

Автореферат
СЗБ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

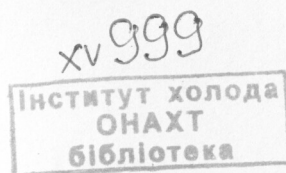
Сіліч Сергій Станіславович

620.9
УДК 536.248.2: 532.529.5

**РОЗРОБКА БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СОНЯЧНИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВІ ГАЗО-РІДИННИХ КОЛЕКТОРІВ**

Спеціальність
05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи
кондиціювання»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мілованов Валерій Іванович завідувач кафедри компресорів і пневмоагрегатів Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович завідувач кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

кандидат технічних наук, доцент
Білий Володимир Нікіфорович, доцент кафедри суднової теплоенергетики і холодильної техніки Одеської національної морської академії Міністерства освіти і науки України.

Захист дисертації відбудеться «03» червня 2013 р. о 13-00 год. в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

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

...ат розісланий « 29 » квітня 2013 р.

...ради
...фесор
...холодильне про

В.І Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

ГАЛУЗЕВИЙ ВІДДІЛ

Актуальність теми. Взаємозв'язані проблеми енергетики і екології висувають нові вимоги до систем тепло-холододозабезпечення і кондиціонування повітря, насамперед, зниження енерговитрат і антропогенної дії на місце існування. Перспективним рішенням є створення альтернативних систем на основі методів випарного охолодження середовища. Практичне використання випарного охолодження вимагає вирішення принципових питань: розширення кліматичної області використання самих методів, підвищення компактності устаткування і зниження енергоспоживання. Виконані останніми роками дослідження показали збільшений інтерес до можливостей випарних методів охолодження і створення альтернативних систем на їх основі. Найбільш перспективне включення випарних охолоджувачів до складу осушувально-випарних систем на основі відкритого циклу абсорбції, що дозволяє зняти кліматичні обмеження застосовності випарних методів і істотно поліпшити енергетичні і екологічні показники альтернативних систем в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до законодавчих актів: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94р. що затвердила "Закон України про енергозбереження", Постанови Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.97 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. 2006р. № 85).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення багатофункціональних сонячних систем тепло-холододоставання і кондиціонування повітря на основі осушувально-випарних методів і сонячної енергії для підтримки безперервності циклу при прямій регенерації абсорбенту. Для її досягнення вирішувалися наукові завдання: – розробка схемних рішень для багатофункціональних систем з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту і вдосконалення тепломасообмінних апаратів осушувального і охолоджувального контурів ССКП; – теоретична і експериментальна розробка нового класу перетворювачів сонячної енергії газорідинного типу для безпосередньої регенерації абсорбенту; – створення уніфікованої компактно-тепломасообмінної апаратури (абсорбера-осушувача з внутрішнім випарним охолодженням, сонячного десорбера-регенератора, випарних охолоджувачів), що забезпечує мінімізацію енерговитрат; – моделювання робочих процесів з урахуванням особливостей плівкових течій в ТМА і проведення експериментального дослідження: сонячних регенераторів абсорбенту і випарних охолоджувачів; – одержання, на основі виконаного циклу теоретичних і експериментальних робіт, залежностей і рекомендацій, що забезпечують розрахунок і конструювання таких систем.

Об'єктом дослідження є сонячні багатофункціональні системи (кондиціонування повітря і тепло-холододоставання) з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту. **Предметом дослідження** є процеси тепломасообміну в альтернативних системах (процеси абсорбції-десорбції і випарного охолодження середовища).

Методи дослідження: теоретичне вивчення, математичне моделювання процесів, експериментальне дослідження на натурних зразках тепломасообмінних апаратів.

Наукова новизна роботи визначається наступними результатами:

- Розроблені схемні вирішення багатofункціональних сонячних систем осушувально-випарного типу на основі тепловикористовуючого циклу абсорбції забезпечують пряму (безпосередню) регенерацію абсорбенту при температурах не вище 60-70°C, тобто можуть ґрунтуватися тільки на використанні сонячної енергії;

- Перехід до прямої, безпосередньої сонячної регенерації абсорбенту дозволяє: усунути з схеми МАЕС традиційний десорбер-регенератор і сонячну систему теплового забезпечення його роботи; знизити енерговитрати на транспорт теплоносіїв; знизити габарити і вартість обладнання системи;

- Автором отримані експериментальні дані по кінетиці десорбції водяної пари з розчину абсорбенту (композит на основі LiBr) в газо-рідинних СК-регенераторах і встановлені закономірності процесів тепломасообміну;

- Вперше запропонована реалізація процесу осушування повітря в абсорбері з внутрішнім випарним охолодженням АБР/ніо з насадкою з керамічних мікропористих багатоканальних структур КПМ, що дозволяє наблизити процес до ізоермічного і підвищити його ефективність;

- Вперше теоретично і експериментально показано, що профілювання теплоприймача газо-рідинних СК/г-р дозволяє знизити сумарні теплові втрати, обумовлені механізмами конвекції і радіації;

- Вперше показано, що створення випарних охолоджувачів, як прямого, так і непрямого типу, на основі КПМ дозволяє знизити термічний опір рідинної плівки, зменшити аеродинамічний опір каналів насадки і краплинне віднесення рідини.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджуються результатами експериментально-розрахункових досліджень і добрим якісним і кількісним узгодженням отриманих результатів.

Наукове значення мають: результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів трансформації сонячної енергії в газо-рідинних сонячних колекторах; розроблені методи інтенсифікації тепломасообміну в апаратах осушувального і охолоджувального контурів сонячних систем з насадкою із керамічних мікропористих багатоканальних структур, які можуть використовуватися при розрахунках і проектуванні нового покоління холодильної техніки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці рекомендацій за розрахунком і конструюванням альтернативних сонячних систем кондиціонування повітря ССКП і охолодження СХС. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в учбовому процесі на кафедрах ОНАПТ в курсах лекцій і практичних занять по нетрадиційній енергетиці в 2010 - 2012 роках.

Особистий вклад здобувача. Особисто здобувачем розроблені схемні рішення альтернативних систем і апаратів для них (СК-регенераторів, абсорберів, випарних охолоджувачів), проведений цикл експериментально-розрахункових досліджень, виконаний аналіз і узагальнення отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації проводилася на IV Всеукраїнському науково-технічному семінарі, ДОНДУЕТ ім. Туган-Барановського «Удосконалення ма-

лої холодопелотехніки і забезпечування нею технологічних процесів» (Донецьк 2010); на I міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2010; на 69-ій науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу ОДАХ, в доповіді «Перспективи застосування газорідинних СК в кондиціонуванні повітря і холодильній техніці» (Одеса, 2012 г)

Публікації. Основні наукові і прикладні результати автора представлені у 5 публікаціях, і 3 доповідях на міжнародних і науково-практичних конференціях.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація викладена на 213 сторінках друкованого тексту, включаючи 133 сторінки основного тексту, 80 сторінок з малюнками і таблицями, і складається з вступу, чотирьох основних розділів, списку літератури з 199 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі та **першому розділі** роботи відображена актуальність проблеми, виконаний аналітичний огляд, що характеризує стан досліджень в світі в даній області і, як перспективний напрям, виділені сонячні системи осушувально-випарного типу з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту, сформульовані цілі і завдання дослідження в теоретичній, експериментальній і прикладній частинах; виявлені і сформульовані наукова новизна і основні результати роботи і визначена її практична цінність.

Другий розділ присвячений розробці схемних рішень багатofункціональних сонячних систем осушувально-випарного типу з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту і тепломасообмінної апаратури (ТМА) для них, а також вибору робочого тіла для осушувального контуру системи. У розділі приведені варіанти розроблених багатofункціональних сонячних систем (у додатку до завдань осушування повітря, кондиціонування повітря ССКП і охолодження середовища СХС) на основі відкритого циклу абсорбції і прямої (безпосередньої) сонячної регенерації абсорбенту. Схеми включають два основні блоки (рис 1) : попереднього осушування повітря, що включає абсорбер-осушувач 4, який забезпечує безперервність циклу осушування повітря і регенерації абсорбенту в сонячному колекторі-регенераторі 2 і блок випарного охолодження у випарному охолоджувачі прямого ПВО або непрямого типу (5) НВО, або градирні. Тепло, необхідне для регенерації абсорбенту забезпечується сонячною системою, а охолодження абсорбера технологічного градирнею ГРН/Т (6). У схемі охолодження абсорбера може використовуватися висесений теплообмінник 7, або це спеціальний водоохолоджуваний абсорбер. На малюнку представлений варіант розробленої схеми, що включає в охолоджувальному блоці НВО (5). В цьому випадку з'являється додаткова можливість використання потенціалу допоміжного повітряного потоку, який покидає НВО (холодного і зволненого потоку) для охолодження осушеного повітряного потоку на лінії абсорбер АБР – НИО в теплообміннику (7). Особливий інтерес представляє схема СХС, де як випарний охолоджувач використовується продуктова градирня. Повітря, що осушене в абсорбері і має низьку температуру точки роси, поступає в градирню ГРН/п, де забезпечується глибоке охолодження води, яка може використовуватися у вентильованих теплообмінниках-охолоджувачах, що встановлюються в приміщеннях (8),

що кондиціонують, або холодильних камерах. Повітряний потік, що покидає ГРН/п, може використовуватися для охолодження повітря після абсорбера. У схемі використовуються всі три типи сонячних колекторів, СК/р, СК/г і СК/г-р. Рідинний СК/р використовується для підігрівання слабкого розчину абсорбенту після абсорбера, що направляється в сонячний колектор регенератор СК/г-р і для потреб гарячого водопостачання. Газовий СК/г використовується для підігрівання повітря, що поступає в об'єкт в ранішні години і для вентиляції приміщення. Газо-рідинний СК/г-р використовується для підтримки безперервності циклу.

Були продовжені раніше виконані в ОДАХ дослідження полімерних рідинних СК/р (рис 2), включаючи: варіанти СК/р без повітряного зазору; варіанти СК/р, з одиничним, подвійним і потрійним прозорим покриттям у складі єдиного багатоканального моноблока із полімерних матеріалів; варіант СК/р з двозахідним абсорбером (теплоприймачем) і прозорого покриття ПП в єдиному триярусному моноблоці. Розміри багатоканальних плит, теплоприймача і ПП, висоти каналів в ПП були прийняті нами за результатами ґрунтового дослідження В. Костенюка. Експериментальний стенд був оснащений приладами для фіксації рівня сонячної активності, вітронавантаження, температури і відносної вологості зовнішнього повітря, і комплектом термомпар, що забезпечує виміри температур у баку-теплоакумуляторі, а також на вході і виході із СК. Випробування проводилися при природній циркуляції теплоносія. Результати приведені на рис. 2 В і Г у вигляді залежності ефективності процесу трансформації сонячної енергії від приведеної температури. Основні висновки: 1. Використання багатоканальної полімерної плити як теплоприймача СК/р дозволили знизити вагу і вартість колектора при незначній втраті продуктивності СК/р, при цьому були уточнені оптимальні розміри каналу теплоприймача. 2. Показано, що використання багатоканальних полімерних плит як прозорого покриття СК дозволяє усунути повітряний зазор, роль якого в пригніченні теплових втрат, обумовлених механізмами конвекції і радіації, бере на себе багатоканальна структура ПП, канали якого заповнені повітрям. 3. Певну роль, при використанні багатоканальних полімерних плит як прозорого покриття СК, грає розташування перегородок між окремими каналами ПП; орієнтація каналів ПП і теплоприймача СК прийнята взаємно перпендикулярною для забезпечення більшої жорсткості конструкції СК в цілому. 4. Певний інтерес викликає конструкція СК/р із двозахідним теплоприймачем (абсорбером); слід зазначити зростаючий гідравлічний опір каналу теплоприймача, що для систем з природною циркуляцією теплоносія може виявитися неприйнятним.

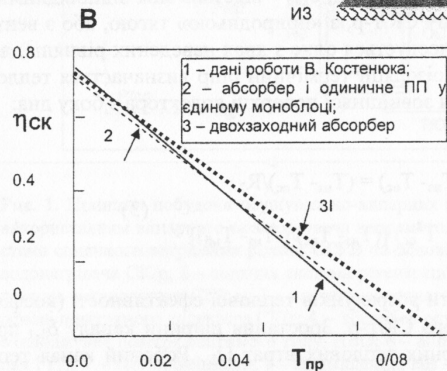
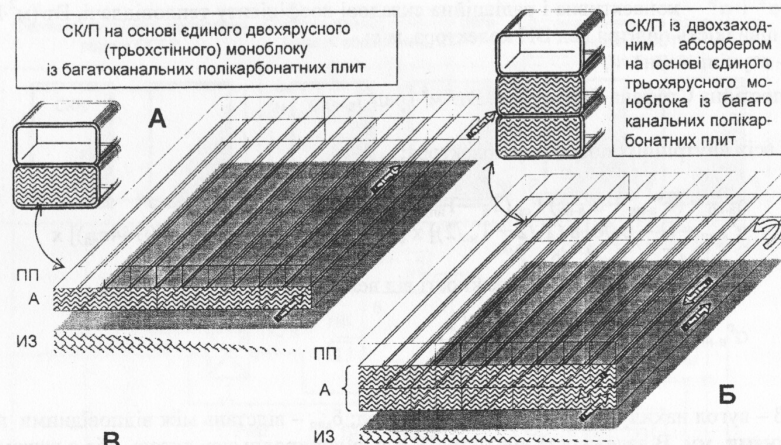
Розроблені сонячні газо-рідинні колектори СК/г-р (рис. 3) у звичайному і вентиляваному варіантах. Для організації руху повітря використовуються малонапірні вентилятори тангенціального типу. СК/г-р є найважливішою частиною системи регенерації (відновлення абсорбенту) і є тепломасообмінним апаратом, в якому рух повітряного потоку забезпечується сонячним розігріванням. Він включає теплоприймач (абсорбер, А), прозоре покриття (ПП) з повітряним зазором між ПП і теплоприймачем (каналом, по якому рухається повітряний потік), і теплоізоляцію дна (ІЗ). Прозоре покриття для зниження теплових втрат може виконуватися багатошаровим, а також включати замкнуті канали. Теплоприймач СК/г-р має U-образну форму, виконаний з алюмінієвого листа з чорним покриттям поверхні і забезпечує

одночасне прогрівання як самого повітряного потоку, так і абсорбенту, що стікає у вигляді тонкої плівки по «дну» теплоприймача під впливом сил гравітації. Багаточасункове розчленовування теплоприймача (рис. 3Б) забезпечує рівномірність прогрівання повітряного потоку і організовує його рух в каналі СК/г-р. Це важливо з причини можливості виникнення значної нерівномірності розподілу повітряного потоку по каналу СК/г-р. Колектор дуже чутливий до коливань інтенсивності сонячної радіації, тому інтерес викликає вентиляований варіант його оформлення. Тут використовується вентилятор тангенціального типу, найбільш зручний для розміщення у вхідній ділянці СК/г-р. Для газо-рідинних колекторів принципово важливе вивчення особливості плівкових течій по похилій поверхні, по якій стікає рідинна плівка сорбенту. Раніше в ОДАХ для вертикальної поверхні було виконано теоретичне і експериментальне вивчення плівкових течій, включаючи такі питання, як режими хвилювання, товщину рідинної плівки і стійкість течій. Питання про стійкість плівкової течії виникає тільки для вентиляованого СК/г-р, де може мати місце значна гідродинамічна взаємодія потоків газу і рідини.

Розроблені принципи конструювання тепломасообмінної апаратури для альтернативних систем (абсорбера-осушувача з внутрішнім випарним охолодженням (АБР/нво) і випарних охолоджувачів води і повітря, як прямого (ПВО), (ГРД), так і непрямого типів (НВО) з використанням пластинчастих керамічних мікропористих багатоканальних структур КППМ.

З використовуваних як абсорбенти речовин, з погляду їх теплофізичних властивостей, найбільш перспективними для осушувального контуру сонячних систем є водні розчини бромистого літію, при цьому доцільно використовувати добавки, що знижують корозійну активність і збільшують розчинність. Для ССКП це розчини LiBr ($H_2O+LiBr$) і $LiBr+(H_2O+LiBr+LiNO_3)$; для досягнення необхідної рушійної сили в ССКП необхідна концентрація LiBr + повинна складати 60-65% при температурі регенерації абсорбенту 40-60 °С.

Третій розділ присвячений вивченню процесів тепломасообміну в осушувальній і охолоджувальній частинах сонячної системи, зокрема, теоретичній і експериментальній розробці перетворювачів сонячної енергії і аналізу процесів абсорбції-десорбції. Виконано математичне моделювання процесів трансформації сонячної енергії в газо-рідинному регенераторі СК/г-р з урахуванням теплових втрат при наступних допущеннях: режим роботи сонячного колектора стаціонарний; градієнтом температури теплоносіїв по периметру каналу можна нехтувати; температура кожного елементу СК/г-р змінюється тільки по напрямку руху теплоносія; властивості матеріалів колектора і теплоносіїв не залежать від температури; поглинання сонячної енергії покриттями колектора не впливає на втрати колектора в цілому.



ККД полімерного СК:
 $\eta_{СК} = f(T_{пр})$, $\eta_{СК} = Q/IF_{СК}$;
 $T_{пр} = [0.5(t_1 + t_2) - t_0]/J$.

де: $\eta_{СК}$ – ККД сонячного колектора; t_1 – температура теплоносія на вході (1) і виході (2) із сонячного колектора СК; t_0 – температура довкілля; J – інтенсивність сонячної радіації; Q – корисна теплова енергія, яка передана теплоносію; $F_{СК}$ – площа прийому сонячної енергії СК; $T_{пр}$ – приведена температура



Рис. 2. Полімерні рідинні сонячні колектори СК/П на основі моноблокових багатоканальних полімерних структур (структура СК/р (А і Б) і дані експериментальних досліджень (В). I, II, III – СК/П у складі абсорбера (теплоприймача), теплоізоляції і прозорого покриття (одиночного, подвійного і потрійного, відповідно) у єдиному моноблоці (Г)

Величини $\delta_{2,3} = 15$ мм і $\delta_{2,2} = 25$ мм (висота і ширина чарунки ПП) можна вважати за оптимальні для формування прозорого покриття СК/г-р. З причини експериментальної складності безпосереднього вивчення процесу регенерації абсорбенту, пов'язаної з необхідністю підготовки розчину LiBr і підтримки початкової концентрації розчину, вивчення процесу десорбції імітувалося на основі процесу випарювання води, що стікає по теплоприймачу СК/г-р в протитечії з повітряним потоком. Експериментальні дані по СК/г-р представлені на рис. 5В, як зміну вологовмісту повітряного потоку, що виносить вологу при регенерації абсорбенту. Вентильований СК/г-р істотно ефективніше невентильованого варіанту колектора (рис. 5Г) і його робота менш чутлива до можливих коливань сонячної активності.

Спільною вимогою до тепломасообмінної апаратури (ТМА) для сонячних систем, що розробляються, є: висока інтенсивність процесів, які відбуваються, малий аеродинамічний опір при транспорті робочих речовин; широкий діапазон робочих навантажень по газу і рідині, в якому робота ТМА є стійкою; відсутність забруднень робочих поверхонь або їх руйнування в процесі тривалої експлуатації. На підставі багаторічного досвіду, накопиченого в ОДАХ автором був вибрано, як основне універсальне рішення для всіх ТМА альтернативних систем, плівковий тип апарату, що забезпечує роздільний рух потоків газу і рідини при малому аеродинамічному опорі і поперечноточна схема контакту потоків, як найбільш прийнятна в разі спільної компоновки багаточисельних ТМА і Т/О в єдиному блоці апаратури. Новим є використання керамічних блоків з багатоканальною пористою структурою (капілярно-пористий матеріал КПМ) для організації шару насадки всіх ТМА, що входять до складу осушувальної (абсорбер-осушувач) і охолоджувальної частини сонячних систем (випарні охолоджувачі газів і рідин як прямого, так і непрямого типів). Розроблені ТМА охолоджувального контуру (випарні повітря- і водоохолоджувачі прямого ПВО і ГРД, і непрямого типа НВО) і абсорбер-осушувач повітря АБР/ніо. Насадка ТМА утворена вертикально встановленими елементами у вигляді ребристих пластинчастих багатоканальних структур з мікропористою кераміки КПМ, заповнених водою, між якими рухається повітряний потік. Плити встановлені еквідистантно один одному і їх канали розташовані вертикально, або горизонтально. Вся зовнішня поверхня такої пластини змочена рідиною і процес тепломасообміну йде частково із заглибленої в стінки каналу рідини. Це дозволяє уникнути поганого розподілу рідини по поверхні насадки, що частково виключає частку її поверхні з процесу тепломасообміну і понизити краплеунесення. По такій же схемі вирішений і випарний охолоджувач води (ГРД). У НВО повний повітряний потік («П») на вході в апарат ділиться на «основний» («О») і «допоміжний» («В») потоки. Допоміжний повітряний потік вступає в безпосередній контакт з рідиною, проникаючи через мікропори керамічної пластини в «мокрі» канали, де і відбувається процес випарного охолодження маси рідини, що знаходиться в порожнинах «мокрої» частки охолоджувача; у «сухих» каналах, що чергуються з «мокрими» каналами, рухається основний повітряний потік, що охолоджується при незмінному вологовмісті. «Сухі» канали НВО утворені тонкостінними металевими пластинами (багатоканальними плитами). Величина еквівалентного діаметру каналів насадки: $d_э = 15-20$ мм; значення величин еквівалентних діаметрів для багатоканальної плити і міжканального простору (канал між елементами, в якому реалізується процес тепломасообміну) стосовно НВО од-

накові. Математична модель процесів випарного охолодження (конденсації) в прямому випарному охолоджувачі представляється системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dt_{\text{ж}}}{dx} = a_1 \cdot (t_{\text{r}} - t_{\text{ж}}) + b_1 \cdot (p_{\text{r}} - p^*) \\ \frac{dt_{\text{r}}}{dz} = a_2 \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{r}}) & \frac{dp_{\text{r}}}{dz} = b_2 \cdot (p^* - p_{\text{r}}) \end{cases} \quad (4)$$

і граничних умов: при $x=0$, $t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}}^0$; при $z=0$, $t_{\text{r}} = t_{\text{r}}^0$, $p_{\text{r}} = p_{\text{r}}^0$. (5). Ці рівняння апроксимуються наступною різницевою схемою:

$$\begin{cases} t_{\text{ж}}^{i,k+1} = [1 - a_1 \cdot \Delta x \cdot t_{\text{ж}}^{i,k}] + a_1 \cdot \Delta x \cdot t_{\text{r}}^{i,k} + b_1 \cdot \Delta x \cdot p_{\text{r}}^{i,k} - b_1 \cdot \Delta x \cdot p^*(t_{\text{ж}}^{i,k}) \\ t_{\text{r}}^{i,k+1} = (1 - a_2 \cdot \Delta z \cdot t_{\text{r}}^{i,k}) + a_2 \cdot \Delta z \cdot t_{\text{ж}}^{i,k} \\ p_{\text{r}}^{i,k+1} = (1 - b_2 \cdot \Delta z \cdot p_{\text{r}}^{i,k}) + b_2 \cdot \Delta z \cdot p^*(t_{\text{ж}}^{i,k}) \end{cases} \quad (6)$$

для граничних вузлових точок: $t_{\text{ж}}^{0,k} = t_{\text{ж}}^0$, $t_{\text{r}}^{1,0} = t_{\text{r}}^0$, $p_{\text{r}}^{1,0} = p_{\text{r}}^0$.

Стенд забезпечує можливість вивчення робочих процесів: у випарному охолоджувачі води (градирня, ГРД) і охолоджувачі повітря прямого і непрямого типів (ПВО і НВО). Габарити камери: 460×400×180 мм (ширина), пропускна спроможність по повному повітряному потоку до 3500 м³/г по газу. У складі стенду передбачений додатковий контур для виміру затримки рідини в шарі насадки, що обумовлено використанням капілярно-пористих структур і труднощами визначення реальних поверхонь перенесення в шарі насадки.

Гидроаеродинамічні характеристики: збільшення витрати рідини в діапазоні значень $G_{\text{ж}}$ від «сухого» режиму до значення щільності зрошування $q_{\text{ж}} = 10 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{г}$ не приводить до відчутного зростання втрати тиску при проходженні повітряного потоку через «мокру» частку насадки НВО, що обумовлено практичною відсутністю рідинної плівки на поверхнях каналів; традиційне явище «захливання» (винесення рідини з насадки апарату газовим потоком і зниження до нуля пропускної спроможності апарату) для прийнятої поперечної схеми відсутнє повністю, аж до значень $w_2 > 8-10 \text{ м/с}$; явище подовжнього зносу рідини, що приводить до несприятливого її перерозподілу в об'ємі насадки і винесення з шару, також відсутнє; перехід до поперечної схеми забезпечує зниження рівня Δp , а, отже і зниження питомих енерговитрат, в порівнянні з протитечією, і можливість значного підвищення навантажень; затримка рідини в шарі насадки реально забезпечує високе значення поверхні тепломасообміну, і, тим самим, достатньо високу ефективність процесу випарного охолодження. Вперше визначена затримка рідини в шарі насадки НВО залежно від витрат води і повітря. Накопичення рідини в об'ємі насадки відбувається практично миттєво і так формується спільна поверхня тепломасообміну. У роботі використаний циркуляційний метод визначення затримки рідини в шарі насадки, за-

снований на принципі збереження кількості рідини при роботі по замкнутому контурі.

Процес охолодження в ПВО протікає при незмінному значенні ентальпії повітряного потоку ($h = \text{const}$, рис. 6А). Зміна стану основного повітряного потоку в НВО протікає при незмінному вологовмісті ($x = \text{const}$), допоміжний повітряний потік змінює як вологовміст, так і температуру, причому він покидає апарат охолодженням, що може бути використане в рамках спільної схеми, для охолодження, наприклад, повітряного потоку, що поступає або покидає абсорбер (рис. 6Б). Ступінь наближення до природної межі охолодження, температури $t_{\text{м}}^1$, складає для ВО прямого типа 3-5 град. (3-4 град для ПВО і 4-5 град. для градирни ГРД), для повітряних потоків в НВО приблизно 3 град., причому межа охолодження в середньому складає величину $t_{\text{м}}^1 + 2-3$ град.

Для НВО в межах експерименту співвідношення витрат основного і допоміжного повітряних потоків складало $l = G_0 / G_B = 1,0$. Величина затримки рідини для насадки з КПМ мало залежить від швидкості газового потоку і витрати рідини, оскільки практично відразу ж по заповненню «мокрих» каналів насадки водою, стінки капілярно-пористих пластин просочуються рідиною і процес випарювання реалізується безпосередньо з поверхні змочених пластин. Термічна ефективність НВО по основному і допоміжному повітряним потокам визначається виразами:

$$E_0 = (t_0^1 - t_0^2) / (t_0^1 - t_0^0); \quad E_B = (t_B^1 - t_B^2) / (t_B^1 - t_0^0),$$

і складає в середньому діапазон значень $E_0 = 0.6-0.9$, що вище набутих раніше значень ефективності процесу на насадках плівкового типа з багатоканальних полікарбонатних плит ($E_A = 0.55-0.75$). Це визначається високою величиною затримки рідини. Із зростанням вологовмісту зовнішнього повітря ефективність процесу E_0 знижується і збільшується із зростанням температури повітряного потоку на вході в апарат. Термічна ефективність НВО по допоміжному повітряному потоку в середньому на 10-15% вище, ніж по основному потоку, що говорить про можливість збільшення робочого діапазону величини $l = G_0 / G_B$ при розрахунку і проектуванні НВО.

Результати вивчення процесу випарного охолодження води приведені у вигляді залежності ефективності процесу (ступені охолодження води в градирні) від характеристичного числа $\Lambda = 1 / I_{\text{м}}$, де $l = G_{\text{r}} / G_{\text{ж}}$ (рис. 5А), при цьому щільність зрошування складала $q_{\text{ж}} = 5-18 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{г}$. Можна бачити, що, порівняно до раніше отриманих результатам в роботі А. Дорошенка на насадках з алюмінієвої фольги, і РН з багатоканальних полікарбонатних плит, ефективність процесу істотно зростає. Отримані результати можуть бути описані рівняннями:

$$E_{\text{ж}} = c (1 - e^{-1.1 \Lambda}), \quad E_{\text{r}} = c (1 - e^{-1.1 \Lambda}) \Lambda^{-1} \quad (7)$$

Значення постійної величини «с» в цих рівняннях, в середньому, складає: $c = 0.88-0.9$, (для ГРД з насадкою з алюмінієвої фольги $c = 0.82-0.84$; для насадок з полімерних матеріалів $c = 0.86-0.87$).). Збільшення показника для ТМА з КПМ за-

безпечує реальне зростання поверхні перенесення в одиниці об'єму шару насадки за рахунок затримки рідини.

У абсорбері з внутрішнім випарним охолодженням АБР/нво рідина через пори розподільної мікропористої керамічної стінки проникає в допоміжний повітряний потік; охолоджена вода відводить тепло з сусідніх каналів абсорбера, що чергуються, через металеву розділяючу стінку, аналогічно тому, як це вирішується в НВО. Таке рішення приводить до підвищення ізотермічності процесу абсорбції а, отже, і до зростання його ефективності. Реальний процес протікає завжди з деяким зростанням температури осушуваного повітряного потоку (рис. 6А), що пов'язано з оптимізацією енерговитрат на роботу технологічної градирні ГРД/т, що обслуговує абсорбер. На підставі виконаного аналізу зроблений висновок про перспективність використання розчинів LiBr як робочої речовини в сонячних системах; розчин LiBr є найбільш переважним з погляду надійності експлуатації ТМА; орієнтовний робочий інтервал концентрацій цього розчину складає 60-65%. Отримані результати ілюструються на рис. 5Б у вигляді залежностей зміни вологовмісту повітря в АБР $x^1_{г}$ для різних значень початкового вологовмісту повітря $x^1_{г}$. Приведена концентрація розчину ξ^* це відношення робочої концентрації до граничної можливої, відповідної лінії кристалізації розчину. Із зростанням концентрації розчину абсорбенту, при тому ж значенні інтенсивності сонячної радіації, ефективність процесу десорбції зростає. Ступінь осушування повітряного потоку, як свідчать отримані результати, при вологовмісті $x^1_{г} = 16$ г/кг, характерному для території України, цілком забезпечує отримання комфортних параметрів повітря методами випарного охолодження. При вищих значеннях $x^1_{г}$ завдання вирішується шляхом використання потенціалу допоміжного повітряного потоку, який покидає НВО.

Четвертий розділ присвячений аналізу принципів можливостей осушно-випарних систем (рис. 6). Для сухого клімату ($x_r < 12,5$ г/кг) попереднє осушування повітря не потрібне і комфортні параметри повітря можуть забезпечуватися тільки випарним охолодженням з використанням повітроохолоджувачів ПВО або НВО (ССКП), або градирні ГРД (СХС). На діаграмі Н-Т вологого повітря показані можливості ССКП для умов $t^1_{в} 35^{\circ}\text{C}$, $x^1_{в} 15$ г/кг (точка Б), які відповідають клімату України і де завдання цілком вирішується використанням НВО. Для важчих умов по початковому вологовмісту $t^1_{в} 35^{\circ}\text{C}$, $x^1_{в} 20$ г/кг (точка А), або високій температурі $t^1_{в}$ в схему може бути введений теплообмінник охолодження повітря перед абсорбером з використанням холодного допоміжного повітряного потоку, який покидає НВО (точка 5). Видно, що процес осушування в абсорбері протікає з деяким зростанням температури. Для систем охолодження СХС розроблені рішення забезпечують отримання заохолодженої води з температурою 6-8 $^{\circ}\text{C}$. Блок охолодження побудований на ТМА поперечноточного типу, що забезпечує «лінійність» схеми перебігу потоків і мінімізує енерговитрати на їх переміщення. Сумарний рівень втрат тиску не перевищує 120Па, що дозволяє використовувати вентилятори осьового типу.

На основі методології «повного життєвого циклу, ПЖЦ» виконаний порівняльний аналіз розроблених систем.

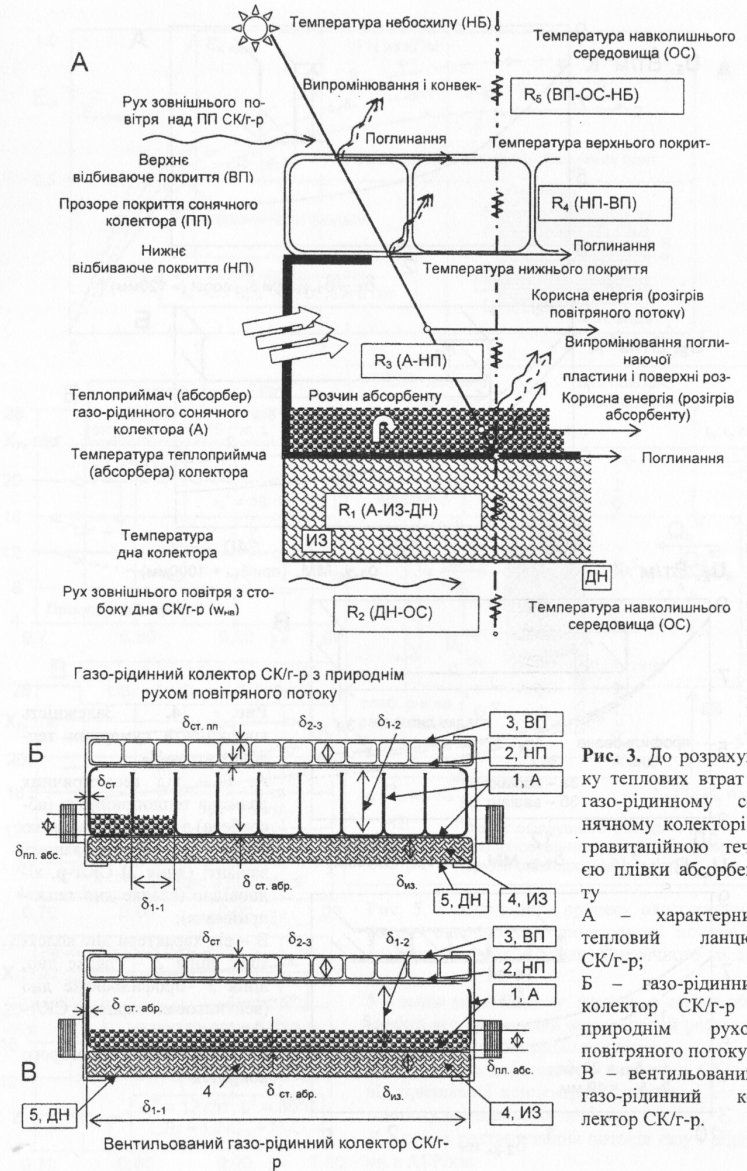


Рис. 3. До розрахунку теплових втрат у газорідинному сонячному колекторі з гравітаційною течією півки абсорбенту А – характерний тепловий ланцюг СК/г-р; Б – газорідинний колектор СК/г-р з природним рухом повітряного потоку; В – вентиляований газорідинний колектор СК/г-р.

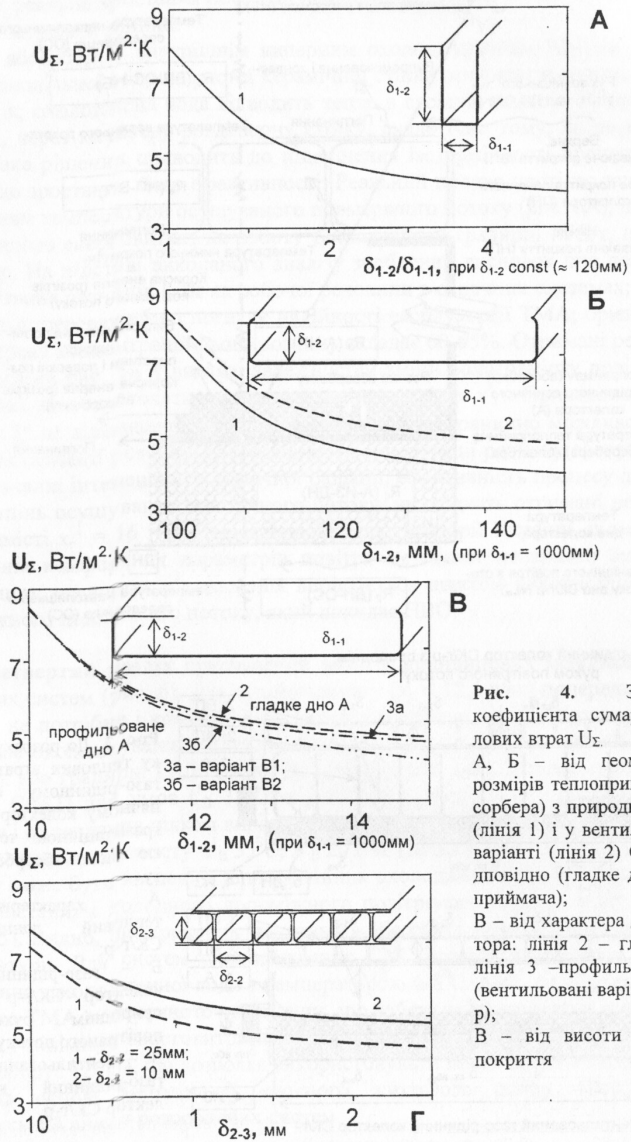


Рис. 4. Залежність коефіцієнта сумарних теплових втрат U_{Σ} . А, Б – від геометричних розмірів теплоприймача (абсорбера) з природною тягою (лінія 1) і у вентиляваному варіанті (лінія 2) СК/г-р, відповідно (гладке дно теплоприймача); В – від характеру дна колектора: лінія 2 – гладке дно; лінія 3 – профільоване дно (вентильовані варіанти СК/г-р); В – від висоти прозорого покриття

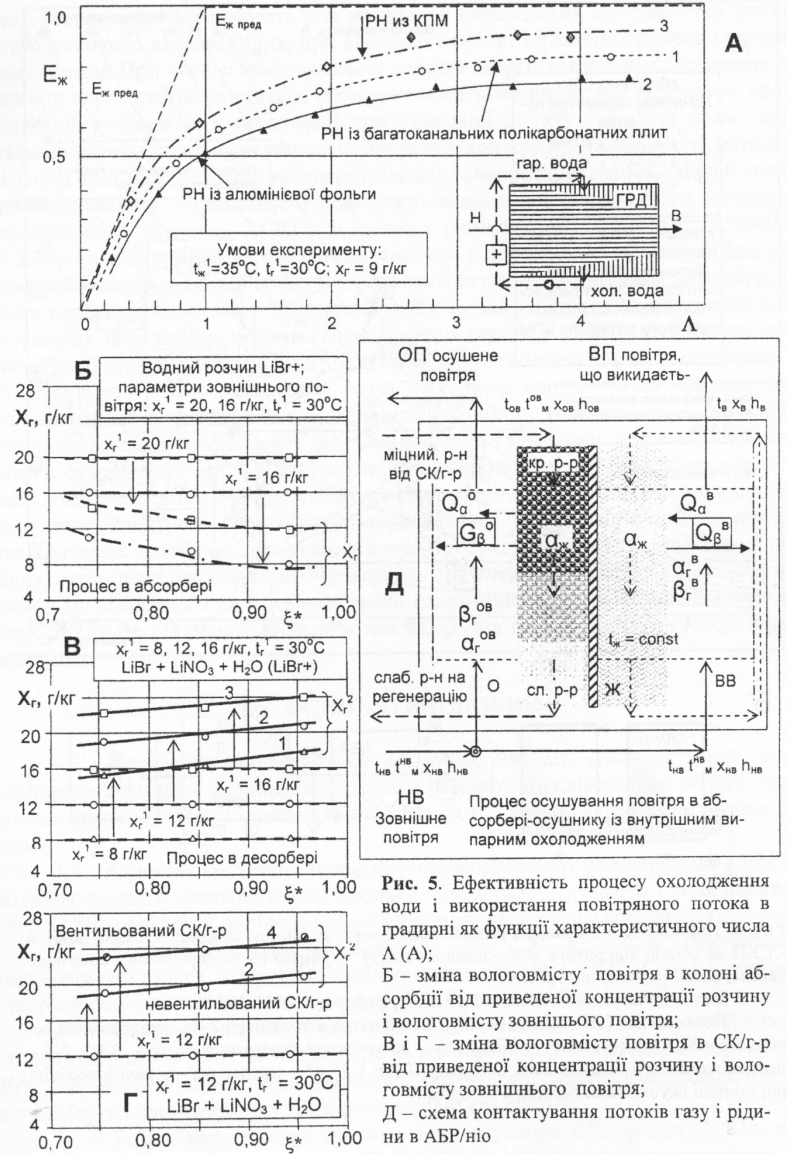


Рис. 5. Ефективність процесу охолодження води і використання повітряного потоку в градирні як функції характеристичного числа Λ (А); Б – зміна вологовмісту повітря в колоні абсорбції від приведеної концентрації розчину і вологовмісту зовнішнього повітря; В і Г – зміна вологовмісту повітря в СК/г-р від приведеної концентрації розчину і вологовмісту зовнішнього повітря; Д – схема контактування потоків газу і рідини в АБР/ніо

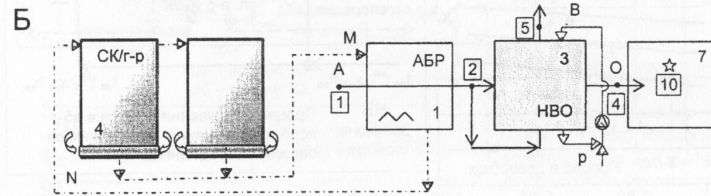
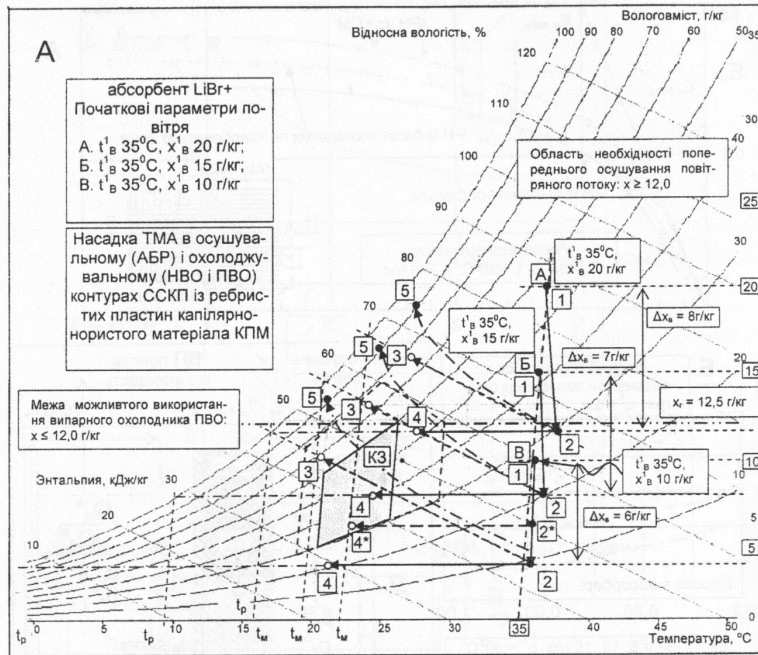


Рис. 6. Принципові можливості розроблених сонячних систем кондиціонування повітря ССКП на основі відкритого абсорбційного циклу з прямою (безпосередньою) сонячною регенерацією розчину абсорбента.

Вплив початкового вологовмісту повітря (формула АБР-НІО).

Позначення: 1-2 – процес осушування повітря в абсорбері; 2-4 – охолодження основного повітряного потоку в НВО; 2-5 – допоміжний повітряний потік у НВО; 2-3 – процес випарного охолодження повітря у ПВО; 1-2*-4* – процес регулювання необхідної ступені осушування повітря в абсорбері

Методологія заснована на стандартах ISO (14040, 14041, 14042 і 14043). Методику розрахунку застосовують для виявлення потенційних можливостей зниження антропогенного навантаження, при вивченні і виборі варіантних рішень альтернативних систем. При аналізі враховуються: витрата енергії і виділення шкідливих речовин при виробництві матеріалів, споживання енергії і витратних матеріалів при експлуатації, а також витрати енергії при утилізації об'єкту і супутні цьому викиди шкідливих речовин. Розрахунок усіх вибраних критеріїв заснований на методології ECO-INDICATOR 99. При виконанні аналізу, використовувалися середні дані для країн Євросоюзу. Представлені результати виконаного екологічного аналізу двох порівнюваних варіантів ССКП, з прямою регенерацією абсорбенту ССКП/пр і ССКП/н.пр з непрямою регенерацією. Системи відрізняються конфігурацією і складом необхідного устаткування: у ССКП/пр відсутній традиційний десорбер, і, замість сонячних колекторів СК/р використовуються газо-рідинні колектори СК/г-р. Результати дозволяють зробити висновок про перевагу ССКП/пр. Система прямої регенерації надає істотно меншу шкідливу дію на навколишнє середовище, чим ССКП/н.пр по всіх порівнюваних категоріях. Вона приводить до меншого виснаження природних ресурсів (в т.ч. і енергоресурсів), що говорить про її більшу енергетичну ефективність і вносить менший вклад до глобальної зміни клімату. Висока енергоефективність і низький вклад в глобальне потепління безпосередньо зв'язані один з одним, оскільки найбільший вклад до зміни клімату вносять викиди CO₂ від споживаної електроенергії. Вибір альтернативного устаткування по двох аналізованих критеріях (вплив на виснаження природних ресурсів і вклад в глобальне потепління) сприятиме реалізації закону України про енергозбереження і Кіотського протоколу (направленого на зниження емісії парникових газів). Спільна екологічна дія для ССКП/н.пр так само більше, ніж для ССКП/пр, що ще раз підтверджує переваги останньої.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Практичне використання випарних методів охолодження вимагає вирішення декількох принципових питань: розширення кліматичної області використання самих методів, підвищення компактності і зниження енергоспоживання систем.
2. Сонячна система з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту дозволяє знизити енерговитрати, оскільки традиційний десорбер і сонячна система нагріву теплоносія тут замінюється сонячним регенератором абсорбенту.
3. Розроблені схемні вирішення ССКП і СХС на основі сонячних колекторів-регенераторів СК/г-р забезпечують автономність ССКП (СХС) і дозволяють створити сонячну багатофункціональну систему життєзабезпечення.
4. Рекомендований розчин LiBr+ (H₂O+LiBr+LiNO₃) переважний з погляду ступеня осушення повітря і необхідної температури регенерації абсорбенту (50-70°C), що досягається, а також надійності експлуатації; експериментально показано, що необхідна концентрація LiBr повинна складати 60-70%.
5. Розроблені сонячні колектори-регенератори СК/г-р для ССКП, що забезпечують відновлення концентрації абсорбенту і підтримку безперервності циклу

тільки на основі сонячної енергії, що забезпечує як необхідне підведення тепла, так і рух повітряного потоку над поверхнею абсорбенту, що стікає у вигляді рідинної плівки по внутрішній поверхні СК/г-р.

6. Особливий інтерес для створення ССКП і СХС мають випарні охолоджувачі непрямого типу НВО, в яких охолодження повітря досягається без прямого контакту з водою і випарні охолоджувачі води ГРД (градирні); розроблені випарні охолоджувачі на основі апаратів плівкового типу з багатоканальною багатопаровою структурою насадки з КПМ і роздільного руху потоків газу і рідини.

7. Розроблена ССКП (СХС) цілком вирішує задачу забезпечення параметрів комфортності у всьому діапазоні параметрів зовнішнього повітря, який розглянуто, ($x_r = 13-20$ г/кг, при $t = 25-40^{\circ}\text{C}$, тобто за найважчих зовнішніх умов).

8. Результати порівняння осушувально-випарного кондиціонера ССКП з традиційним кондиціонером парокомпресійного типу, показали, що ССКП дозволяє знизити енерговитрати в середньому на 35-40%.

9. Виконаний загальний екологічний аналіз альтернативних рішень в області кондиціонування систем ССКП з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл». Показано, що система прямої регенерації завдає істотно меншу шкідливу дію на навколишнє середовище, чим ССКП/н.пр по всіх порівнюваних категоріях; вона призводить до меншого виснаження природних ресурсів (в т.ч. і енергоресурсів), що говорить про її більшу енергетичну ефективність і вносить менший внесок до глобальної зміни клімату.

ПУБЛИКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дорошенко А.В., Силич С.С. Разработка многофункциональных альтернативных энергетических систем на основе газовых, жидкостных и газожидкостных солнечных коллекторов // Холодильная техника и технология. - 2010. - №6 (128). – С. 28-34. *Особистий внесок автора : аналіз напрямків розвитку альтернативних холодильних систем та формулювання задач дослідження.*
2. Дорошенко А.В., Силич С.С., Многофункциональные солнечные системы тепло-хладоснабжения. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE, Moldova, Academia de Stiinte, Institutul de Energetica, 3(14) 2010, стр. 44-52. *Особистий внесок: аналіз роботи сонячної холодильної системи та сонячних колекторів.*
3. Дорошенко О.В., Силич С.С. Многофункциональные солнечные системы на основе газожидкостных солнечных коллекторов // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. збірник наукових праць. Донецьк. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Тугана-Барановського. Випуск 24, Донецьк. 2010. – С. 170-180. *Особистий внесок: аналіз роботи сонячної холодильної системи.*
4. Дорошенко А.В., Милованов В.И., Силич С.С. Многофункциональные солнечные системы на основе газожидкостных солнечных коллекторов // Холодильная техника и технология. - 2012. - №1 (135). – С. 49-57. *Особистий внесок: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментального дослідження.*
5. Дорошенко А.В., Милованов В.И., Силич С.С. Разработка газожидкостных солнечных коллекторов для альтернативных холодильных систем. //

Холодильная техника и технология. - 2013. - №1 (141). – С.17-23. *Особистий внесок: проведення експериментального дослідження, аналіз роботи сонячних колекторів.*

АННОТАЦИЯ

Силич С.С. Многофункциональные солнечные системы на основе газожидкостных коллекторов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2013

Диссертация посвящена развитию научных и инженерных основ создания многофункциональных солнечных систем с использованием методов испарительного охлаждения сред. Наиболее перспективно включение испарительных охладителей в состав осушительно-испарительных систем на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента. Это позволяет снизить энергозатраты, поскольку традиционный десорбер и солнечная система нагрева теплоносителя здесь заменяется солнечным коллектором-регенератором абсорбента.

Разработаны схемные решения солнечных холодильных (СХС) и кондиционирующих систем (ССКВ) на основе газожидкостных солнечных коллекторов-регенераторов СК/г-ж (прямая регенерация абсорбента), что позволяет создать автономную солнечную многофункциональную систему жизнеобеспечения. Новое поколение СК/г-ж, являясь, в отличие от традиционных СК, тепломаассобменным аппаратом, обеспечивает восстановление концентрации абсорбента и поддержание непрерывности цикла на основе солнечной энергии, обеспечивающей как подвод необходимого тепла для регенерации абсорбента, так и движение воздушного потока над поверхностью абсорбента, гравитационно стекающего в виде жидкостной пленки по поверхности теплопремника СК/г-ж. Выполнено математическое моделирование процессов трансформации солнечной энергии в СК/г-ж, где тепловые потери обусловлены механизмами конвекции и радиации нагретых элементов СК/г-ж, а также экспериментальное изучение процесса восстановления абсорбента (изменения влагосодержания воздуха в абсорбере) в зависимости от приведенной концентрации раствора абсорбента ξ^* (отношение рабочей концентрации к предельно возможной, соответствующей линии кристаллизации раствора) и температуры наружного воздуха. Разработана тепломаассобменная аппаратура для осушительного (абсорбер с внутренним испарительным охлаждением АБР/нио) и охладительного контуров (испарительные воздухоохладители прямого и непрямого типов ПИО и НИО и градирня ГРД) на основе аппаратов пленочного типа с многоканальной структурой из капиллярно-пористой керамики КПМ и раздельным движением потоков газа и жидкости. Выполнено моделирование процессов совместного тепломаассопереноса в ИО и экспериментальное исследование ПИО, НИО, градирен ГРД, а также процесса осушения воздушного потока в АБР/нио. В качестве абсорбента рекомендован раствор $\text{LiBr} + (\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3)$, предпочтительный с точки зрения достигаемой степени осушения воздуха и требуемой температуры регенерации абсорбента, а также надежности эксплуатации. Разработанная ССКВ решает задачи обеспечения пара-

метров комфортности во всем рассмотренном диапазоне параметров наружного воздуха (до $x_r = 20$ г/кг, при t до 40°C , то есть при самых тяжелых внешних условиях), при этом температура десорбции не превышает $60-70^{\circ}\text{C}$.

Выполнен экологический анализ альтернативных решений с использованием методологии «Полный жизненный цикл» (Life Cycle Assessment, международные стандарты ISO (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043, «eco-indicator 99», база данных программы «SimaPro-6»). Разработанная система прямой регенерации оказывает существенно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, чем ССКВ с непрямой регенерацией по всем сравниваемым категориям; она приводит к меньшему истощению природных ресурсов (в т.ч. и энергоресурсов), что говорит о ее большей энергетической эффективности и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата.

Ключевые слова: солнечная система, коллектор-регенератор, абсорбция-десорбция, испарительное охлаждение, гидродинамика, тепломассообмен, воздухоохладитель, градирня, экологическое влияние

АНОТАЦІЯ

Сіліч С.С. Багатофункціональні сонячні системи на основі газо-рідинних колекторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна і компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2013.

Дисертація присвячена розвитку наукових і інженерних основ створення багатофункціональних сонячних систем з використанням методів випарного охолодження середовища. Розроблені схемні рішення сонячних холодильних і систем кондиціонування повітря на основі газо-рідинних сонячних колекторів-регенераторів. Нове покоління колекторів забезпечує відновлення концентрації абсорбенту і підтримка безперервності циклу на основі сонячної енергії. Виконано математичне моделювання процесів трансформації сонячної енергії, а також експериментальне вивчення процесу відновлення абсорбенту, залежно від приведеної концентрації розчину абсорбенту і температури зовнішнього повітря. Розроблена тепломасообмінна апаратура для осушувального і охолоджувального контурів на основі апаратів з багатоканальною структурою з капілярно-пористої кераміки. Виконано експериментальне дослідження процесів спільного тепломасопереносу у випарних охолоджувачах і процесу осушення повітряного потоку в абсорбері. Розроблена сонячна система вирішує завдання забезпечення параметрів комфортності, при цьому температура десорбції не перевищує $60-70^{\circ}\text{C}$. Розроблена система прямої регенерації надає істотно меншу шкідливу дію на навколишнє середовище, чим система з непрямую регенерацію і приводить до меншого виснаження природних ресурсів, що говорить про її більшу енергетичну ефективність і вносить менший вклад до глобальної зміни клімату.

Ключові слова: сонячна система, колектор, абсорбція, десорбція, випарне охолодження, гидродинаміка, тепломасообмін, повітроохолоджувач, градирня, екологічний вплив

ABSTRACT

Silich S. S. Multifunctional solar systems on the basis of gas-liquid collectors. – Manuscript

The dissertation is devoted to the development of the scientific and engineering fundamentals of the creation of multi-functional solar systems using the methods evaporation cooling media. Developed scheme solutions of solar cooling and systems of the air-conditioning on the basis of gas-liquid solar collector-regenerators. A new generation of collectors ensures the recovery of the concentration of the absorbent and maintaining the continuity of the cycle on the basis of solar energy. Performed mathematical modeling of the processes of transformation of the solar energy, as well as the experimental study of the recovery process regeneration of absorbent, depending on the concentration of the solution of absorbent and so-available outdoor air. Developed heat-mass-transfer equipment for solar systems on the basis of a spacecraft with a multi-channel structure of capillary-porous ceramics. Performed experimental investigation to the joint processes of heat and mass transfer in evaporation cooling and the process of drying of the air flow in dust absorber. Developed by the solar system solves the task of ensuring the parameters of comfort, while the temperature of the temperature desorption does not exceed $60-70^{\circ}\text{C}$. The developed system of direct regeneration has considerably less harmful to the environment than the system with indirect regeneration and causes less depletion of natural resources, which speaks to its greater energy efficiency and makes a lower contribution to global change the climate.

Key words: solar system, collector, absorption, desorption, evaporation cooling, hydrodynamics, heat-mass-transfer, cooling tower, environmental impact

Підписано до друку 24.04.2013 р.
Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. № 14. Тираж 100 прим.

Надруковано ТОВ "Зовнішрекламсервіс"
65011, м.Одеса, вул. Успенська, 40.
тел. 37-70-76, 777-70-76