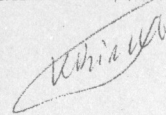


Автореферат Н
К 72

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ



КОСТЕНЮК ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 621.565.82; 620.92

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ СОНЯЧНИХ
КОЛЕКТОРІВ ТА СИСТЕМ ТЕПЛО-ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Одеса – 2012

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській державній академії холоду МОНМС України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дорошенко Олександр Вікторович
професор кафедри технічної термодинаміки,
Одеська державна академія холоду МОНМС України

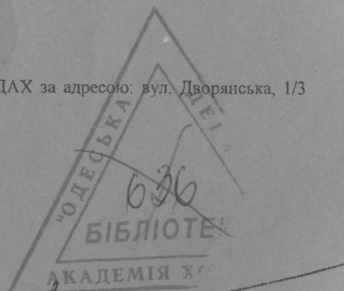
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Нікульшин Володимир Русланович
завідувач кафедрою теоретичної, загальної і нетрадиційної
енергетики, Одеський національний політехнічний університет
МОНМС України

доктор технічних наук, професор
Кириллов Володимир Харитонович
професор кафедри вищої математики, Одеська національна
академія харчових технологій МОНМС України

Захист дисертації відбудеться "01" березня 2012 р. об 14⁰⁰ годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3 м. Одеса, 65082, Україна.

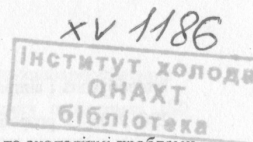
З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3 65082, Україна.

розісланий "31" січня 2012 року.



В.Т. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ



Актуальність теми. Обмеженість запасів традиційних видів палива та екологічні проблеми висувають нові вимоги до систем тепло-холодопостачання і кондиціонування повітря, в першу чергу, зниження енергоспоживання та антропогенної дії на навколишнє середовище. Однією з перспективних тенденцій в сонячній енергетиці є перехід на використання полімерних матеріалів в конструкції плоских сонячних колекторів (СК) і побудова альтернативних систем на їх основі. Використання полімерів диктує нові особливі вимоги до оформлення СК, в першу чергу це стосується теплоприймачів (абсорберів) і прозорих покриттів (ПП), необхідність вивчення процесів теплообміну в цих нових умовах. Для створення сонячних холодильних систем та систем кондиціонування (на основі відкритого циклу абсорбції), які забезпечують істотне підвищення енергетичних і екологічних показників порівняно з традиційними парокompresійними системами, необхідна розробка модифікацій полімерних СК, здатних забезпечити потрібний температурний рівень регенерації абсорбенту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до законодавчих актів: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 01.07.94 р., що затвердила «Закон України про енергозбереження», Постанови Кабінету Міністрів України №148 від 05.02.97 р. «Про комплексну державну програму енергозбереження України», Постанови Кабінету Міністрів України № 583 від 14.04.99 р. «Про Міжвідомчу комісію із забезпечення виконання Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату», Галузевої науково-технічної програми сталого розвитку побутової техніки в Україні на 2006-2011 роки (наказ Мінпромполітики України від 03.03.2006 р. № 85). Робота проводилася за планом роботи аспірантів та тематикою, яка є складовою частиною наукової тематики ОДАХ, що відповідає енергетичній стратегії України.

Мета і завдання дослідження. Підвищення ефективності і поліпшення екологічних показників полімерних СК та систем тепло-холодопостачання і кондиціонування повітря з використанням розроблених полімерних СК.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання: виконати аналіз розвитку альтернативної енергетики останніми роками, визначити найбільш перспективні напрями розвитку сонячної енергетики в області тепло-холодопостачання і кондиціонування повітря; розробити нові модифікації полімерних СК; розробити математичну модель для нових модифікацій полімерного СК з урахуванням зміни температур у характерних точках по довжині СК, оптичних властивостей ПП та впливу повітря, що знаходиться в каналах ПП на зниження теплових втрат; визначити оптимальні конструкційні характеристики розроблених СК і режимні параметри їх експлуатації в системах тепло-холодопостачання; створити експериментальні зразки нових модифікацій полімерних СК; розробити і створити експериментальний стенд для проведення порівняльних

випробувань і випробувань у стаціонарних умовах відповідно до міжнародних стандартів (ДСТУ ISO 9806-1); розробити системи гарячого водопостачання і підігріву води в басейнах; розробити холодильні системи та системи кондиціонування повітря з використанням запропонованих модифікацій полімерних СК; виконати екологічний аналіз розроблених полімерних СК.

Об'єктом дослідження є полімерні СК і системи тепло-холододопостачання та кондиціонування повітря на їх основі. **Предметом дослідження** є процеси теплообміну, що протікають в полімерних СК та їх окремих елементах; показники ефективності СК і методи її визначення; ефективність систем тепло-холододопостачання з використанням запропонованих СК.

Методи дослідження: теоретичне вивчення процесів теплообміну, експериментальне визначення робочих характеристик полімерних СК і аналіз сонячних систем тепло-холододопостачання і кондиціонування повітря на їх основі.

Наукова новизна:

1. Вперше на підставі теоретичних і експериментальних досліджень показана можливість створення полімерних СК з одношаровим прозорим покриттям при оформленні абсорбера і прозорого покриття в єдиній структурі двошарового багатоканального моноблока, що дозволяє зменшити габарити і вагу СК і підвищити надійність його конструкції в цілому, при збереженні високої ефективності перетворення сонячної енергії;

2. Вперше, відповідно до вимог міжнародних стандартів на проведення теплотехнічних випробувань СК (ДСТУ ISO 9806-1), отримані і узагальнені нові експериментальні дані з теплових характеристик полімерних СК: залежність ККД від приведеної температури, ефективна теплосмість і стала часу, значення модифікатора кута надходження сонячного випромінювання;

3. Отримала подальший розвиток математична модель СК на основі багатшарових багатоканальних полімерних плит, яка враховує зміни температур у характерних точках по довжині СК, оптичних властивостей ПП з багатоканальних полімерних плит і вплив повітря, що знаходиться в каналах ПП, на зниження рівня теплових втрат; модель носить універсальний характер і дозволяє прогнозувати результати натурних випробувань і роботу систем тепло-холододопостачання і кондиціонування повітря в процесі експлуатації систем;

4. Проведена теоретична оцінка чутливості інтегральних характеристик полімерних СК (оптичного ККД і сумарного коефіцієнта теплових втрат) до зміни параметрів основних конструктивних елементів для всіх розроблених модифікацій полімерних СК і встановлені оптимальні геометричні параметри основних елементів полімерних СК нових модифікацій;

5. Вперше показано, що використання плити стільникового полікарбонату в якості ПП по ефективності відповідає двошаровому покриттю зі скла і визначені оптимальні геометричні параметри полімерного прозорого покриття, правильний вибір яких дозволяє зменшити теплові втрати і підвищити оптичний ККД при кутах падіння сонячного випромінювання відмінних від нормального;

6. Виконано розрахунки ефективності розроблених систем тепло-холододопостачання і кондиціонування повітря з використанням різних модифікацій розроблених полімерних СК; виявлена відповідність між необхідним рівнем охолодження (отриманням параметрів комфортності в системах кондиціонування повітря) і температурним рівнем регенерації абсорбенту;

7. Виконана екологічна оцінка розроблених СК порівняно із традиційними металевими і відомими у світовій практиці аналогами полімерних СК; показана перевага запропонованих модифікацій з екологічної точки зору.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів визначається коректною постановкою завдань, використанням сучасних математичних методів і програмних засобів для їх вирішення, встановленням відповідності отриманих результатів розрахунків і експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових модифікацій полімерних СК та рекомендації щодо їх використання, створення експериментальної бази для проведення теплових випробувань у стаціонарних умовах відповідно до міжнародних нормативних документів, визначення найбільш ефективних шляхів використання сонячної енергії в системах тепло-холододопостачання.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці математичної моделі полімерного СК і проведенні оптимізаційних розрахунків; створенні експериментального стенду, який дозволяє проводити випробування відповідно до ДСТУ ISO 9806-1, і проведенні експериментального дослідження полімерних СК; аналізі роботи систем тепло-холододопостачання з використанням запропонованих модифікацій полімерних СК.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені: IV Всеукраїнський науково-технічний семінар «Удосконалення малої холодопостачання і забезпечування нею технологічних процесів», м. Донецьк, 2009; VI міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технологій», м. Одеса, 2009; «Проблеми енергетической ефективности пищевых и химических производств» Международная научно-практическая конференция и школа-семинар. Одесса, 2009; I міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2010.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 5 робіт в науково-технічних фахових виданнях і 4 тексти доповідей на міжнародних і науково-практичних конференціях.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація викладена на 219 сторінках друкарського тексту, включаючи 65 рисунків, 30 таблиць і складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаної літератури з 104 найменувань та 4 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі і першому розділі приведено обґрунтування актуальності теми дослідження, вказано зв'язок виконаної роботи з науковими програмами, представлена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів; виконано аналіз літературних джерел за темою роботи, проаналізовані основні напрями розвитку альтернативних систем тепло-холодопостачання та плоских СК, розглянуто стандарти на проведення експериментальних досліджень плоских СК, сформульовані мета і основні завдання дослідження.

У другому розділі представлені основні розроблені модифікації полімерних СК, призначені для використання в сонячних системах гарячого водопостачання, холодильних системах і системах кондиціонування повітря, виконано математичне моделювання процесів теплообміну в полімерних СК, визначені оптичні властивості різних варіантів ПП, виконана оптимізація розроблених (запропонованих раніше і нових) конструкцій полімерних СК.

На рис. 1 А. представлена базова модифікація полімерного СК. Конструктивно такий СК складається з ПП (1), повітряного зазору (ПЗ) (2), абсорбера (3), корпусу (4), теплової ізоляції (ТІ) (5), абсорбер покривається поглинаючим покриттям (6). Абсорбер і ПП виготовляються з плит стільникового полікарбонату. Для цієї конструкції (найбільш загальний випадок) на рис. 1 Д показано ланцюжок теплових опорів, який дозволяє розрахувати теплові втрати.

До системи рівнянь, що описує роботу полімерного СК, входять рівняння теплового балансу для СК в цілому і окремих елементів його конструкції (1). Теплові потоки записані з використанням температур у характерних точках і відповідних теплових опорів (рис. 1 Д). У загальному випадку тепловий опір складається з конвективної та радіаційної складових $R = 1/(\alpha^k + \alpha^r)$, m^2K/Vm .

$$\left. \begin{aligned} Q_{шт} + Q_{тл} + \dot{Q} - G(\tau\alpha)A_a &= 0 \\ Q_{л-шт} - Q_{шт} &= 0 \\ Q_{шт} - Q_{шт-нс} &= 0 \\ Q_{л-т} - \dot{Q} - Q_{т-тл} &= 0 \\ Q_{т-тл} - Q_{т-нс} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $Q_{шт}$, $Q_{тл}$ – теплові втрати через ПП та ТІ відповідно, Vm ; \dot{Q} – корисна енергія, Vm ; G – сонячна радіація в площині СК, Vm/m^2 ; $(\tau\alpha)$ – приведена поглинальна здатність СК; A_a – площа апертури, m^2 ; індекси: А – абсорбер, Т – теплоносій, НС – навколишнє середовище.

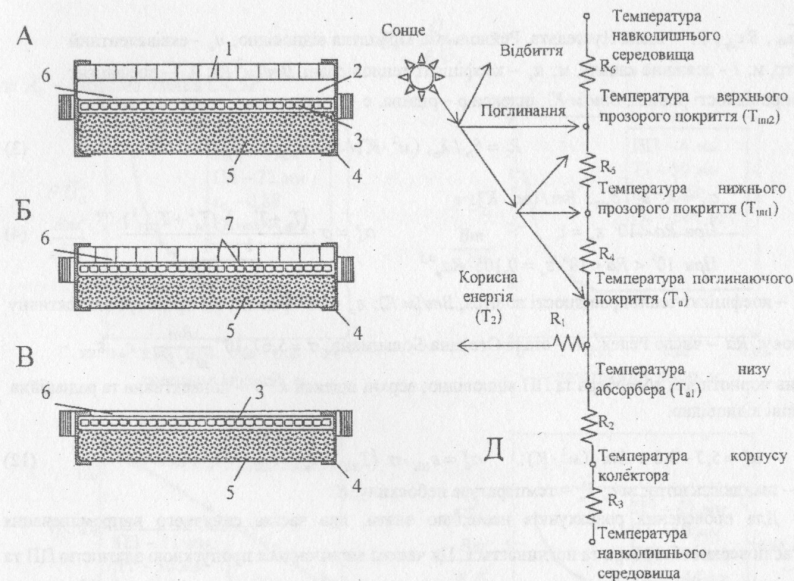


Рис. 1. Розроблені модифікації полімерного сонячного колектора

А - з повітряним зазором між абсорбером і прозорим покриттям; Б - з абсорбером і прозорим покриттям у єдиній структурі (двошаровий моноблок); В - без прозорого покриття; Д - ланцюжок теплових опорів для модифікації А.

1 - прозоре покриття (плита стільникового полікарбонату); 2 - повітряний зазор; 3 - абсорбер; 4 - корпус; 5 - теплова ізоляція; 6 - поглинаюче покриття; 7 - двошаровий моноблок (абсорбер і прозоре покриття в єдиній структурі).

Режим руху теплоносія в каналах абсорбера є ламінарним в діапазоні витрат, що представляють практичний інтерес (у режимах з природною і примусовою циркуляцією теплоносія). Коефіцієнт тепловіддачі від стінки абсорбера до теплоносія визначається по формулі (2). Опір теплової ізоляції знаходиться як відношення товщини шару до коефіцієнта теплопровідності матеріалу ізоляції формула (3). Товщина бічної ізоляції в розрахунках була прийнята рівною половині товщини ізоляції дна. Тепловіддача від абсорбера до прозорого покриття має як конвективну, так і радіаційну складову та знаходиться за формулами (4). Конвективна складову знаходиться множенням теплопровідності повітря на коефіцієнт, що враховує вплив циркуляції повітря. Коефіцієнти тепловіддачі від нижнього шару ПП до верхнього також знаходиться по формулам (4). Коефіцієнти тепловіддачі від верхнього шару ПП в навколишнє середовище знаходиться по формулам (5).

$$\overline{Nu}_{dp} = 1,4 \cdot (Re_{dp} \frac{d_c}{l})^{0,4} \cdot Pr_p^{0,33} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{0,25}, \quad \alpha_1 = \overline{Nu}_{dp} \cdot d_c / \lambda_p, \quad Vm / (m^2 \cdot K) \quad (2)$$

де Nu_{dp} , Re_{dp} , Pr - числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля відповідно; d_e - еквівалентний діаметр, м; l - довжина каналу, м; α_1 - коефіцієнт тепловіддачі, $Bm/(m^2 \cdot K)$; λ_p - коефіцієнт теплопровідності рідини, $Bm/(m \cdot K)$; індекси p - рідина, s - стінка.

$$R_2 = \delta_{13} / \lambda_{13}, (m^2 \cdot K) / Bm \quad (3)$$

$$\alpha_4^* = \lambda_n \cdot \varepsilon_k / \delta_{13}, Bm / (m^2 \cdot K);$$

$$\text{При } Ra < 10^3 \quad \varepsilon_k = 1;$$

$$\text{При } 10^3 < Ra < 10^6 \quad \varepsilon_k = 0,105 \cdot Ra_p^{0,3}$$

$$\alpha_4^p = \sigma \cdot \frac{(T_a + T_{шт1}) \cdot (T_a^2 + T_{шт1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_{шт}} - 1} \quad (4)$$

де λ_n - коефіцієнт теплопровідності повітря, $Bm/(m \cdot K)$; ε_k - коефіцієнт, що враховує конвективну складову; Ra - число Рейля; σ - стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$; $\varepsilon_a, \varepsilon_{шт}$ - ступінь чорноти для абсорбера та ПП відповідно; верхні індекси k, p - конвективна та радіаційна складові відповідно.

$$\alpha_6^* = 5,7 + 3,8 \cdot v Bm / (m^2 \cdot K); \quad \alpha_6^p = \varepsilon_{шт} \cdot \sigma \cdot (T_{шт1} + T_n) \cdot (T_{шт1}^2 + T_n^2) Bm / (m^2 \cdot K); \quad (12)$$

де v - швидкість вітру, м/с; T_n - температура небосхилу, К.

Для проведення розрахунків необхідно знати, яка частка сонячного випромінювання досягає поверхні абсорбера та поглинається. Ця частка визначається пропускну здатністю ПП та оптичними характеристиками поглинаючого покриття. У роботі розглядалися одношарові і двошарові системи ПП зі скла, суцільних листів полікарбонату (ПК) і плит стільникового ПК. Альтернативу одношаровому ПП з скла ($\tau\alpha$)=0,85 (при $\alpha=0,95$) може скласти лист ПК товщиною 1мм. ($\tau\alpha$)=0,84. Двошарове ПП зі скла ($\tau\alpha$)=0,76 можна замінити плитою стільникового ПК товщиною 8÷10 мм. ($\tau\alpha$)=0,77÷0,76.

При оптимізації конструкції базової модифікації (полімерний СК з двошаровим ПП, рис. 1А) і нових модифікацій полімерних СК, розглядався вплив товщини теплової ізоляції, величини повітряного зазору (ПЗ) і висоти прозорого покриття, а також можлива наявність селективного покриття (СП) (рис. 2).

Окрім базової модифікації запропоновані моделі, що зображені рис. 1Б і рис. 1В. Модифікація по рис. 1Б є полімерним СК з одношаровим прозорим покриттям. У нього ПП і абсорбер виконані у вигляді єдиної структури (двошаровий моноблок). Для систем, що не вимагають високих робочих температур, пропонується використання полімерного СК без ПП. Нанесення СП на поверхню абсорбера в моделях з ПП по рис. 1 дає ще дві додаткові модифікації СК (табл. 1).

Ефективність СК визначається залежністю ККД (формула (6) від приведеної температури (формула (7)). За допомогою розрахунків була одержана ефективність запропонованих модифікацій полімерних СК, яка показана на рис. 3.

$$\bar{\eta}_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} \quad (6)$$

де A_G - загальна площа СК, m^2 .

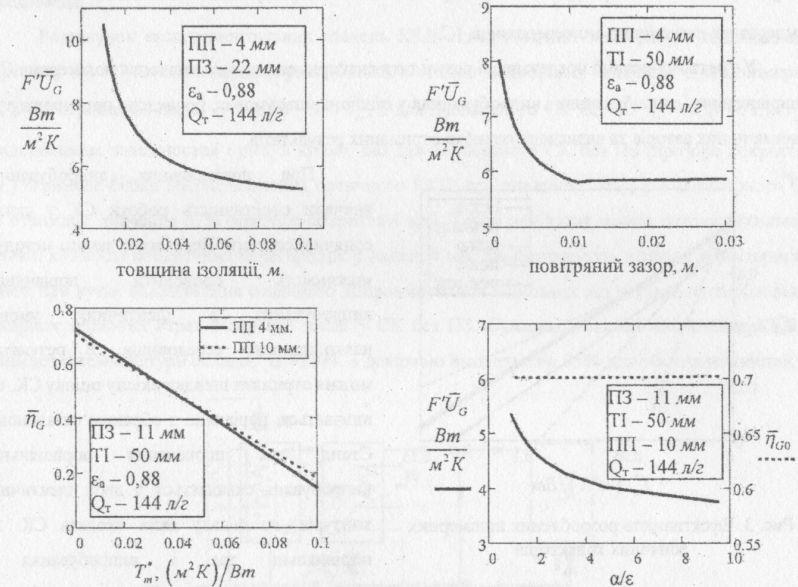


Рис. 2. Оптимізація конструкції базової модифікації полімерного сонячного колектора F' - коефіцієнт ефективності СК; U_G - коефіцієнт сумарних теплових втрат, $Bm/(m^2 \cdot K)$; $\bar{\eta}_G, \bar{\eta}_{G0}$ - миттєвий ККД та оптичний ККД СК; Q_T - витрати теплоносія, л/з.

Таблиця 1.

Конструктивні характеристики запропонованих модифікацій

Найменування	Маркування	Тип ПП	ПП, мм	СП	ПТ, мм	ПЗ, мм
Полімерний СК без ПП	ПСК-0	-	-	-	20	-
Полімерний СК з одношаровим ПП	ПСК-1	Лист ПК	1	-	40	11
Полімерний СК з одношаровим ПП і СП	ПСК-1СП	Лист ПК	1	+	50	11
Полімерний СК з двошаровим ПП	ПСК-2	Плита ПК	10	-	50	11
Полімерний СК з двошаровим ПП і СП	СК-2СП	Плита ПК	10	+	70	11

$$T_m^* = \frac{t_m - t_a}{G} \quad (7)$$

де T_m^* – приведена температура, $m^2 K / Bm$; t_m – середня температура теплоносія в СК, $^{\circ}C$; t_a – температура навколишнього середовища, $^{\circ}C$.

У третьому розділі представлені результати експериментального вивчення полімерних СК у порівняльних випробуваннях і випробуваннях у стаціонарних умовах, проведено порівняння з даними інших авторів та визначена похибка отриманих результатів.

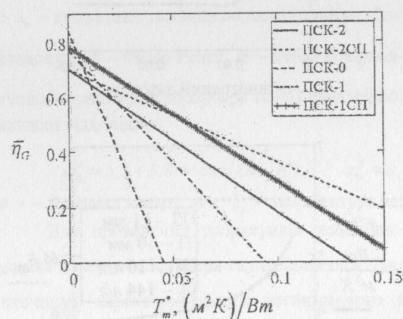


Рис. 3. Ефективність розроблених полімерних сонячних колекторів

При порівняльних випробуваннях вивчали ефективність роботи СК у складі сонячної системи. Перевагою даного методу є можливість проводити порівняльні випробування в ідентичних умовах навколишнього середовища. В результаті можна отримати швидку якісну оцінку СК, що вивчається, порівняно з обраним «еталоном».

Стенд для проведення порівняльних випробувань складається з двох ідентичних контурів, до складу яких входять СК. Як порівняльні, так і випробування в стаціонарних умовах проводилися для двох модифікацій полімерного СК: з ПЗ між абсорбером і ПП (використовувалася плита стільникового ПК товщиною 4 мм) і без ПЗ (плита стільникового ПК товщиною 10 мм встановлювалася безпосередньо на абсорбер).

На першому етапі порівняльних випробувань були проведені випробування для СК з ПЗ при різних значеннях витрат теплоносія (від природної циркуляції до $0,08 m^3 / (m^2 \cdot год)$). Цей цикл випробувань виконаний вперше. Показано, що розроблені варіанти СК можуть ефективно працювати як в системах з природною, так і з вимушеною циркуляцією теплоносія. Із зростанням витрат теплоносія відбувається швидке вирівнювання температур в БТА.

На наступному етапі проведено випробування в стаціонарних умовах (ДСТУ ISO 9806-1) для визначення залежності ККД від приведеної температури, сталої часу та ефективної теплоємності СК, модифікатора кута надходження сонячного випромінювання. Головним завданням при проектуванні нового експериментального стенду (рис. 4) для проведення таких випробувань є забезпечення сталості витрат теплоносія через СК та сталості температури теплоносія на вході в СК. Для виконання останньої вимоги було передбачено два ступеня регулювання температури теплоносія на вході: тенами 9 і 10 теплоносії в баках 2 і 3 нагрівається до температури близької до запланованої в дослідженнях, а під час експерименту точне значення

підтримується вторинним нагрівачем 19. Для забезпечення сталої витрати необхідно підтримувати постійний рівень теплоносія у баку 2, тому між баками 2 і 3 був організований додатковий контур циркуляції теплоносія. Всі випробування на даному стенді проводилися в умовах навколишнього середовища.

Розрахунок експериментальних значень ККД від приведеної температури проводився по формулах (6) і (7) з подальшою апроксимацією методом найменших квадратів. Для полімерного СК з ПЗ отриманий вираз $\bar{\eta}_G = 0,67 - 9,4 \cdot T_m^*$, а для полімерного СК без ПЗ $\bar{\eta}_G = 0,74 - 11,2 \cdot T_m^*$. Із представлених залежностей і рис. 5 видно, що для полімерного СК без ПЗ (прозоре покриття 10 мм.) отримане більш високе значення оптичного ККД, що дорівнює 74%, для полімерного СК з ПЗ отримане значення 67% (прозоре покриття 4 мм). Такий результат можна пояснити наявністю великої кількості поперечних перегородок у панелі 4 мм, які погіршують оптичні характеристики панелі при кутах надходження сонячного випромінювання відмінних від нормального. Коефіцієнт сумарних теплових втрат очікувано вище у СК без ПЗ. Сумарна похибка визначення ККД від приведеної температури складає $\Delta \approx 0,04$ з довірчою ймовірністю 95% для обох залежностей.

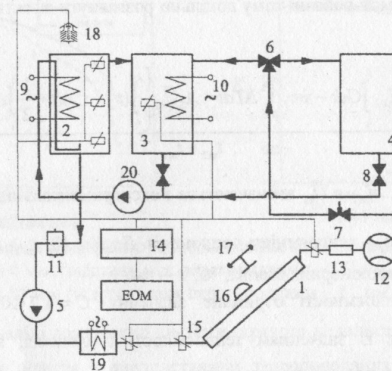


Рис. 4. Схема експериментального стенду для проведення теплових випробувань СК

1 – сонячний колектор; 2 – теплоізолюваний бак постійного рівня; 3 – теплоізолюваний бак змінного рівня; 4 – бак для збору теплоносія; 5 – циркуляційний насос; 6 – триходовий кран; 7 – регулюючий вентиль; 8 – кран; 9, 10 – ТЕН; 11 – фільтр; 12 – витратомір; 13 – оглядове вікно; 14 – контрольно-вимірювальний регулюючий прилад; 15 – датчик температури; 16 – піранометр; 17 – анеометр; 18 – датчик температури навколишнього середовища; 19 – вторинний нагрівач; 20 – переклачувальний насос.

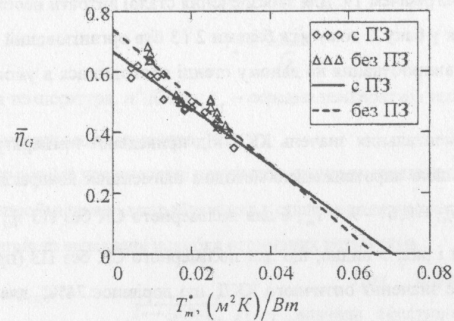


Рис. 5. ККД від приведеної температури точки – експериментальні дані; лінії – апроксимація даних.

Ефективна теплоємність і стала часу СК є важливими характеристиками, оскільки саме вони визначають його роботу у перехідних режимах. Під час роботи СК кожний з його елементів по-своєму реагує на зміни умов роботи, тому доцільно розглянути ефективну теплоємність усього СК формула (8).

$$C = \frac{A_G \bar{\eta}_{0G} \int_{t_1}^{t_2} G dt - \dot{m} c_f \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt - A_G \bar{U}_G \left[\int_{t_1}^{t_2} (t_m - t_a) dt + \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt \right]}{t_{m2} - t_{m1}} \quad (8)$$

де $\int_{t_1}^{t_2} (t_m - t_a) dt$, $\int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt$, $\int_{t_1}^{t_2} G dt$, $\bar{\eta}_{0G}$ и \bar{U}_G визначаються з експериментальних даних; \dot{m} - масова швидкість теплоносія, кг/с ; c_f - теплоємність теплоносія, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; t_{m2} , t_{m1} - температури у початковому та кінцевому стаціонарних станах, $^{\circ}\text{C}$, t - час, с .

Для ефективної теплоємності отримане значення $C = 4,7 \cdot 10^4 \text{ Дж/К}$. Це значення практично точно співпадає із значенням теплоємності теплоносія, який знаходиться в СК ($11,4 \text{ кг} \cdot 4180 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 4,765 \cdot 10^4 \text{ Дж/К}$). Такий результат говорить з одного боку про великий внутрішній об'єм СК і про низьку теплоємність елементів конструкції СК (в першу чергу абсорбера) з іншого. Стала часу для полімерного СК з ПЗ дорівнює 7 хв. 26 с.

Миттєвий ККД СК визначається за формулою (9):

$$\bar{\eta}_G = F' K_0 (\tau\alpha)_{en} - F' \bar{U}_G \frac{t_m - t_a}{G} \quad (9)$$

де $(\tau\alpha)_{en}$ - добуток коефіцієнтів пропускання та поглинання при перпендикулярному надходженні сонячного випромінювання; K_0 - модифікатор кута надходження.

Важливість модифікатора кута надходження визначається тим, що значення ККД колектора визначається за умови перпендикулярного або близького до перпендикулярного значення кута падіння сонячного випромінювання. Для того, щоб робочі характеристики колектора можна було

визначити, використовуючи рівняння (9), у широкому діапазоні умов і/або часу доби, потрібно провести окреме випробування для визначення K_0 (формула 10).

$$K_0 = \frac{\eta_G + F_R U_G \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)}{F_R (\tau\alpha)_{en}} \quad (10);$$

де F_R - коефіцієнт відведення теплоти з СК; t_m - температура теплоносія на вході в СК, $^{\circ}\text{C}$.

Визначення модифікатора кута надходження сонячного випромінювання було виконано для обох модифікацій СК. На рис. 6 представлені результати експерименту на тлі стандартних даних (ДСТУ ISO 9806-1) для одношарового і двошарового прозорого покриття зі скла. СК з прозорим покриттям 10 мм має значення модифікатора кута надходження вище, ніж СК з прозорим покриттям 4 мм із зростанням кута падіння сонячного випромінювання. Це пов'язано з наявністю великої кількості поперечних перегородок у панелі 4 мм і впливом цих перегородок на оптичні властивості ПП.

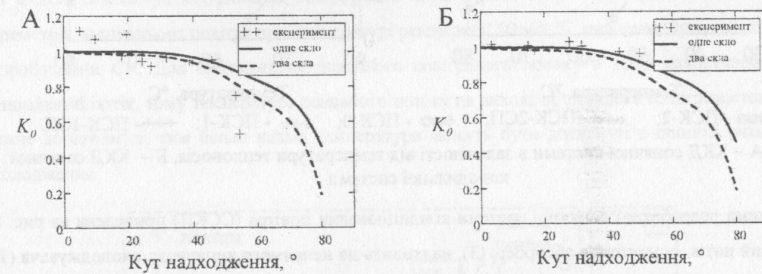


Рис. 6. Значення модифікатора надходження сонячного випромінювання А - для СК з ПП з плити 4 мм. (відстань між перегородками - 5,7 мм.); Б - для СК з ПП з плити 10 мм. (відстань між перегородками - 11 мм.).

У четвертому розділі розроблено системи гарячого водопостачання, холодильні системи і системи кондиціонування повітря з використанням запропонованих полімерних СК, виконаний екологічний аналіз розроблених СК. В результаті розрахунку систем гарячого водопостачання встановлено, що найбільшу ефективність у складі таких систем показують сонячні колектори з одношаровою прозорою ізоляцією (для весняно-осіннього сезону).

Виконаний аналіз показав, що найбільш доцільними холодильними системами для використання сонячної енергії у своїй роботі, є холодильні системи з відкритим абсорбційним циклом. Такі системи можуть використовуватися для отримання охолодженої води при прямому випарному охолодженні або охолодженого повітря при непрямому випарному охолодженні. Ефективність роботи холодильної системи з сонячною регенерацією абсорбенту знаходиться множенням ККД холодильного циклу і ККД сонячної системи. Ефективність розроблених полімерних СК залежно від температури представлена на рис. 7А.

Для аналізу сонячної холодильної системи (СХС) було використано класичне рішення водоохолоджувальної сонячної системи по роботі Hellman, H.M., Grossman G. (Simulation and analysis of an open-cycle dehumidifier-evaporator (DER) absorption chiller for low-grade heat utilization. Int. J. Refrig., vol. 18, no. 3, 1995, P. 177-189.), де в охолоджувальному контурі використовується двоконтурний пристрій (градирня), а повітряний потік послідовно проходить всі тепломасообмінні апарати системи, включаючи осушувальний і охолоджувальний контури СХС. ККД при застосуванні розроблених СК наведено на рис. 7Б.

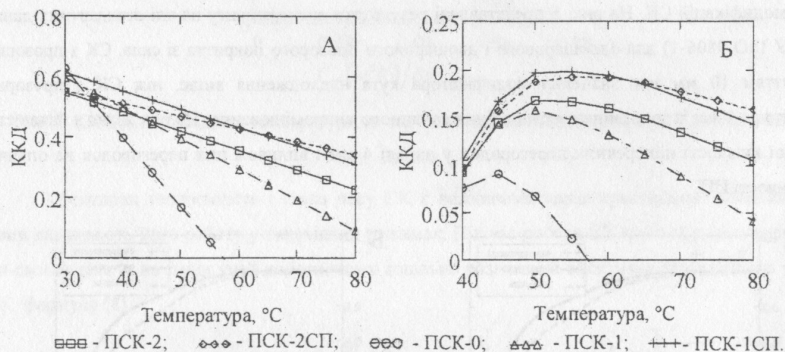


Рис. 7. А – ККД сонячної системи в залежності від температури теплоносія, Б – ККД сонячної холодильної системи

Схема розробленої сонячної системи кондиціонування повітря (ССКП) приведена на рис. 8. Повітряний потік, осушений в абсорбері (3), надходить до непрямого випарного охолоджувача (1), з якого «основний» повітряний потік (охолоджений при постійному вологовмісті) подається у приміщення. «Допоміжний» повітряний потік, також холодний, але зволожений, використовується для попереднього охолодження осушеного в абсорбері повітря. Абсорбер та десорбер (4), що використовуються в осушувальній частині ССКП, виконані двоконтурними, що дозволяє усунути додаткові теплообмінники охолодження абсорбера та підігріву десорбера. Для відновлення абсорбенту використовується повітря (повністю, або частково), яке покидає приміщення, що кондиціонується. Цей регенераційний потік може частково змішуватися з навколишнім повітрям. Робочі процеси в системі показані на рис. 9.

Задаючи ефективності основних апаратів, які були отримані в попередніх дослідженнях в ОДАХ, та записуючи рівняння теплового балансу, було проведено моделювання роботи ССКП. Ефективність була задана в наступному вигляді:

$$E_{\text{оха}} = \frac{h_t - h_A}{h_n - h_A} = 0,75; \quad E_a = \frac{P_A - P_E}{P_A - P_M} = 0,8; \quad E_{\text{м.о.10}} = \frac{t_E - t_{G^*}}{t_E - t_{G^*}} = 0,7;$$

$$E_{\text{цвю}} = \frac{t_{R^*} - t_G}{t_{R^*} - t_{M^*}} = 0,75; \quad E_{\text{м.о.5}} = \frac{t_{M^*} - t_M}{t_{M^*} - t_N} = 0,8; \quad E_o = \frac{t_{M^*} - t_{N^*}}{t_R - t_{N^*}} = 0,8$$

де $E_{\text{оха}}$, E_a , $E_{\text{м.о.10}}$, $E_{\text{цвю}}$, $E_{\text{м.о.5}}$, E_o – ефективність випарного охолодження абсорбера, процесу абсорбції, теплообмінника 10, непрямого випарного охолоджувача (НВО), теплообмінника 5, підігріву абсорбенту в десорбері відповідно; h – ентальпія повітряного потоку (індекси відповідають рис. 8), кДж/кг ; h_n – ентальпія насиченого повітря при температурі охолоджуючої води, кДж/кг ; P – парціальний тиск водяної пари в потоці, кПа ; P_M – парціальний тиск водяної пари над поверхню абсорбенту, кПа ; t – температура, $^{\circ}\text{C}$; t_{M^*} – температура за мокрим термометром, $^{\circ}\text{C}$; t_n – температура теплоносія на вході в десорбер, $^{\circ}\text{C}$.

Моделювання було проведено в широкому діапазоні початкових параметрів зовнішнього повітря. При цьому підтримувалися задані параметри комфортності (СНиП 2.04.01-85*). Показано, що ССКП забезпечує підтримання комфортних параметрів в широкому діапазоні початкових параметрів зовнішнього повітря при температурі регенерації $50-60^{\circ}\text{C}$, яка може бути забезпечена розробленими СК. Для охолодження основного повітряного потоку в НВО використовується допоміжний потік, тому температура основного потоку на виході обумовлена вологовмістом: чим нижче вологовміст, тим більш низькі температури можуть бути досягнуті в процесі випарного охолодження.

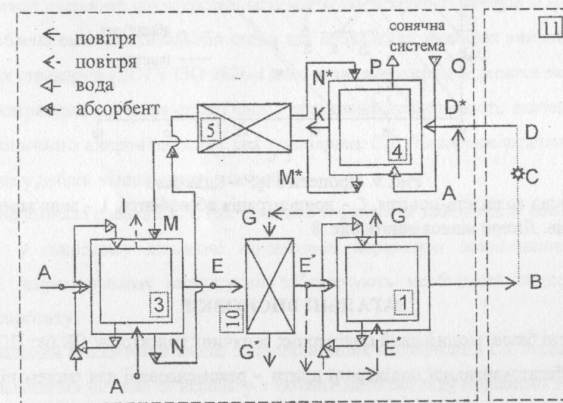


Рис. 8. Принципова схема сонячної системи кондиціонування повітря (рециркуляційна)

1 – непрямої випарний охолоджувач (НВО); 3 – абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням, 4 – десорбер із внутрішнім теплообмінником-нагрівачем; 5,10, – теплообмінники; 11 – приміщення. А – зовнішнє повітря; Е – осушене повітря; І – допоміжний повітряний потік з абсорбера; Е* – повітря на вході в НВО; В – у приміщення; G – допоміжний повітряний потік з НВО; D – повітря із приміщення; D* – вхід в десорбер; K – викид повітря з десорбера; M – концентрований розчин абсорбенту; N – слабкий розчин; O, P – теплоносій із сонячної водонагрівальної системи; C – стан повітря в приміщенні.

Використання в СХС і ССКВ розроблених модифікацій полімерних СК, цілком забезпечує їх працездатність (підтримка безперервності циклу при забезпеченні необхідного температурного рівня регенерації абсорбенту). По рівню ККД отримані результати відповідають значенням, отриманим для подібних систем з традиційним металевим типом плоских СК, при істотному зниженні вартості, за рахунок переходу на полімерні матеріали як в конструкції СК, так і в конструкції використаних тепломасообмінних апаратів альтернативних систем (апарати осушного контуру абсорбер-десорбер) і охолоджувального контуру (випарні охолоджувачі води і повітря), які виконані плівковими, поперечнопоточними та уніфіковані з погляду насадки і організації руху теплоносіїв.

В результаті проведення екологічного аналізу для розробленого полімерного СК в порівнянні з СК традиційного типу та полімерним СК запропонованим раніше встановлено перевагу розроблених СК з екологічної точки зору. Екологічний аналіз виконувався з застосуванням методології «Life Cycle Assessment».

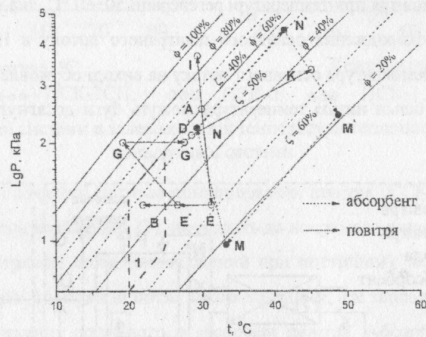


Рис. 9. Процеси в $\lg P - t$ діаграмі
 ϕ – відносна вологість повітря, ζ – концентрація абсорбенту, 1 – зона комфортних параметрів. Літери відповідають рис. 8.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблені базові модифікації полімерних сонячних колекторів: СК без ПП з абсорбером у вигляді єдиної багатоканальної полімерної плити – рекомендовані для систем підігріву води в басейнах; СК з двошаровим ПП, причому абсорбер і ПП виконані з багатоканальних полімерних плит з взаємно перпендикулярним розташуванням каналів і встановлені з повітряним зазором між ними, – призначені для холодильних абсорбційних систем; СК з одношаровим ПП, причому абсорбер і ПП виконані у вигляді єдиного моноблока, мають багатоканальну структуру різної геометрії і призначені для систем гарячого водопостачання та кондиціонування повітря.

2. Виконано моделювання процесів перетворення сонячної енергії в СК на основі полімерних багатоканальних багатоканальних структур; розроблені моделі носять універсальний характер і враховують вплив зміни температур у характерних точках по довжині СК, оптичні властивості ПП із багатоканальних полімерних плит і впливу повітря, що знаходиться в каналах ПП на зниження рівня теплових втрат; розроблені моделі забезпечують надійне прогнозування результатів випробувань і робочих характеристик в процесі експлуатації для всіх розроблених модифікацій СК і систем на їх основі;

3. На підставі циклу проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлена принципова можливість переходу до єдиного моноблока з одношаровим ПП в конструкції полімерного СК без істотного зниження ефективності процесу перетворення сонячної енергії, що забезпечує зниження габаритів, ваги і вартості, підвищує жорсткість конструкції і надійність полімерного СК;

4. При конструюванні полімерних СК рекомендується використовувати абсорбер з висотою каналів для руху теплоносія 3÷5 мм., ПП з висотою каналів 10÷12 мм., при максимальній відстані між поперечними перегородками, яка дозволяє зберегти жорсткість конструкції, та взаємно перпендикулярним розташуванням каналів в абсорбері та ПП;

5. Експериментально вивчено вплив витрат теплоносія на ефективність полімерного СК (як для умов природної, так і вимушеної циркуляції) і показана слабка чутливість до величини витрат теплоносія в межах діапазону, що представляє практичний інтерес ($0,04 \pm 0,08 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{г})$).

6. Розроблено експериментальний стенд для проведення теплових випробувань відповідно до міжнародних стандартів (ДСТУ ISO 9806-1), що дозволив вперше отримати залежності ККД від приведеної температури, значення сталої часу і ефективної теплоємності, значення модифікатора кута падіння сонячного випромінювання для полімерних СК. Експериментальні та розрахункові дані знаходяться у добрій відповідності між собою.

7. Проаналізована робота ССКП і показана її здатність забезпечити комфортні параметри в приміщенні у широкому діапазоні початкових параметрів навколишнього середовища. Полімерні СК запропонованих конструкцій забезпечують необхідний температурний рівень регенерації абсорбенту.

8. Проведений екологічний аналіз запропонованих модифікацій СК згідно з методологією «Life Cycle Assessment» показав їх перевагу з екологічного погляду порівняно з СК традиційного типу і полімерними СК запропонованими раніше.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шестопапов К. О. Сонячна холодильна система / К. О. Шестопапов, В. В. Костенюк // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2008. – Вип. 19. – С 101-106.

Особистий внесок: аналіз роботи сонячної холодильної системи та полімерних сонячних колекторів.

2. Дорошенко О.В. Концепція розвитку сонячних термічних перетворювачів з полімерних матеріалів. / О.В. Дорошенко, В. В. Костенюк // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Тугана-Барановського. 2009. – С. 84-89.

Особистий внесок: розробка варіантів компоновки полімерних СК, підготовка матеріалів до друку.

3. Дорошенко А.В. Перспективи розвитку сонячних колекторів из полімерних матеріалов / А.В. Дорошенко, В.В. Костенюк, Джамаль Камаль Хусейн // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – №1. – С. 36-40.

Особистий внесок: розробка нових полімерних сонячних колекторів.

4. Джамаль Камаль Хусейн. Задачи развития солнечной энергетики в свете современного состояния экологических и энергетических проблем / Джамаль Камаль Хусейн, В.В. Костенюк // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – №4. С. 41-48.

Особистий внесок: аналіз напрямків розвитку альтернативних холодильних систем та формулювання задач дослідження.

5. Костенюк В.В. Тепловые испытания полимерных солнечных коллекторов / В.В. Костенюк, А.В. Дорошенко // Холодильна техніка та технологія. - 2010. - №4. - С. 54-59.

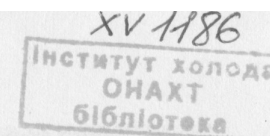
Особистий внесок: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментального дослідження.

АНОТАЦІЯ

Костенюк В.В. Підвищення ефективності полімерних сонячних колекторів та систем теплохолододопостачання – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2011.

Розроблено базові модифікації полімерних сонячних колекторів (СК), призначені для систем підігріву води у басейнах, систем гарячого водопостачання і кондиціонування повітря, а також холодильних абсорбційних систем. Виконано математичне моделювання процесів перетворення сонячної енергії в СК на основі полімерних багат шарових багатоканальних структур. В результаті проведення теплових випробувань (ДСТУ ISO 9806-1) вперше отримано залежності ККД від приведеної температури, значення сталої часу та ефективної теплоємності, значення модифікатора кута падіння сонячного випромінювання для полімерних СК.



Виконано аналіз сонячних холодильних систем і систем кондиціонування повітря і показано, що використання розроблених модифікацій полімерних СК забезпечує їх працездатність. По рівню ККД ці результати відповідають значенням, отриманим для подібних систем з традиційним металевим типом плоских СК, при істотному зниженні вартості, за рахунок переходу на полімерні матеріали. Виконано екологічний аналіз розроблених полімерних СК з використанням методології «Повний життєвий цикл» і показано, що розроблені СК приводять до меншого виснаження природних ресурсів, ніж традиційний тип СК і вносять менший внесок до глобальної зміни клімату.

Ключові слова: полімерні матеріали, сонячний колектор, теплові випробування, холодильні системи, системи кондиціонування повітря.

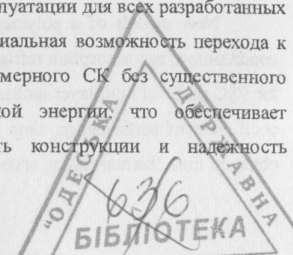
АННОТАЦИЯ

Костенюк В.В. Повышение эффективности полимерных солнечных коллекторов и систем тепло-хладоснабжения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода, Одесса, 2011.

Разработаны базовые модификации полимерных солнечных коллекторов (СК): без прозрачного покрытия (ПП) с абсорбером в виде единой многоканальной полимерной плиты, предназначенные для систем подогрева воды в бассейнах; с двухслойным ПП, где абсорбер и ПП выполнены из многоканальных полимерных плит с взаимно перпендикулярным расположением каналов и установлены с воздушным зазором между ними, предназначенные для холодильных абсорбционных систем; с однослойным ПП, где абсорбер и ПП выполнены в виде единого моноблока, имеют многоканальную структуру различной геометрии и предназначены для систем горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха.

Выполнено моделирование процессов преобразования солнечной энергии в СК на основе полимерных многослойных многоканальных структур; разработанные модели учитывают влияние изменения температур в характерных точках по длине коллектора, оптических свойств ПП и влияния воздуха, находящегося в ячейках ПП на снижение уровня тепловых потерь. Разработанные модели носят универсальный характер и обеспечивают надежное прогнозирование результатов испытаний и рабочих характеристик в процессе эксплуатации для всех разработанных модификаций СК и систем на их основе. Установлена принципиальная возможность перехода к единому моноблоку с однослойным ПП в конструкции полимерного СК без существенного снижения эффективности процесса преобразования солнечной энергии, что обеспечивает снижение габаритов, веса, стоимости, повышает жесткость конструкции и надежность полимерного СК в целом.



Экспериментальное исследование полимерных СК состояло из двух этапов и выполнялось на двух стендах: предварительные сравнительные испытания и тепловые испытания в соответствии с ДСТУ ISO 9806-1. В результате проведения тепловых испытаний впервые получены зависимости КПД от приведенной температуры, значения постоянной времени и эффективной теплоёмкости, значения модификатора угла падения солнечного излучения для полимерных СК. Экспериментальные и расчетные характеристики разработанных СК находятся в хорошем соответствии между собой и немногочисленными имеющимися в научной литературе данными с учетом некоторых конструктивных отличий и отличий в условиях испытаний.

Выполнен анализ возможностей солнечных холодильных систем (СХС) и систем кондиционирования воздуха (ССКВ), базирующихся на использовании разработанных модификаций полимерных СК и компактной теплообменной аппаратуре пленочного типа в осушительном (абсорбер-десорбер) и охладительном контурах систем (испарительные охладители воды и воздуха). Показано, что использование в СХС и ССКВ полимерных СК, вполне обеспечивает их работоспособность (обеспечение требуемого температурного уровня регенерации абсорбента для достижения заданной степени охлаждения в СХС и комфортных параметров воздуха в ССКВ). По уровню КПД эти результаты соответствуют значениям, полученным для подобных систем с традиционным металлическим типом плоских СК, при существенном снижении стоимости, за счет перехода на полимерные материалы в конструкции СК.

Выполнен экологический анализ разработанных полимерных СК с использованием методологии «Полный жизненный цикл» (международные стандарты ISO 14040, 14041, 14042 и 14043) и показано, что разработанные СК приводят к меньшему истощению природных ресурсов, чем традиционный тип СК и вносят меньший вклад в глобальное изменение климата.

Ключевые слова: полимерные материалы, солнечный коллектор, тепловые испытания, холодильные системы, системы кондиционирования воздуха.

ABSTRACT

Kosteniuk V. Efficiency improvement of polymeric solar collectors, heating and cooling systems – Manuscript.

Thesis for Candidate of science (engineering) degree by specialty 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor techniques and conditioning systems. - Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2011.

New models of a polymeric solar collector (PSC) for water heating in hot water supply, air conditioning, and absorption refrigerating systems were developed. Energy conversion process modeling for PSC made of multilayer multichannel polymeric structures is carried out. New experimental data for coefficient of performance, time constant, effective heat capacity and incidence angle modifier were obtained from thermal testing according to ISO 9806-1.

Solar refrigeration and air conditioning systems based on PSC were studied. It was shown that system of interest can be driven by the developed PSC. Performance of systems with PSC corresponds to systems with traditional types of SC with flat metal absorber but they are less expensive due to polymeric material used. The ecologic analysis of the novel PSC was carried out via methodology “Life Cycle Assessment”. It was shown that the PSCs reduce a depletion of the natural resources and contribute a smaller impact to global climate change in comparison with the traditional type of SC.

Keywords: polymeric materials, solar collector, thermal testing, refrigeration systems, air conditioning systems

м. Одеса, Видавничий центр ОДАХ

Підписано до друку 30.01.2012

Обсяг 1 др. арк. Тираж 110 прим.

Замовлення № 39/2012