\alpha)_{\text{э}} - U_L \cdot (T_{\text{п.к.}} - T_{\text{н.с.}}) / I_c],$$

де:  $F_R$  – коефіцієнт відводу теплоти із КСЕ;

$T_{\text{п.к.}}$  – температура повітря на вході у підігрівач, К;

$T_{\text{н.с.}}$  – температура навколишнього середовища, К.

З іншого боку ККД сонячного повітропідігрівача можна виразити так:

$$\eta_K = G \cdot c_p \cdot (T_{\text{к.к.}} - T_{\text{п.к.}}) / I_c, \quad (3.2)$$

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

Після певних математичних перетворень рівняння (2.35) набуде виду

$$\eta_k = \frac{G \cdot c_p}{U_L \left[ 1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot U_L}{G \cdot c_p}\right) \right] \times \left[ (\tau\alpha)_{\Xi} - U_L \cdot \left(\frac{T_{пов} - T_{н.с.}}{I_c}\right) \right]}$$

Коефіцієнт відводу теплоти із КСЕ  $F_R$  можна визначити із виразу

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

Розраховуючи теплові характеристики сонячного повітроподігрівача, важливо визначити оптимальні геометричні розміри його абсорбера (способу укладки трикошного полотна) і оптимальну витрату повітря. При цьому критеріями оптимальності є максимальна температура повітря після повітроподігрівача  $T_{п.к.}$  і його ККД  $\eta_k$ . На теплову ефективність сонячного теплового колектора впливають наступні параметри: витрата повітря; тип конструкції; поглинаюча здатність абсорбера; середнь-інтегральне значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і випромінюванням для елементів повітроподігрівача; температура навколишнього середовища; сумарна інтенсивність сонячного випромінювання на абсорбер і швидкість вітру; температура повітря на вході в повітроподігрівач 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 повітроподігрівачі з плоским абсорбером при  $10^4 \leq Re \leq 1,24 \cdot 10^5$  визначається з відомого рівняння Дітгаса-Болте [25]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,0199 \cdot Re^{0,8}$$

Для турбулентного режиму руху повітря в плоскому каналі тепловіддача до повітря визначається по формулі М.А. Міхеєва ( $Re \geq 10^5$ )[22]

$$Nu = 0,02 Re^{0,8} \cdot \varepsilon_l,$$

де:  $\varepsilon_l$  – 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 літератури

Рівняння, що описує конвективний теплообмін між текстильними матеріалами та омиваючим його повітрям, зустрічаються у посібнику Луцика Р.В. та Малкіна Е.С. [23]

$$Nu = 0,6 Re^{0,5} \cdot Pr^{0,43},$$

Хоча для рівняння 3,4 не наведено границі чисел Рейнольдса та тип текстильних матеріалів. В роботах 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 [31].

Після визначення числа Нусельта визначається коефіцієнт тепловіддачі з виразу [31]

$$Nu = \frac{\alpha_{абс} \cdot D_{екв}}{\lambda_{нов}},$$

де:  $\alpha_{абс}$  – усереднений коефіцієнт тепловіддачі від ВТП до омиваючого його повітря, (Вт/м<sup>2</sup>К);

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

Число Рейнольдса визначається наступним чином[32]

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{екв}}{\mu},$$

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

$\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – швидкість повітря у каналі, м/с;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Н·с/м<sup>2</sup>.

Середньо-інтегральна швидкість повітря у каналі складає

$$v = \frac{G}{F_0 \cdot 3600}.$$

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 [32, 33]:

$$D_{екв} = \frac{4 \cdot F_0 \cdot \psi \cdot L}{F},$$

де:  $F_0$  – площа перерізу каналу, м<sup>2</sup>;

$\psi$  – об'ємна доля пустот у каналі (пористість);

$L$  – довжина омивання, м;

Пористість каналу визначається з виразу [33]:

$$\psi = 1 - \frac{V_{тк}}{V},$$

де:  $V_{тк}$  – об'єм тканини в каналі (визначається способом Архімеда), м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм каналу без тканини, м<sup>3</sup>;

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  $T_{КК}$  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 КС.

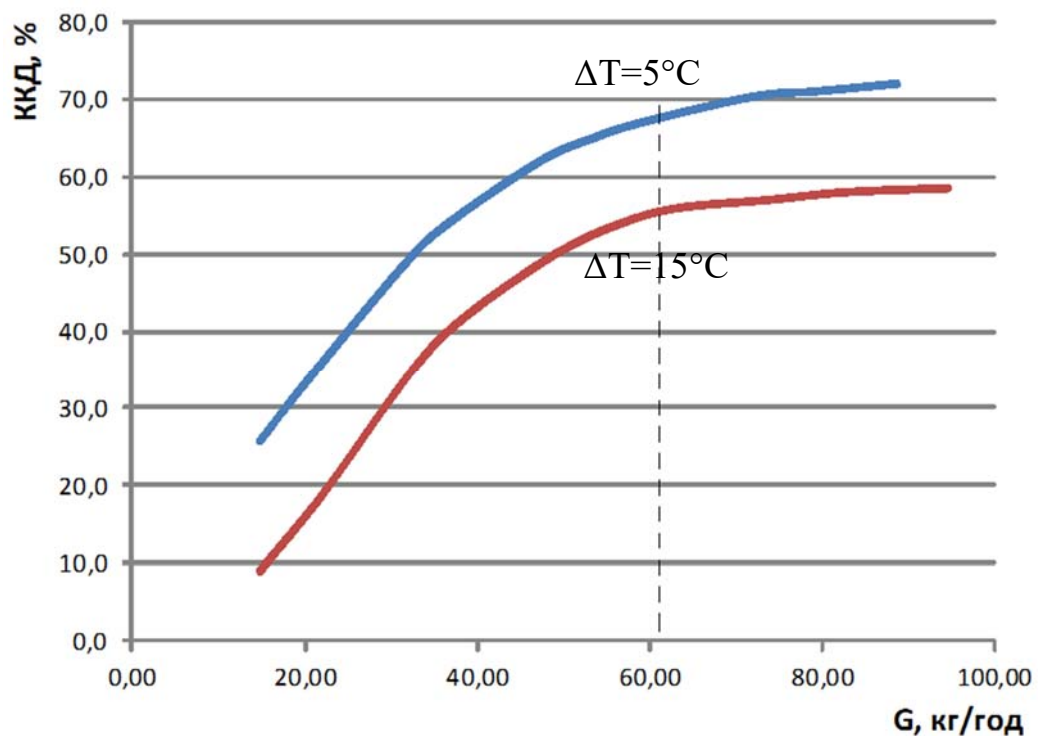


Рис. 3.17. Залежність ККД КСЕ від витрати повітря  $G$  при  $I_c=700 \text{ Вт/м}^2$ ;  $(\tau\alpha)_3=0,9$ ;  $F'=0,89$ ;  $U_L = 9,5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ .

Очевидно, що на ефективність повітропідігрівача впливають і інші параметри. Наприклад, зниження загальних теплових втрат КСЕ  $U_L$ , що складаються із втрат через світлопрозоре покриття, бокові стінки і теплову ізоляцію знизу підвищує ККД (Рис. 3.19). Теплові втрати колектора дуже сильно впливають на ефективність приладу і зміна їх числових значень створює необхідність повторення всіх обчислень для визначення теплових характеристик КСЕ. Коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням між елементами КСЕ залежать від їх фізичних властивостей (степені чорноти  $\epsilon$ ) 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 складатиметься близько 60 кг/год або 0,038 кг/(с м<sup>2</sup>). З Рис.2.5 видно, що при

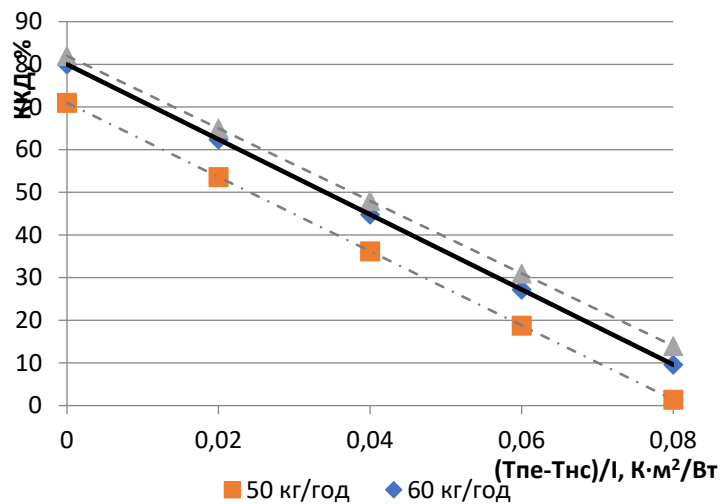


Рис. 3.18. Залежність ККД КСЕ від ступені прогріву теплоносія  $(T_{абс} - T_{нс})/I_c$ .

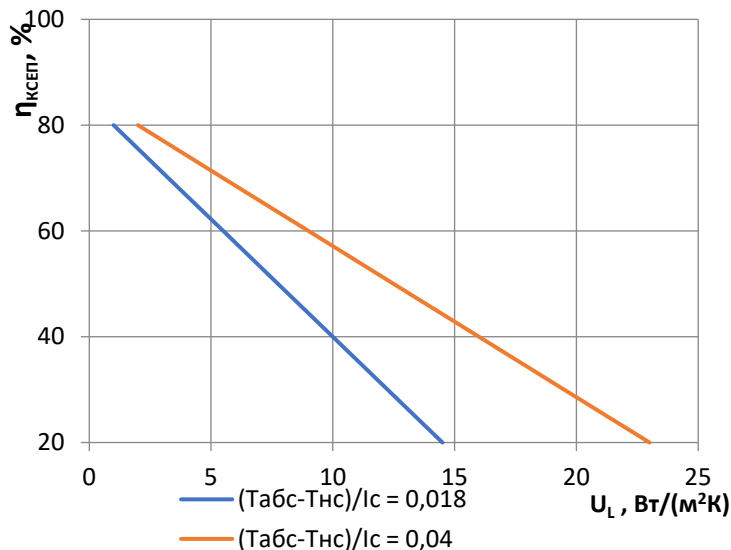


Рис. 3.19. Залежність ККД КСЕ від загального коефіцієнту теплових втрат повітря підігрівача при  $(\tau\alpha)_{\text{ж}}=0,9$ ;  $F'=0,89$ ;  $G=0,038$  кг/(с м<sup>2</sup>).

Збільшенні витрати через КСЕ стрімко зростає і його ККД, а після зазначеного означення витрати ріст ККД майже не відбувається, натомість температура в повітропідігрівачем знижується, а, як видно з Рис. 3.18, при зменшенні прогріву повітря зменшиться і ККД.

Звідю, що інтенсифікація теплообміну між абсорбером з вуглеграфітового рикотажного полотна та омиваючим його повітрям, тобто збільшення коефіцієнту тепловіддачі призводить до збільшення ККД повітропідігрівача,

так ж е як збільшення коефіцієнту відводу теплоти від абсорбера – сусіж юї велич ини.

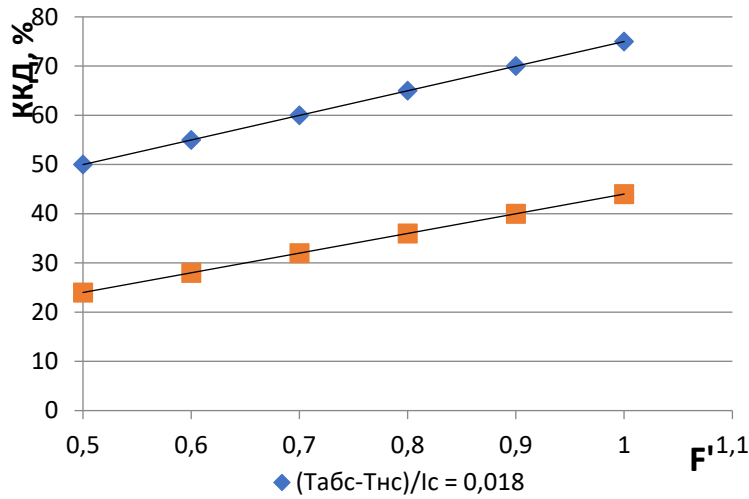


Рис. 3.20. Залеж ність ККД КСЕ від коефіцієнту відводу теплоти повітро- підіг рівача при  $(\tau\alpha)_3 = 0,9$  ;  $G = 0,038$  кг/(с м<sup>2</sup>).

Значе ння величин, що використовувались для розрахунку основних теп- лових характеристик комбінованого сонячно-елект ричного повітропідігрівача приве дено в табл.2.3.

Серед ній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією розраховувався з рівняння 5. В с юю чергу критерій Нусельта визначався з рівняння 29, хоч авсі вище згада ні рівняння теоретично підходять для визначення числа Нусельта, але, як видно з потребують експериментального уточнення. Теплові втрати КСЕ визна чалися з врахуванням омивання його вітром зі швидкістю 2 м/с. Через те, що по вітряні соняч ні колектори працюють , в основному, в діапазоні зміни  $(T_{абс} - T_{нс}) / I_c$  від 0 018 та 0,04, розрахунки проводилися для вказаних значе нь.

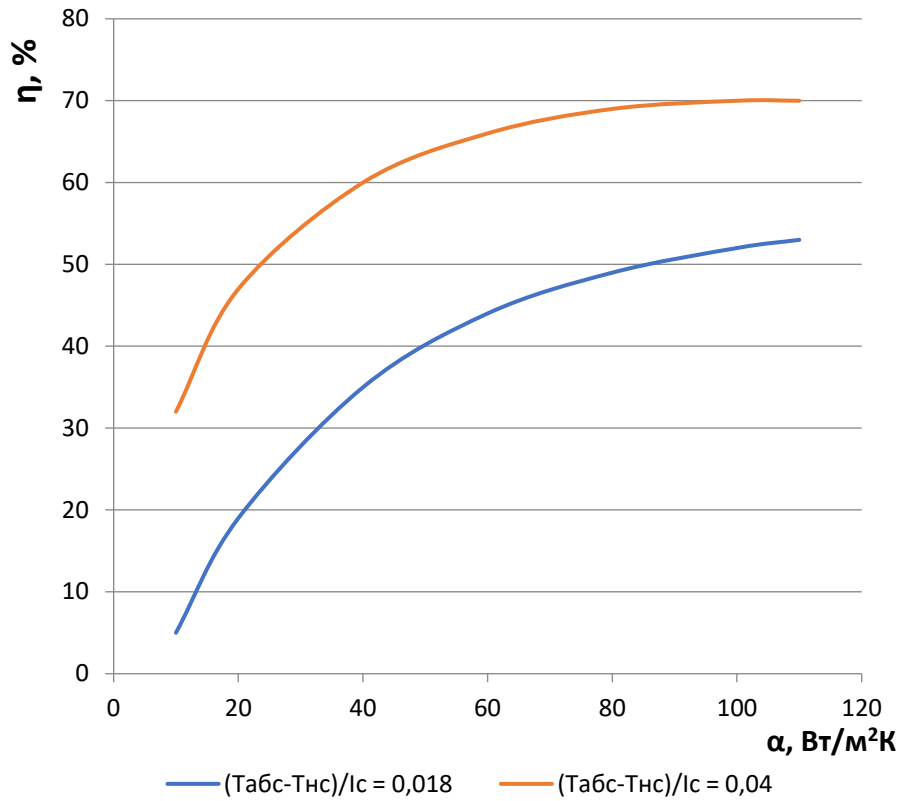


Рис. 3.21. Залежність ККД КСЕП від коефіцієнту тепловіддачі від абсорбера до омиваючого його повітря

Таблиця 3.4

Значення величин, що використовуються для визначення основних теплових характеристик КСЕП

Позначення величин	$\alpha$	$U_L$	$G$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha'_3$	$\alpha'_4$	$c_3$	$(\tau\alpha)_\Xi$
Розмірність	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{кг}{год}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	
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	-	-

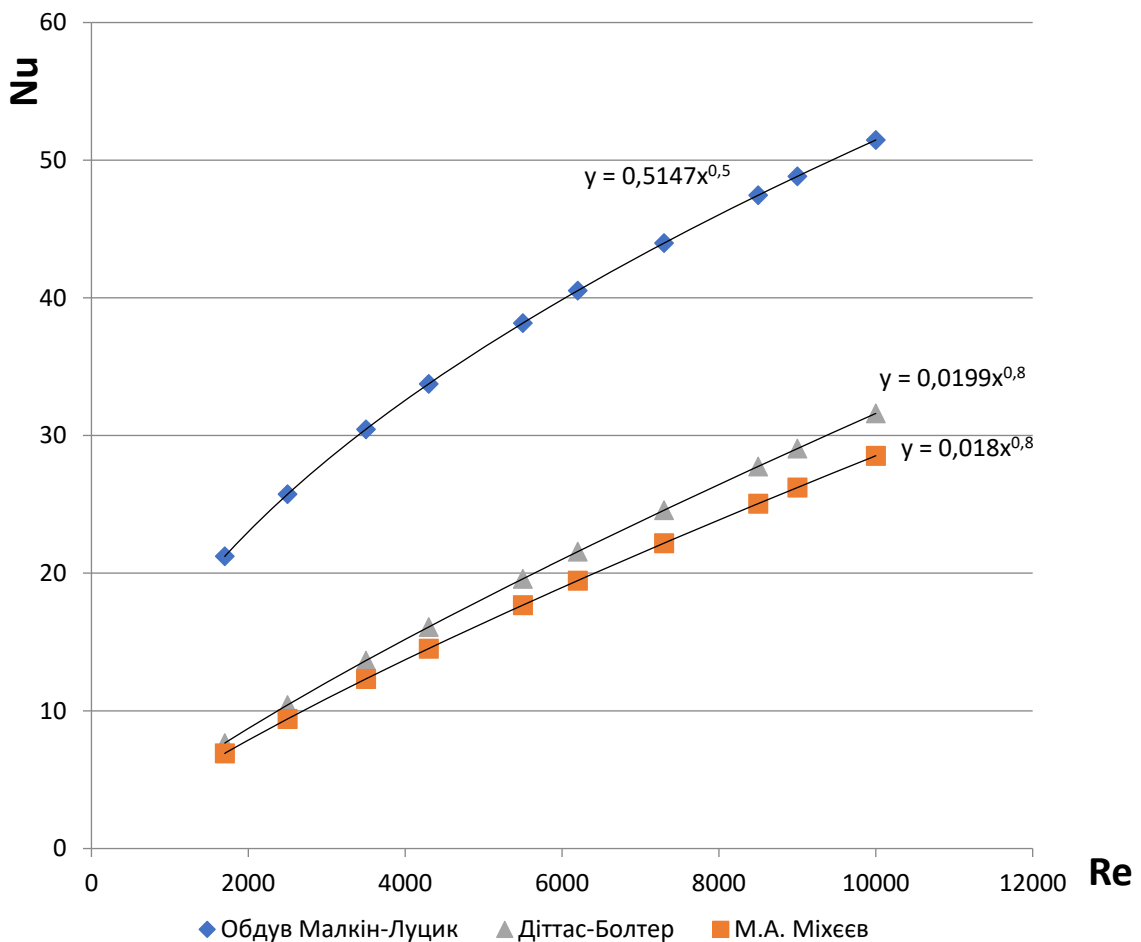


Рис. 3.22. Теоретичні залежності  $Nu = f(Re)$  для плоскої поверхні та текстильних матеріалів.

Необхідно порівняти отримані залежності КСЕП з абсорбером із вуглеграфітного полотна з характеристиками існуючих конструкцій. В [35] наведено результати теоретичного дослідження трьох видів повітряних колекторів сонячної енергії з одинарним склінням. Поглинаючим елементом у дослідженні 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  $K=(T_{абс}-T_{нс})/L_c$  представлено на Рис. 3.23. Результати отримані при однакових вихідних даних. Як видно з графіка, КСЕП ефективніший колекторів з абсорбером із плоскої пластини з проходженням повітря над та під пластинною і фактично однаковий з П3, де повітря проходить з обох сторін пластини.

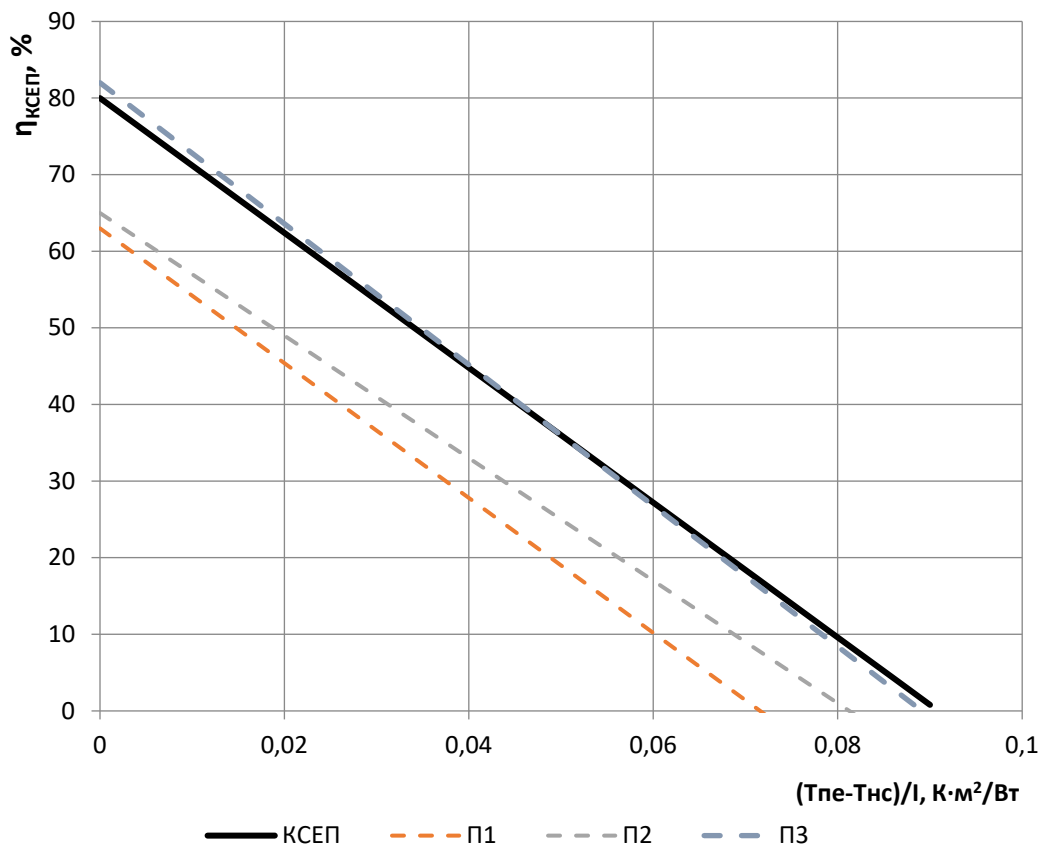


Рис. 3.23. Залежність ККД від степеню прогріву для відомих контактних повітропідігрівачів та КСЕП

### 3.5. Аеродинамічні характеристики повітропідігрівача з абсорбтором 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 теплообінних процесів.

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 [20] загальні втрати тиску на ділянці

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

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

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

$\chi$  – коефіцієнт гідравлічного тертя (в літературі позначається, як  $\lambda_m$  – вітчизняна або  $f$  – англійська);

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

$\xi$  – коефіцієнт місцевого опору;

$\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – 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 вуглеграфітного трикотажного полотна (Рис. 3.24).

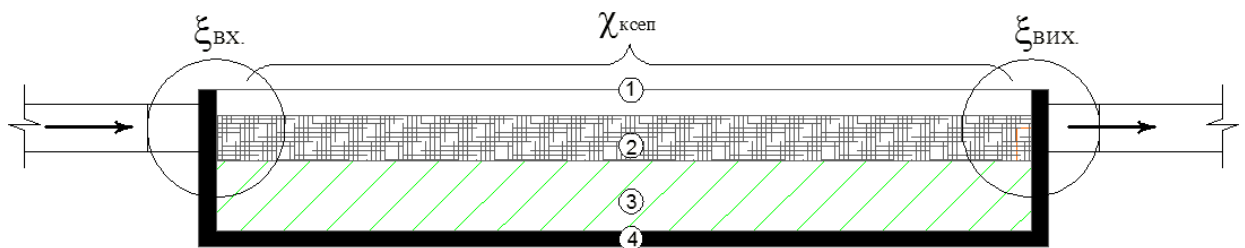


Рис. 3.24. Аеродинамічна схема КСЕП

Значення коефіцієнтів місцевих опорів  $\xi$  для інженерних розрахунків зібрані у відомих вентиляційних довідниках. Для деяких матеріалів також відомий коефіцієнт гідравлічного тертя  $\chi$  (цеглині канали, пластикові та металеві повітропроводи і т.і.). Для каналу з укладеним в ньому ВТП значення  $\chi$  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

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

де:  $Re$  – критерій Рейнольдса;

$K_E$  – еквівалентна шорсткість.

Рядом дослідників запропоновані узагальнюючі залежності для визначення  $\chi$ .

Широко розповсюдженню набула формула, що розроблена А.Д. Альтшулем

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

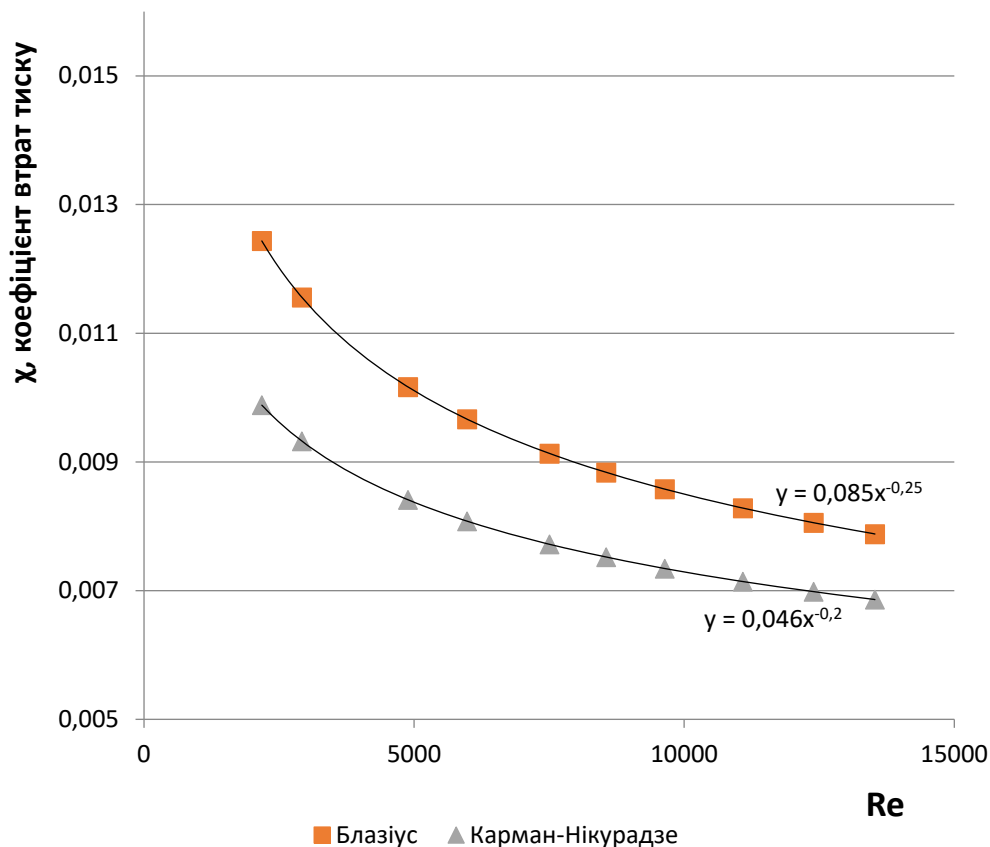


Рис. 3.25. Залежність  $\chi=f(Re)$  для гладких каналів.

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

падок, 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  $\chi$  в гладких каналах при  $4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$  застосовують модифіковане рівняння Блазіуса

$$\chi = 0,05 \cdot Re^{-0,2},$$

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

$$\chi = 0,046 \cdot Re^{-0,25},$$

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

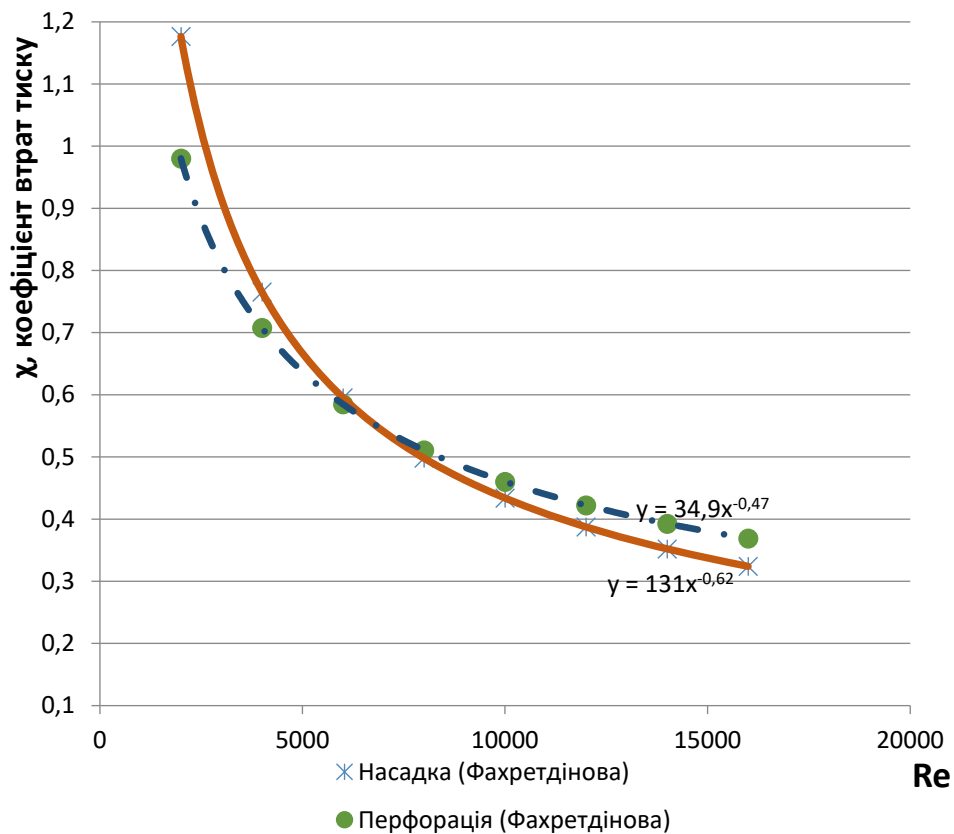


Рис. 3.26. Залежність  $\chi=f(Re)$  для каналів з насадками та ребрами.

$$\chi = 131 Re^{-0.62},$$

$$\chi = 34,9 \cdot Re^{-0.47}.$$

Як видно з згаданих залежностей мають дуже погану збіжність, що спонукає до експериментального визначення критеріальних залежностей для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя при продуванні повітря через плоский канал, що утворений гладкими поверхнями світлополюсного та світловідбиваючого покриттів і вуглеграфітового трикотажного полотна, що укладене в каналі.

#### **4. Вплив вітру на ефективність роботи КСЕС і розрахунок вітрогенератора**

Головною причиною низької адаптованості геліосистем теплопостачання в реальній енергозатратній 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.).

Головною причиною низької адаптованості геліосистем теплопостачання в реальній енергозатратній 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 [13, 24, 25, 31], 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 півітропідігрівачів з абсорбером із електропровідної вуглеграфітової тканини [39] 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  $F_R$  [31, 33]

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

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

$c_p$  - питоме теплоємність теплоносія, кДж/(кг·К);

$U_L$  - повний коефіцієнт тепловтрат сонячного колектора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F'$  - коефіцієнт ефективності поглинача сонячної енергії.

Повний коефіцієнт теплових втрат геліоколектору рівний [21]:

$$U_L = U_l + U_b,$$

де  $U_l$  - коефіцієнт тепловтрат через світлопрозоре покриття колектора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$U_b$  - коефіцієнт тепловтрат через дно і бокові стінки колектору, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

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

де  $\alpha_{A-C}^K$  - коефіцієнт теплопередачі конвекцією від абсорбера до світлопрозорого покриття Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_{A-C}^P$  - коефіцієнт теплопередачі випромінюванням від абсорбера до світлопрозорого покриття Вт/(м<sup>2</sup>·К);

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

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

Вітер впливає на коефіцієнт FR лише через  $\alpha_{C-NC}^K$ , який розраховується згідно [11, 24]

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

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 [30, 31, 36]

$$P_{II} = 0,5 \cdot \rho \cdot S_P \cdot V_B^3,$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$S_P$  – площа круга обертання ротору.

При перетворенні механічної енергії в електричну отримуємо значні втрати енергії, тому отримана електрична потужність буде визначатися з виразу [6]

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

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).

Розрахунок теплової потужності системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітропідігрівачем

Метою розрахунку системи теплопостачання 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 в системі теплопостачання, 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 теплопостачання з КСЕП являється крок по часу в 1 годину, що були прийняті в цій роботі [12, 13, 25, 33].

Точність динамічної моделі ГСВТ, прогнозуючої її роботу за рік, об'єктивна 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 ДІЕ і навантаження теплопостачання. Перераховані параметри, крім температури навколишнього середовища і сумарної інтенсивності соняч-

ного 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, 36] теплова 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 [36, 37].

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

$$Q_{\Pi} = \eta_K * I_K * A$$

де:  $A$  - площа КСЕП,  $\text{м}^2$ .

Для кожної години розрахунку приймаємо  $T_{BH} = T_{OC}$ .

Температуру повітря після КСЕ можна визначити з рівняння

$$T_{BK} = T_{BH} + \frac{Q_{\Pi}}{G * c_p}$$

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

$$T_{BH}^{AT}(T_{BP}) = T_{BK} - \frac{A_B * K_{PB} * (T_{BK} - T_{OC})}{G * c_p}$$

де:  $A_B$  площа поверхні повітря від КСЕ до АТ або до будівлі, м<sup>2</sup>.

Температура повітря після АТ при його зарядці визначається з виразу

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

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

і може бути визначена з виразу

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

Кількість акумульованої теплоти за кожен годину можна визначити з такої формули

$$Q_{II}^{AT} = G * c_p * (T_{BK}^{AT} - T_{BH}^{AT})$$

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

$$T_{BK}^{AT} = T_{BH} - \frac{\alpha_{об} * S * \Delta X}{(G * c_p)_B} * (T_{TK} - T_{BH}^{AT})$$

а  $T_{TK}$  в свою чергу з виразу

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

У випадку, коли необхідно опалювати будівлю, потрібно розрахувати температуру рециркуляційного повітря ТРВ після приміщень будівлі, розрахувати тепловтрати в залежності від ТОС та визначити кількість повітря, що подається в приміщення.

Кількість тепла, необхідного для покриття навантаження опалення в залежності від ТОС визначається згідно [31, 32], а кількість повітря, що подається  $L$  з рівняння

$$L = Q_{от} / c_p * (T_{ВП} - T_{ВВ})$$

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

Температура рециркуляційного повітря ТРВ= 18оС.

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 розподільчому повітропроводі, за умови, що ТН повністю покриває навантаження опалення за даний час (рис.4.5). А з рівняння [13, 3 334] можна визначити затрати електроенергії на привід компенсатора ТН

$$Q_{\text{ел}} = Q_{\text{ТС}} / E_{\text{сист}}$$

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

Для системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітряним підігрівачем кореляція між коефіцієнтом заміщення  $f$  та безрозмірними параметрами  $Z$  і  $J$  описані в розділі 4.2.

Зміна витрати повітря впливає на температурну стратифікацію в гальковій камері. 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 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> площі колектору показали, що в порівнянні з системами нагріву рідин їх характеристики повітряних геліосистем слабше залежать від об'єму акумулятора. Для сучасних геліосистем повітряного теплопостачання економічно виправдовується зниження об'єму галькового акумулятора до 0,1 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> КСЕ [30, 3 4]. Більш слабка залежність коефіцієнта заміщення  $f$  від місткості акумулятора пов'язана з можливістю роботи системи в режимі без вико-

ристання 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 до рівнює температурі рециркуляційного повітря. При цьому підвищується загальний К.К.Д. геліосистеми повітряного теплопостачання, проте збільшуються капітальні затрати на створення системи теплопостачання.

## **ВИСНОВОК**

1. Проведено аналіз актуальності, стану та перспектив використання сонячної енергії на теренах України.
2. Проведено аналіз і вивчено особливості використання існуючих повітряних геліосистем теплопостачання у низькотемпературних теплових технологіях; вказано головні недоліки таких систем і визначено основні напрями їх усунення; проаналізовано відомі методи розрахунку геліосистем теплопостачання.
3. Проведено теоретичне дослідження можливості використання вуглеграфітових полотен у якості поглинаючого елемента в повітряних колекторах сонячної енергії та проведено порівняльний аналіз із класичними матеріалами для поглинаючих елементів в геліотехніці.
4. Побудовано фізичну модель теплообміну в повітряному геліоколекторі з поглинаючим елементом з вуглеграфітового трикотажного полотна.

5. Встановлено, що критеріальне число Нусельта (а значить і інтенсивність теплообміну) у випадку продуву повітря через капілярні структури вуглеграфітових полотен значно вище ніж у випадку продуву повітря по пласкому каналу, як це зазвичай виконано в класичних сонячних колекторах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. DiXi Group | Офіційний сайт аналітичного центру (2025) Retrieved from <https://dixigroup.org/> [in Ukraine].
2. Приймко, О., Пасічник, П., Білан, Р., & Нагорний, С. (2016). Визначення частки теплового навантаження, що замінюється енергією сонця та вітру для системи теплопостачання з комбінованим сонячно-електричним повітряним підігрівачем. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, (8), 292–296.
3. J.A. Duffie, W.A. Bachman (2020) *Solar Engineering of Thermal Processes, PhotoVoltaics and Wind*. 5<sup>th</sup> edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
4. Пасічник, П., Погосов, О., & Кулінко, Є. (2024). АНАЛІЗ СТАНУ СВІТОВОГО РИНКУ СУЧАСНИХ ПОВІТРЯНИХ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (February 2, 2024; Oxford, UK), 188–194. <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.038>.
5. Кудря, С. О. (2024). Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. <https://doi.org/10.36296/atlas-2024>
6. Погосов, О., Пасічник, П., & Кулінко, Є. (2023). Вплив деяких проектних рішень на клас енергетичної ефективності будівлі. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (December 22, 2023; Coventry, UK), 214–217. Retrieved from <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1526>
7. Kulinko Y., Sobchko, V., & Pohosov, O. (2019). Diagnostic technique for wells of soil heat pumps in terms of thermal potential depending on the type of soil. *Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture*, (12) 20–29. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.12.20-29>
8. Solri.com. Agency for solar market research and international communication (2024) Retrieved from <http://www.solrico.com>. [in Germany].
9. Кудря С. О. (2015) Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник Київ: Національний технічний університет України «КПІ».

10. Возня кО.Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у системах теплогазопостачання та вентиляції: навч.посібник / О.Т. Возняк. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 164с.
11. Возня кО.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.
12. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – 3.09. 2013.
13. Дорошенко О.В. Сонячні плоскі металополімерні колектори / О.В. Дорошенко, С.С. Титар, Б.Є. Молчанський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. –2010. – № 4.
14. Желих В.М. Аналіз енергетичної ефективності низькотемпературних сонячних колекторів / В.М. Желих, Б.І. Пізнак, Х.М. Лесик // Зб. наук. пр. Польської Академії наук «MOTR Q» «Motorization and power industry in agriculture» Volume 14С. 2012.
15. 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 довкілля. Автоматизація» 2013. №758 – 208 С .
16. Зінич П.Л. Вентиляція громадських будівель: Навчальний посібник / П.Л. Зінич, КНУБА. – К: 2002, - 256с.
17. Керн Д и Краус А. Развитие поверхности теплообмена/ Д. Керн и А. Краус// Пер. с англ.,- М., « Энергия», 1977. 464с.
18. Ковалюк О. М. Механізми державного управління і регулювання діяльності з підвищення енергоефективності системи теплопостачання в Україні / О. М. Ковалюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Управління. - 2012. - Вип. 4 - С. 103-110.
19. 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.

20. Колектори сонячної. Метод випробування. — Вид. офіц. — К.: Держстандарт України, 2008 — (Національний стандарт України). — Ч. 1 : ДСТУ ISO 9806-1:2005; Теплофізичні характеристики та перетворення енергії сонячних колекторів для нагрівання рідин (ISO 9806-1:1994 IDT). — К.: Держстандарт України, 2008— IV. — 55 с.
21. Компанія Winder [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://winder.ua>
22. Корбут В.П. Природна турбулентна конвекція між вертикальними тепловіддальними поверхнями / В.П.Корбут. — К: Наукова думка, 1996. — 215с.
23. Корчмий М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчмий, В. Федоренко, В. Щербань // Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. — 984 с .
24. Луцик Р.В., Тепломасообмін при обробці текстильних матеріалів/ Р.В. Луцик, Е.С. Малкін, І.І. Абаржи // Ін-т техн. теплофізики АН України, Київск. технолог. ін-т. легк. пром. — Київ: Наукова думка, 1993. — 344с.
25. Луцик Р.В., Тепломасообмін при обробці текстильних матеріалів/ Р.В. Луцик, Е.С. Малкін, І.І. Абаржи // Ін-т техн. теплофізики АН України, Київск. технолог. ін-т. легк. пром. — Київ: Наукова думка, 1993. — 344с.
26. О. Ю. Співак. Тепломасообмін. Частина I : навчальний посібник / О. Ю. Співак, Н. В. Резидент. — Вінниця : ВНТУ, 2021. — 113 с.
27. 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.
28. Малкін Е.С., Тимощенко А.В., Коваленко А.Н., Приймак А.В. Використання вторинних енергоресурсів у енергоефективних системах технологічного гарячого водопостачання підприємств // Промислова теплотехніка. — 2003. — Т.25, №4. — С. 161-163.

29. 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.
30. 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.
31. Пасічник П.О. Сонячно-електричний повітряний тепловий колектор// Патент України на корисну модель №97541 від 25.03.2015 р., Бюл. №6.
32. 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. 2.4.
33. 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 .
34. Приймак О.В. Визначення частки теплового навантаження, що замінюється енергією сонця та вітру для системи теплопостачання 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.
35. Приймак О.В. Дослідження тепловіддачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглецевого трикошного полотна / О.В. Приймак, П.О. Пасічник // «Вісник КНУТД» серія «Технічні науки» №1(94), 2016, с.85-92.
36. 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.
37. Donets Ya.I. Mathematical modelling of flat solar collectors with liquid heat carriers. Heat pipes and heat pumps. – Minsk :1991. – P. 131–137.

38. Holla K.G.T. Directional Selectivity, Emissance and Absorptance Properties of Vee Corrugated surface / Solar Energy. V.3. №7. 1995. P.108-116.
39. Enerconcept Distribution inc. [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.enerconcept.com>.
40. 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. 96. – N 2. Christopher A. Homola, PE. “Solar Domestic Hot Water Heating Systems Design Installation and Maintenance”.
41. Grammer Solar GmbH [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.grammer-solar.com>
42. Hubbard, Руководство по выращиванию. Родительское стадо / Lyon, France – 40с.
43. Jaurk 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.
44. 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.
45. Kahlen S., Walther G., Fischer J., Meier M.G., J. Rekstad J., Basic characterisation of Polymeric materials for solar collector absorbers, in: Proceedings of the NORTH SUN 2003 Conference, Vilnius, Lithuania, pp. 32 – 40.

