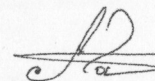


Автореферат
Г69

g

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ГОРІН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 536.248.2: 532.529.5

**АЛЬТЕРНАТИВНІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ
І КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ З ВИКОРИСТАННЯМ
ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ**

Спеціальність

05.05.14 – «Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса - 2007

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: д. т. н., професор, заслужений діяч науки і техніки України
Чепурненко Віктор Павлович,
професор кафедри холодильних установок Одеської державної академії холоду МОН України

Офіційні опоненти: д.т.н., професор
Кирилов Володимир Харитонович,
зав. кафедрою інформаційних технологій
Одеського національного морського університету МОН України;

д.т.н. професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
зав. кафедрою теплоенергетики
Вінницького національного технічного університету МОН України;

д.т.н., професор
Скрипніков Веніамін Борисович,
професор кафедри опалення, вентиляції і якості повітряного середовища
Придніпровської державної академії будівництва та архітектури МОН України

Провідна установа: Одеський національний політехнічний університет МОН України

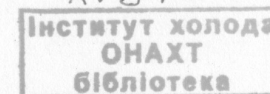
Захист дисертації відбудеться «21» 05 2007 року о 13⁰⁰ годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна

Копію можна ознайомитися у бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна

«18» 04 2007 року

Мілованов В.І

1



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Взаємопов'язані проблеми енергетики та екології, що поглиблюються, висувають нові вимоги до холодильних систем і систем комфортного та технологічного кондиціонування повітря, в першу чергу, зниження енерговитрат і антропогенного впливу на навколишнє середовище. До найбільш перспективного і довгострокового рішення цих проблем відноситься створення альтернативних систем на основі нетрадиційних джерел енергії та випарних методів охолодження середовищ. Широке практичне використання випарних методів у холодильній техніці та системах кондиціонування повітря (СКП) вимагає вирішення принципових питань: розширення кліматичної області використання самих методів, підвищення компактності і зниження енергоспоживання тепломасообмінних апаратів (ТМА), що входять у такі системи. Найбільш перспективно включення випарних охолодників у склад випарно-парокомпресійних систем (двохступеневі охолодники з використанням випарного охолодника на першому ступені і парокомпресійного на другому) і сонячних холодильних систем (осушувально-випарних, основаних на відкритому абсорбційному циклі і сонячній регенерації абсорбентів).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно із законодавчими актами: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94 р. 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).

Ціль і задачі дослідження. Ціллю роботи є удосконалення холодильних і кондиціонуючих систем на основі використання у них методів випарного охолодження середовищ, що забезпечує зниження енерговитрат і покращення екологічних характеристик. Для її досягнення необхідні: розробка нових схемних рішень і удосконалення апаратів випарного охолодження, для використання, як в автономному вигляді так і у складі випарно - парокомпресійних та осушувально-випарних систем; створення уніфікованої компактної тепломасообмінної апаратури (випарного охолодника, абсорбера - осушувача, десорбера-регенератора), що забезпечує мінімізацію енерговитрат на рух теплоносіїв; моделювання робочих процесів з урахуванням особливостей плівкових течій у ТМА; створення основ інженерного розрахунку альтернативних систем; проведення експериментального дослідження альтернативних систем: випарних охолодників, комбінованих випарно - парокомпре-

сійних та осушувально - випарних систем, і одержання залежностей і рекомендацій, що забезпечують розрахунок і конструювання альтернативних СКП та холодильних систем (ХС); екологічне обґрунтування нових рішень.

Стосовно до випарно - парокompресійних систем: розробка схемних рішень на основі сумісної роботи випарного охолодника і парокompресійної холодильної машини (ХМ), що забезпечує раціональне сполучення природних і штучних методів охолодження; зниження витрати води на підживлення випарного контуру непрямого випарного охолодника (НВО); зниження енерговитрат і покращення екологічних характеристик комбінованих систем. Стосовно до сонячних осушувально-випарних систем: розробка схемних рішень на основі відкритого абсорбційного циклу (АБС.) із сонячною регенерацією абсорбенту; підбор робочих тіл (композитів), що забезпечують високу поглинаючу здатність, при мінімальному несприятливому впливі на конструкційні матеріали; створення ефективного нагрівального контуру для регенерації абсорбенту, що пов'язано, в першу чергу, з розробкою ефективних сонячних колекторів, здатних забезпечити температурний рівень регенерації абсорбенту, який потрібен.

Об'єктом дослідження є альтернативні системи охолодження і кондиціонування повітря.

Предметом дослідження є процеси тепломасообміну в альтернативних системах.

Методи дослідження: теоретичне вивчення, експериментальне дослідження на натурних зразках тепломасообмінних апаратів ТМА.

В дисертації захищаються **наукові положення:**

1. Використання випарних охолодників у складі випарно - парокompресійних (як першого ступеня охолодника) і осушувально - випарних (на основі відкритого абсорбційного циклу і сонячної регенерації абсорбенту, - як холодильної частини) систем дозволяє зняти кліматичні обмеження щодо використання випарних методів і істотно покращити енергетичні (в порівнянні з традиційними парокompресійними системами забезпечується зниження енерговитрат на 30-60%) та екологічні показники альтернативних систем.

2. Загальній екологічний вплив альтернативної системи складає до 65% від впливу традиційної системи; найбільший вплив призводиться під час експлуатації системи (близько 80% від внеску за весь життєвий цикл), внесок у загальний екологічний вплив періоду виробництва складає близько 20%, а внесок періоду утилізації незначний – біля 0.1%; час повернення енергії суттєво залежить від матеріалів, які використовуються в конструкції апаратів і сценарію рециркуляції, що використовуються (стадії переробки відходів).

Наукова новизна роботи визначається наступними результатами:

Показано, що включення випарних охолодників у склад випарно-парокompресійних (НВО/ХМ) і сонячних осушувально - випарних систем (НВО/АБС.) дозволяє зняти кліматичні обмеження щодо використання випарних методів і істотно покращити енергетичні та екологічні показники альтернативних систем.

Випарні охолодники. Виконано моделювання процесів тепломасопереносу при випарному охолодженні з урахуванням термічних опорів фаз, особливостей течії і сталості рідинної плівки; значення меж протікання процесів при випарному охолодженні визначаються комплексом величин: $t_m^0 = f(t_{ж}^1, t_m^1, l = G_r/G_{ж})$; $h_{г.пред}^{2*} = f(t_{ж}^1, t_m^1, l = G_r/G_{ж})$, в першу чергу, величиною $l = G_r/G_{ж}$ (для НВО $l = G_o/G_v$); теоретично і експериментально встановлено вплив регулярної шорсткості (РШ) поверхні на інтенсифікацію процесів, знайдено оптимальні значення параметра шорсткості $k = p/e$; оптимальне співвідношення потоків в НВО складає $l = G_o/G_v = 1.0$, діапазон оптимальних значень $d_{з.опт} = 20-25$ мм; показано, що число ступенів у каскаді охолодників НВО/НВО не повинно перевищувати двох і що оптимальною є схема охолодника у складі НВО/ЛВО.

Випарно - парокompресійні охолодники. Об'єднання НВО і ХМ в єдину систему дозволяє знизити витрати води на підживлення у НВО; при відносній вологості 35-45% втрати на випарювання можуть бути компенсовані повністю; результати зіставлення випарно - парокompресійного кондиціонера (у першому ступені НВО та у другій даховий кондиціонер СААЕ/САЕН - 31) із кондиціонером СААЕ/САЕН - 51, показали, що комбінована схема дозволяє знизити встановлену потужність компресора та забезпечує зниження температури конденсації.

Осушувально - випарні охолодники. Для сонячних АСКП явно виражена залежність величини COP від температури води, що охолоджує абсорбер; зростання холодопродуктивності систем неминує приводить до зростання температури регенерації абсорбенту; розроблені схемні рішення АСКП, у яких виключається прямий контакт абсорбенту і повітря, що подається у приміщення; розроблена уніфікована тепломасообмінна апаратура, основана на принципі суміщення декількох робочих процесів у єдиному ТМА, що забезпечує зниження енерговитрат і габаритів альтернативних систем, а також на широкому використанні полімерних матеріалів; для широкого діапазону початкових параметрів повітря ($x_r = 13-25$ г/кг, $t_r = 20-45$ °C) попереднє осушування дозволяє знизити його вологовміст до значення $x_r < 13$ г/кг, що забезпечує можливість одержання комфортних параметрів повітря тільки методами випарного охолодження; оцінка робочих тіл (абсорбентів) на основі LiBr, показала їх принципову придатність для рішення задач охолодження кондиціонуван-

ня, орієнтовний робочий діапазон концентрацій складає 70–75%; АСКП, що основана на осушувально - випарному циклі, забезпечує значне зниження енерговитрат (30–60%).

Екологічна оцінка альтернативних систем. Вперше у вітчизняній практиці (відносно об'єму і технічного застосування вперше у європейській практиці) виконано екологічний аналіз альтернативних рішень в області холодильних і кондиціонуючих систем з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл» (Life Cycle Assessment, міжнародні стандарти ISO (14040, 14041, 14042 и 14043, «eco-indicator 99», база даних програми «SimaPro-6»); АСКВ (НВО/ХМ) приводить до меншого виснаження природних ресурсів (в тому числі, енергоресурсів), ніж традиційна СКП, вона вносить менший внесок у глобальну зміну клімату; найбільший вплив на довкілля призводиться під час експлуатації системи; внесок періоду виробництва складає близько 20% від внеску за весь життєвий цикл, а внесок періоду утилізації незначний; загальний екологічний вплив для альтернативної системи складає всього 65% від цього ж впливу для традиційної системи; вибір АСКП по двох критеріях, що аналізуються (вплив на виснаження природних ресурсів і внесок у глобальне потепління), сприяє реалізації Закону України про енергозбереження і Кіотського протоколу, спрямованого на зниження емісії парникових газів.

Достовірність наукових положень і результатів підтверджуються результатами експериментально-розрахункових досліджень, добрим якісним і кількісним узгодженням одержаних результатів з існуючими даними.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці практичних рекомендацій по розрахунку і конструюванню альтернативних систем АХС і АСКП. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі технічної термодинаміки ОДАХ в курсі лекцій і практичних занять по нетрадиційній енергетиці і на кафедрі холодильної і торгової техніки ДонДУЕТ у 2004 - 2006 роках.

Особистий внесок здобувача. Особисто здобувачем розроблено принципи побудови альтернативних систем і виконано розробку схемних рішень альтернативних систем і ТМА, цикл експериментально - розрахункових досліджень, аналіз і узагальнення одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації проводилась на ІХ міжнародній науково-технічній конференції «Машиностроение и Техносфера XXI века. 9-15 сентября 2002. г. Севастополь (Сборник трудов конференции. Донецк. ДонНТУ, 2002. Т3); Всеукраїнському науково-технічному семінарі удосконалення конструкції та підвищення теплоенергетичної ефективності малих холодильних машин. 7-8 вересня 2004р. м. Святогорськ (Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць. Випуск 11 – Донецьк: ДонДУЕТ, 2004); науково-

технічній конференції «Холодильна техніка і продовольча безпека», Одеса: ОДАХ, 2004; ІV міжнародній науково-технічній конференції: Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка. 8-9 вересня 2005р. м. Святогорськ (Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць. Випуск 13, т.2 – Донецьк: ДонДУЕТ, 2005.-с. 110-115); 4-ой Международн. науч.-техн. конф.: Современные проблемы холодильной техники и технологии. г. Одесса, 21-23 сент. 2005 г. – С. 34-35. Одесса: ОГАХ; XII международной научно-технической конференции «Машиностроение и Техносфера XXI века. 12-17 сентября 2005 г. Севастополь (Сборник трудов конференции. Донецк. ДонНТУ, 2005. Т4); II Всеукраїнському науково-технічному семінарі: Удосконалення конструкції та підвищення теплоенергетичної ефективності малих холодильних машин. 8 вересня 2006р. м. Донецьк (Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць. Випуск 15, – Донецьк: ДонДУЕТ, 2006.-с. 10-18); Міжнародній науково-технічній конференції: Промисловий холод та аміак. г. Одеса, 28-30 серпня 2006.

Публікації. Основні наукові і прикладні результати автора надані у 2 монографіях і 24 статтях у фахових наукових журналах і збірниках праць, 9 патентах України.

Об'єм і структура дисертації. Повний обсяг дисертації 419 сторінок, включаючи основного тексту 297 сторінок, 103 сторінки з рисунками та 19 сторінок з таблицями, і складається із шести основних розділів, списку літератури із 229 найменувань і додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі відображено актуальність проблеми і сформульовано цілі і задачі дослідження, наукові положення, наукова новизна, основні результати роботи і визначена її практична цінність.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню альтернативних рішень. Випарне охолодження ефективне в умовах сухого і жаркого клімату (вологоміст зовнішнього повітря $x_g < 12-14\text{г/кг}$). Найбільш перспективне включення випарних охолоджувачів у склад випарно - пароконденсійних систем (НВО/ХМ) і сонячних холодильних систем, основаних на відкритому абсорбційному циклі (осушувально-випарних систем НВО/АБС.), що дозволяє зняти кліматичні обмеження щодо використання випарних методів і істотно покращити енергетичні та екологічні показники альтернативних систем у цілому (рис.1). Створення комбінованих випарно-пароконденсійних систем на основі НВО (перший ступінь) і ХМ (другий ступінь) – рис. 2Б, - дозволяє «включити» випарний охолоджувач на високому температурному рівні, де він достатньо ефективний, і використати відкидний холодний і зволожений допоміжний по-

вітряний потік для обдування конденсатора ХМ, а повернення конденсату з випарника ХМ у контур випарного охолодження НВО, може забезпечити повністю замкнений цикл по воді, що споживається охолодником. Попереднє осушування повітряного потоку перед випарним охолодником (НВО/АБС.) – рис. 2В - забезпечує можливість наступного глибокого випарного охолодження середовищ і знімає кліматичні обмеження на використання випарних методів охолодження. В останні роки відмічається зростання інтересу до можливостей таких систем, а саме сонячних, що визначається їх екологічною чистотою і малим споживанням енергії. Найбільш перспективний відкритий абсорбційний цикл, оснований на використанні рідких сорбентів і можливості використання сонячної енергії (повністю або як часткового теплового джерела) для забезпечення регенерації сорбенту. Переважною областю практичного використання альтернативних систем є сонячне кондиціонування повітря АСКП, що обумовлено відомою кореляцією між інсоляцією і потрібним рівнем охолодження (комплексом термовологісних параметрів повітря для АСКП) і порівняльно невисокими температурами регенерації абсорбенту.

Основні проблеми розвитку альтернативних систем. Стосовно до випарно-парокомпресійних систем (НВО/ХМ): розробка схемних рішень, що забезпечують раціональне сполучення природних і штучних методів охолодження; зниження витрат води на підживлення випарного контуру НВО; зниження енерговитрат і покращення екологічних характеристик. Стосовно до осушувально-випарних систем (НВО/АБС.): розробка схемних рішень сонячних систем; підбір робочих тіл (композитів), що забезпечують високу поглинаючу здатність, при мінімальному несприятливому впливі на конструкційні матеріали; створення ефективного нагрівального контуру для регенерації абсорбенту, що пов'язано, в першу чергу, з розробкою ефективних сонячних колекторів (СК), здатних забезпечити потрібний температурний рівень регенерації абсорбенту; найбільш перспективне використання у схемах комбінованого гріючого джерела, у якому сонячна енергія відіграє важливу, але тільки часткову роль, що пов'язано, як з природними коливаннями сонячної активності (з необхідністю створення компенсаційного механізму), так і з техніко-економічним аспектом, оскільки часткова «вага» вартості і площі сонячної системи у складі альтернативних систем дуже висока. Загальною задачею для цих двох напрямків є удосконалення апаратів випарного охолодження, для використання як у автономному вигляді, так і у складі випарно - парокомпресійних (НВО/ХМ) і осушувально - випарних (НВО/АБС.) систем; створення компактних ТМА для альтернативних систем, уніфікованих для всіх основних елементів (випарних охолодників, абсорберу - осушувача, десорбера-регенератора, градирні).

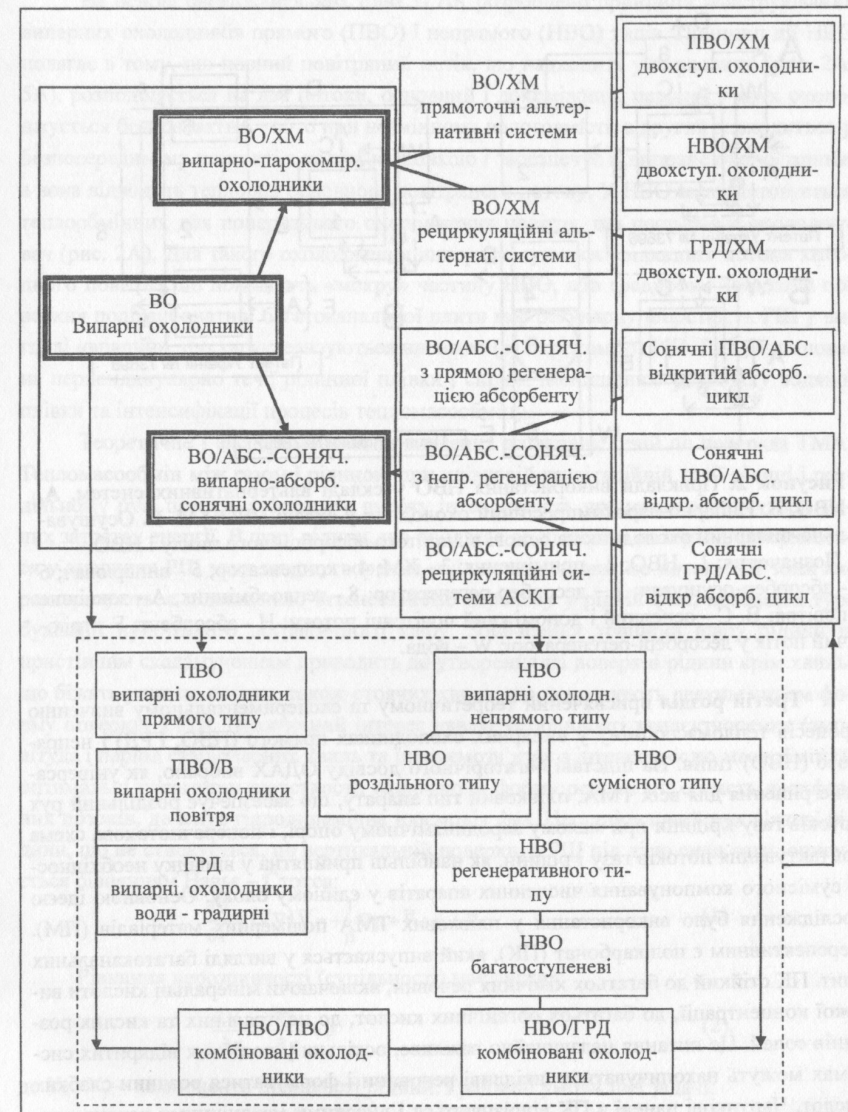


Рисунок 1 (таблиця). Можливі варіанти використання випарних методів охолодження в холодильних системах і СКП (раціональна інтеграція альтернативної і традиційної енергетики стосовно до задач холодильної техніки і СКП)

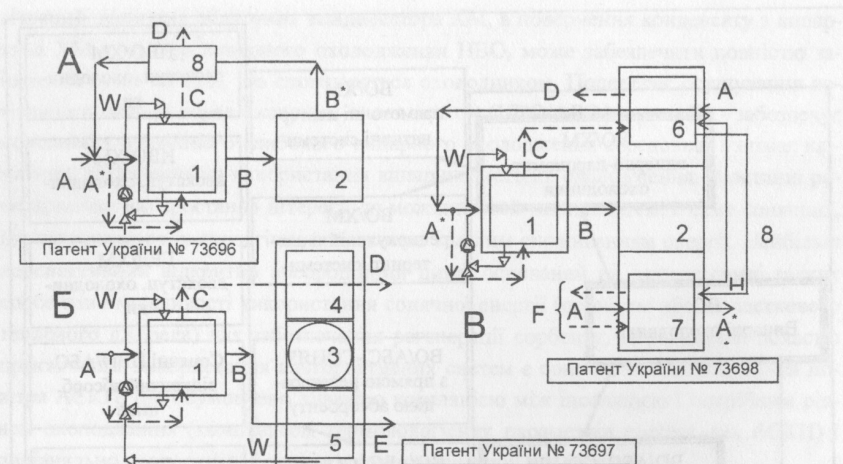


Рисунок 2. Приклади використання НВО у складі альтернативних систем. **А.** НВО. **Б.** Випарно-парокомпресійний охолодник у складі НВО/ХМ. **В.** Осушувально-випарний охолодник на основі відкритого абсорбційного циклу і НВО.

Позначення: 1 - НВО; 2 - приміщення; 3 - ХМ; 4 - конденсатор; 5 - випарювач; 6 - абсорбер-осушувач; 7 - десорбер-регенератор; 8 - теплообмінник; А - зовнішнє повітря; В, С - основний і допоміжний повітряні потоки; Н - абсорбент; F - гріючий потік у десорбери-регенераторі; W - вода.

Третій розділ присвячений теоретичному та експериментальному вивченню процесів тепломасообміну у випарних охолодниках прямого (ПВО, ГРД) і непрямого (НВО) типів. На підставі багаторічного досвіду ОДАХ вибрано, як універсальне рішення для всіх ТМА, плівковий тип апарату, що забезпечує роздільний рух потоків газу і рідини при малому аеродинамічному опорі, і поперечнотокова схема контактування потоків газу і рідини, як найбільш прийнятна у випадку необхідності сумісного компонування численних апаратів у єдиному блоку. Основною ідеєю дослідження було використання у плівкових ТМА полімерних матеріалів (ПМ). Перспективним є полікарбонат (ПК), який випускається у вигляді багатоканальних плит. ПК стійкий до багатьох хімічних речовин, включаючи мінеральні кислоти високої концентрації, до багатьох органічних кислот, до нейтральних та кислих розчинів солей. Це питання надзвичайно важливе, оскільки у подібних відкритих системах можуть накопичуватися шкідливі речовини і формуватися розчини слабких кислот. Чарункові панелі з ПК відрізняються і високими механічними характеристиками.

На основі багатоканальних плит із ПК розроблено принципи конструювання випарних охолодників прямого (ПВО) і непрямого (НВО) типів. Принцип дії НВО полягає в тому, що повний повітряний потік, що надходить у охолодник (рис. 2А, 5А), розподіляється на два потоки, основний і допоміжний, перший з яких охолоджується безконтактно, тобто при незмінному вологовмісті, а другий знаходиться у безпосередньому контакті з водяною плівкою і забезпечує її випране охолодження, а вона відводить тепло від основного повітряного потоку. У НВО використовується теплообмінник для попереднього охолодження повітря, що поступає в охолоджувач (рис. 2А). Для такого охолодження використовуються «відкидні» потоки холодного повітря, що покидають «мокру» частину НВО, або градирню. Зовнішня поверхня полікарбонатної багатоканальної плити має регулярну шорсткість РШ у вигляді «впадин», що характеризуються висотою (е) і кроком (р) РШ. РШ розташована перпендикулярно течії рідинної плівки і сприяє поліпшенню розподілу водяної плівки та інтенсифікації процесів тепломасообміну.

Теоретичне і експериментальне вивчення плівкових течій по поверхні ТМА. Тепломасообмін між газом і рідиною при плівковій гравітаційній течії рідини і роздільному русі потоків забезпечує високу інтенсивність процесів переносу при малих затратах енергії. В шарі рідини, що прилягає до шорсткої поверхні, створюються у впадинах РШ зони вихроутворення, які зносяться униз по потоку. Ці зони характеризуються підвищеною інтенсивністю переносу у рідкій фазі, внаслідок турбулізації пристінного пограничного шару. Збільшення товщини шару рідини із пристінним скаламученням приводить до утворення на поверхні рідини крім хвиль, що біжать униз по потоку, також стоячих хвиль, що повторюють деяким чином форму поверхні з РШ. Практичний інтерес уявляє особливості хвилеутворення (амплітуда і період стаціонарних хвиль та їх взаємозв'язок з інтенсивністю масообміну); оптимальні параметри шорсткості, включаючи форму ребра РШ; область двофазних потоків, де існує гідродинамічна взаємодія фаз. Нестационарний рух в'язкої рідини, що не стискується, по вертикальній поверхні з РШ під дією сили ваги, описується рівнянням Нав'є – Стокса:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{F} + \mu \Delta \bar{V} \quad (1)$$

Рівняння нерозривності (суцільності) має вигляд:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2),$$

де v_x, v_y – компоненти швидкості рідини. Граничні умови цієї задачі:

1) умови прилипання на шорсткій поверхні:

$$\text{при } y = f(x), v_x = v_y = 0 \quad (3);$$

2) кінематична умова на вільній поверхні:

$$\text{при } y = h(t, x) \quad V_y = \frac{\partial h}{\partial t} + V_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4);$$

3) динамічна умова – безперервність дотичних напруг на вільній поверхні:

$$\text{при } y = h(t, x), p_{нт} = \pm \tau_r, \text{ або: } -4\mu \frac{h'_x}{1+(h'_x)^2} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \mu \frac{1-(h'_x)^2}{1+(h'_x)^2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) = \pm \tau_r \quad (5),$$

вплив газового потоку на течію рідкої плівки враховується тільки через дотичну і нормальну напруги ($\tau_r = \lambda_r \frac{\rho_r V_r^2}{8}$, λ_r – коефіцієнт опору);

4) динамічна умова – безперервність нормальних напруг на вільній поверхні,

$$\text{при } y = h(t, x) p_{nn} = p_{rn} (p_{rn} = p_r - \text{const}), \text{ або:}$$

$$-p_r - 2\mu \frac{1-(h'_x)^2}{1+(h'_x)^2} \frac{\partial V_x}{\partial x} + 2\mu \frac{h'_x}{1+(h'_x)^2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) = -p_r + \frac{\sigma h''_x}{(1+(h'_x)^2)^{3/2}} \quad (6)$$

Хвильовий режим уявляє собою суперпозицію двох видів хвиль: прогресивних і стоячих. При регулярно - хвильовому режимі хвилі, що біжать по поверхні плівки переміщуються з постійною швидкістю c , а стоячі хвилі мов би повторюють профіль поверхні з РШ і період цих хвиль дорівнює відстані між сусідніми впадинами РШ. Як правило, відстань між впадинами (виступами) шорсткості p значно більше середньої довжини прогресивних хвиль λ , тому хвилі, що біжать, уявляють собою височастотні збурення (брижі), що розповсюджуються по поверхні стоячих хвиль, тобто визначаючий хвильовий режим на поверхні тонкого шару рідини уявляється стоячими хвилями. Стоячі хвилі відповідають стаціонарній по часу і періодичній по координаті x течії. Розглядається течія рідинної плівки, що встановилася, по вертикальній поверхні з РШ у контакт з протитоковим газовим потоком.

Математичний опис такого руху визначається стаціонарними рівняннями виду:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \int_{f_1(x)}^y \frac{\partial V_x}{\partial x} dy = \frac{1}{Fr} + \frac{1}{We} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial}{\partial x} \int_{f_1(x)}^h V_x dx = 0; \quad V_x = 0, \text{ при } y = f_1(x),$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = \tau_a, \text{ при } y = h(t, x), \quad (7),$$

де $h = h(x)$ – шукане рівняння вільної поверхні, причому функція $h(x)$ є періодичною: $h(x) = h(x + p)$, з періодом p , що дорівнює періоду РШ. Одержано диференціальне рівняння відносно локальної товщини плівки рідини $\delta(x)$:

$$\delta^3 \delta'' + \frac{We}{40} \delta' (48 - 2\tau_r \delta^2 - \tau_r^2 \delta^4) - \frac{We}{8} f_1' (12 - 8\tau_r \delta^2 + \tau_r^2 \delta^4) + \left(\frac{3We}{Re} + f_1'' \right) \delta^3 - \frac{3}{2} \frac{We}{Re} (2 - \tau_r \delta^2) = 0 \quad (8),$$

при цьому $Fr = \frac{Re}{3}$, або:

$$\delta'' = \frac{3}{2} \frac{We}{Re} \frac{2 - \tau_r \delta^2}{\delta^3} - \left(\frac{3We}{Re} + f_1'' \right) \frac{We}{40} \frac{48 - 2\tau_r \delta^2 - \tau_r^2 \delta^4}{\delta^3} \delta' + \frac{We}{8} \frac{12 - 8\tau_r \delta^2 + \tau_r^2 \delta^4}{\delta^3} f_1' \quad (9)$$

Періодичне рішення цього нелінійного рівняння знаходимо численим методом Рунге-Кутта, використовуючи крайові умови періодичності: $\delta(0) = \delta(p)$, $\delta'(0) = \delta'(p)$, $\delta''(0) = \delta''(p)$. Диференціальне рівняння зводиться до системи рівнянь першого порядку: $\delta'(x) = \delta_1(x)$, $\delta_1'(x) = \delta_2(x)$,

$$\delta_2' = \frac{3}{2} \frac{We}{Re} \frac{2 - \tau_r \delta^2}{\delta^3} - \left(\frac{3We}{Re} + f_1'' \right) \frac{We}{40} \frac{48 - 2\tau_r \delta^2 - \tau_r^2 \delta^4}{\delta^3} \delta_1 + \frac{We}{8} \frac{12 - 8\tau_r \delta^2 + \tau_r^2 \delta^4}{\delta^3} f_1' \quad (10)$$

Розрахунок коефіцієнтів цього рівняння проводився по таких формулах (усі коефіцієнти виражено через число Рейнольдса $Re = \frac{\delta_N V_o}{\nu}$):

$$\delta_N = \sqrt[3]{\frac{3Re\nu^2}{g}}, \quad We = \frac{\rho Re^2 \nu^2}{\sigma \delta_N}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau_r}{\tau_{nn}}, \quad \text{де } \tau_r = \lambda_r \frac{\rho_r V_r^2}{8}, \quad \tau_{nn} = \frac{\rho \nu^2 Re}{\delta_N^2}.$$

Для РШ із параметрами $e = 0,1 - 0,4$ мм, $p = 10$ мм (e – глибина впадин РШ, p – відстань між ними), одержані значення локальної товщини плівки рідини без газового потоку ($\tau = 0$). Як показує числений аналіз, вплив газового потоку на товщину шару відзначається лише при швидкостях газу $w_r \geq 8$ м/с. Газовий потік стабілізує плівкову течію, поверхневі збурення згладжуються, а середня товщина плівки декілька зменшується.

Розглянуто сталість роздільної двофазної течії у плоскому каналі ТМА із РШ поверхні. Для оптимального протікання процесів необхідно забезпечити режим активної гідродинамічної взаємодії фаз, але при цьому навантаження по рідині і газу повинні бути не настільки великими, щоб настало сильне краплеунесення з або «захливання» насадкової частини апарату. Запропонована математична модель визначення сталості двофазної течії у вертикальному каналі і встановлено умови стаціонарного режиму тепломасообміну. Результат узагальнений на випадок кана-

лів, поверхня яких має РШ. Одержано залежності для граничних швидкостей газу w_r^* , після яких настає несталість. Для вертикальних каналів із РШ поверхні, висота або глибина якої порівняна із $\delta_{ж}$, при течії створюються на поверхні плівки стоячі хвилі великої амплітуди. При сильній гідродинамічній взаємодії фаз амплітуди хвиль мають тенденцію до зростання з плином часу, що призводить до зменшення w_r^* .

Експериментальне вивчення плівкових течій по поверхні полімерних листів із РШ типу «впадина» було проведено в ОДАХ сумісно з інститутом проблем хімічної фізики ІПХФ РАН (Росія) з використанням методу електропровідності. Суть методу полягає у вимірі омичного опору рідинної плівки з допомогою декількох електродів, розташованих на поверхні листів. Одержані результати наведені на рис. 7. Перехід від ламінарної до турбулентної області течії ($Re_{ж}^*$) залежить від наявності регулярної шорсткості і параметра шорсткості $k = p/e$; двовірна шорсткість прискорює перехід, знижуючи граничне значення $Re_{ж}^*$. Особливий інтерес являє діапазон значень $k = 11-25$, де оптимальні умови прояви шорсткості і забезпечується максимальна інтенсивність протікання процесів переносу у рідкій плівці. Моделювання процесів сумісного тепломасообміну у ВО виконано з урахуванням особливостей плівкових течій.

Експериментальне дослідження НВО. Створений стенд (рис. 6А) дозволяє досліджувати розроблені НВО з насадкою із ПМ і різні схеми НВО/ХМ. Дані по гідродинаміці і тепломасообміну для регулярної насадки (РН) з ПМ наведені на рис. 7. Поперечнотокова схема забезпечує зниження рівня Δp , порівняно з протитоком, і можливість значного підвищення навантажень. РШ практично не відбивається на величині Δp на відмінність від протитоку; по всьому діапазону витрат газу і рідини відсутня гідродинамічна взаємодія фаз. Явище захливання для поперечнотокової схеми відсутнє повністю, майже до значень $w_r \approx 10-12$ м/с, змінюючись на великих w_r явищем повздорожнього зносу рідини.

Максимальне зростання інтенсивності переносу одержано для листа з РШ, причому відмічається сприятливий розподіл рідини по усій поверхні листа у модулі. Інтенсифікуючий вплив ребер РШ в умовах поперечнотокової схеми проявляється у зниженні термічного опору в обох фазах порівняно із рівним (фонним) листом без РШ. Конкретизовано діапазон оптимальних значень $d_{з,опт} = 20-25$ мм. Енерговитрати для досягнення заданої величини ефективності процесу істотно нижчі в умовах поперечнотокової схеми, ніж при протитоку. На рис. 7ІІІ наведена залежність теплоенергетичної ефективності QE/N (Q – холодопродуктивність НВО, E – ефективність процесу, N – енерговитрати на роботу вентилятора і насоса) від величини співвідношень потоків $l = G_O/G_B$. Оптимальне значення дорівнює одиниці. У випробуваннях з багатоступеневими і комбінованими охолодниками у складі

НВО/НВО або НВО/ПВО, варіювали до п'яти послідовно з'єднаних ступенів. Чутливе зниження температури основного повітряного потоку t_0 відбувається і першій і другій ступенях НВО, температура t_2' прямує до t_p – температури точки роси зовнішнього повітря. Починаючи з третього ступеня подальше зниження t_0 незначне і максимальне значення QE/N відповідає двом ступеням охолодження. Очевидна доцільність включення у склад каскаду додаткової випарної ступені ПВО (комбінована система КВО у складі НВО/ПВО, патент України № 73696). Одержані результати і рекомендації важливі для усіх ТМА, що входять у склад альтернативних систем.

Четвертий розділ присвячений вивченню випарно - пароконденсійних охолодників на основі НВО/ХМ. Допоміжний повітряний потік, що покидає НВО є достатньо холодним (але зволеним) і може використовуватися для охолодження конденсатора ХМ (рис. 2Б). На рис. 3 надані розроблені схеми. Схема комбінованого охолодника на основі випарного охолодника у складі НВО/ГРД та ХМ, дозволяє одержувати охолоджену воду, яка подається у водо - повітряні теплообмінники, які вентилюються, встановлені у приміщеннях.

Експериментальне вивчення комбінованих випарно - пароконденсійних охолодників виконано на стенді (рис. 6А), результати наведені на рис. 8. Вивчали оптимальне співвідношення теплових навантажень на випарну і пароконденсійну частини охолодника і можливість повернення вологи із випарника ХМ у «мокру» частину НВО. Холодопродуктивність НВО різко зменшується із зростанням вологості зовнішнього повітря (рис. 8А) і помітна межа можливого використання випарного охолодження у СКП ($x_r^1 < 13$ г/кг); ця же тенденція зберігається і для комбінованої схеми НВО/ХМ, але навіть для самих високих значень $x_r^1 \sim 20-25$ г/кг працездатність системи зберігається, при істотному зростанні холодопродуктивності Q (на 10-20%); чим вище температура зовнішнього повітря, тим вище і холодопродуктивність випарного і комбінованого охолодників, при цьому для ХМ можуть виникнути несприятливі режими експлуатації, пов'язані з відмовами в роботі, що цілком виключено для комбінованої системи на основі НВО/ХМ. Обдування конденсатора ХМ холодним допоміжним потоком приводить до зниження температури і тиску конденсації. Кількість води, що сконденсувалася на поверхні випарника, прямо пропорційна вологості оброблюваного повітря, а кількість води, що випарується у допоміжних каналах зворотно пропорційна його вологості. Експеримент показав, що при відносній вологості 35-45% втрати на випаровування можуть бути компенсовані повністю. Найбільший інтерес являють рециркуляційні схеми, що забезпечують зниження енерговитрат порівняно з вентиляційними схемами на 25 - 35%.

Розрахунки виконувалися для порівнюваних варіантів охолодників (ХМ і НВО/ХМ) при однакових холодопродуктивності і параметрах довкілля. Для комбінованого варіанта, поряд із холодопродуктивністю першого ступеню НВО, враховувались енерговитрати на вентилятор і водяний насос. Розрахункові і експериментальні результати знаходяться у добрій відповідності. На рис. 8Г і Д подані результати для параметрів зовнішнього повітря $t_r = 34^\circ\text{C}$ і $x_r = 23$ г/кг, обраних для самих тяжких, з точки зору задачі кондиціонування повітря, районів земної кулі (таких міст, як Ріо-де-Жанейро, Сінгапур, Майамі, Бангкок, Бахрейн). Показано процеси: А-Б і А-С лінії зміни станів основного і допоміжного повітряних потоків у I ступеню охолодника НВО; В-Е - охолодження повітря у II ступеню, у випарнику ХМ. На рис. 8Д процес G-C показує зміну стану допоміжного повітряного потоку, у якості якого використовується повітря, що покидає приміщення; зміна стану основного потоку у НВО завдяки цьому протікає з його охолодженням і осушуванням (А-Н-В), причому конденсат також може бути направлений у «мокру» частину НВО для поповнення витрат на випарний процес.

П'ятий розділ присвячений альтернативним системам, оснований на використанні відкритого абсорбційного циклу і сонячної енергії (НИО/АБС.). Використання рідких сорбентів у сонячних адсорбційних системах переважно, але важливим є питання про вплив робочих речовин на характеристики мікроклімату (для АСКП) і сталість конструкційних матеріалів. Абсорбційні системи з відкритим циклом дозволяють знано знизити температурний рівень регенерації абсорбенту. Такі системи працюють при атмосферному тиску і на їх основі може бути створено нове покоління холодильних і кондиціонуючих систем з використанням сонячної енергії. Суть полягає в тому, що зовнішнє повітря осушується в умовах безперервного циклу, потім надходить у випарний охолодник, де може бути забезпечено глибоке охолодження середовища (у АСКП одержання повітря з параметрами комфортності, які потрібні). При цьому, процес випарного охолодження може бути ефективний безвідносно параметрів зовнішнього повітря. Перспективність альтернативних систем визначається екологічною чистотою; порівняно низькими енерговитратами і можливістю комплексного рішення низки задач життєзабезпечення: гарячого водопостачання, опалення, охолодження і кондиціонування (а саме, осушування) об'єктів, використовуючи єдину сонячну систему. Недоліками є: великі габарити (на сонячну частину АСКП приходиться і основна вартість всієї системи), обумовлені малими рушійними силами; велика кількість ТМА; проблематичність використання тільки сонячної енергії для регенерації абсорбенту.

Може використовуватися як пряма, так і непряма регенерація абсорбенту. Пряма регенерація чуттєва до забруднень абсорбенту і коливанням рівня сонячної

активності, що забезпечує не тільки нагрівання при десорбції, але і швидкість руху повітряного потоку над поверхнею розчину абсорбенту.

На рис. 4 наведено розроблені схеми АСКП. Схема включає дві частини: осушування повітря і випарного охолодження. Осушувальна частина включає абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням 3 (осушувач повітря), десорбер 4 (регенерація абсорбенту); НВО (1), систему регенеративних теплообмінників 5, 10; тепло, необхідне для регенерації абсорбенту забезпечується геліосистемою із плоскими сонячними колекторами 6. Повітряний потік А при осушуванні в абсорбері 3 знижує вологовміст x_r і температуру точки роси t_h , що забезпечує значний потенціал охолодження у НВО. Робота АСКП може бути організована як по вентиляційній, так і по рециркуляційній схемам.

Схема на рис. 4В побудована з використанням повітря, що покидає приміщення для регенерації абсорбенту у десорбері 4 (процес D-K на рис. 9А і Б), при підведенні до нього тепла із бака - теплоаккумулятора 8. Зовнішнє повітря стану А осушується в абсорбері (А-Е), охолоджується у теплообміннику (Е-Е*) допоміжним повітряним потоком (G-G*), що покидає НВО, а потім охолоджується у «сухий» частині НВО (Е*-В) при незмінному вологовмісті, і у стані В поступає у приміщення. Точка С характеризує стан повітря приміщенні, що кондиціонується, с урахуванням внутрішніх асиміляційних процесів.

Внутрішнє охолодження абсорбера дозволяє усунути із схеми допоміжну градирню, охолоджуючу абсорбер. Процес випарного охолодження у внутрішній порожнині (каналах) абсорбера здійснюється сумішшю повітряних потоків на лінії (X-I). Внутрішнє випарне охолодження дозволяє приблизити процес абсорбції до ізотермічного і підвищити його ефективність. Міцний і гарячий розчин абсорбенту М і слабкий і холодний розчин N обмінюються теплом в теплообміннику 5.

Інтересна схема з осушуванням повітря, що покидає приміщення, і його використанням як допоміжного повітряного потоку у НВО. Тут температурний рівень у НВО різко знижується і зовнішнє повітря, що подається у приміщення взагалі не вступає у контакт із абсорбентом, що важливо по гігієнічним вимогах, але температурний рівень регенерації абсорбенту неминуче зростає. Для задач СКП можна у НВО охолоджувати як повітря, так і воду, автономно подаючи ці потоки у приміщення. Схема також може служити основою для створення сонячних холодильних систем АХС (вода з температурою 3 - 8°C).

Термодинамічна ефективність абсорбційних циклів визначається їх тепловим коефіцієнтом COP і ступенем термодинамічного удосконалення θ :

$$\text{COP} = \frac{Q_o}{Q_{\text{двр}}}, \quad \theta = \frac{\text{COP}}{(\text{COP})_k}; \quad (\text{COP})_k = \frac{T_d - T_{\text{НВ}}}{T_d} \cdot \frac{T_o}{T_{\text{НВ}} - T_o} \quad (11)$$

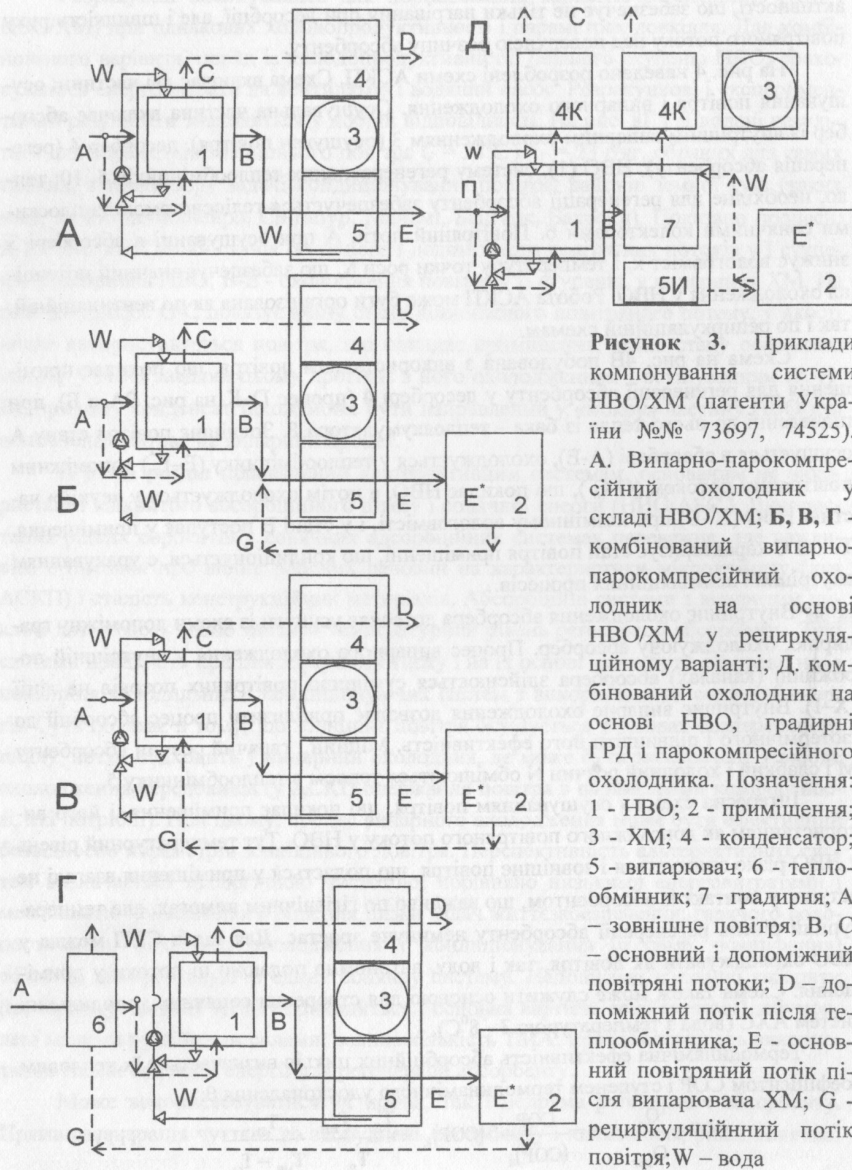


Рисунок 3. Приклади компонування системи НВО/ХМ (патенти України №№ 73697, 74525). А. Випарно-парокомпресійний охолодник у складі НВО/ХМ; Б, В, Г - комбінований випарно-парокомпресійний охолодник на основі НВО/ХМ у рециркуляційному варіанті; Д. комбінований охолодник на основі НВО, градирні ГРД і парокомпресійного охолодника. Позначення: 1 - НВО; 2 - приміщення; 3 - ХМ; 4 - конденсатор; 5 - випарювач; 6 - теплообмінник; 7 - градирня; А - зовнішнє повітря; В, С - основний і допоміжний повітряні потоки; D - допоміжний потік після теплообмінника; E - основний повітряний потік після випарювача ХМ; G - рециркуляційний потіг повітря; W - вода

xv 976
 ІНСТИТУТ ХОЛОДА
 ОНАХТ
 бібліотека

де: Q_0 - холодопродуктивність циклу; $Q_{дбр}$ - теплове навантаження на десорбер; SOP_K - тепловий коефіцієнт циклу Карно, побудованого в інтервалі температур підводу і відводу тепла. Холодопродуктивність циклу і теплове навантаження десорбера-регенератора:

$$Q_{нво} = (\Delta G_{*})_{нво} \cdot r_{нво}, \quad Q_{дбр} = (\Delta G_{*})_{дбр} \cdot r_{дбр} \quad (12)$$

$$(\Delta G_{*})_{нво} = (x_{ввых} - x_{вх})_{нво} \cdot (G_r)_{нво}, \quad (13)$$

$$(\Delta G_{*})_{дбр} = (x_{ввых} - x_{вх})_{дбр} \cdot (G_r)_{дбр},$$

$$(G_r)_{нво} = (G_r)_{дбр} = G_r, \quad (14)$$

$$r_{нво} = r_{дбр} = r.$$

$$SOP = \frac{Q_0}{Q_{дбр}} = \frac{(x_{ввых} - x_{вх})_{нво}}{(x_{ввых} - x_{вх})_{дбр}} = \frac{(x_{ввых} - x_{вх})_{нво}}{(x_{ввых} - x_{вх})_{дбр}} \quad (15)$$

$$SOP_{ил} = \frac{x_s(T_0) - x_{min}}{x_{o,c} - x_{min}} \quad (16)$$

де: $x(T_0)$ - вологовміст насиченого повітря на виході із НВО; x_{min} - мінімальний вологовміст, що відповідає парціальному тиску пари води над міцним розчином абсорбенту; $x_{нв}$ - вологовміст зовнішнього повітря. Розрахунки для ідеалізованого циклу АСКП показали різке зниження Q і SOP із зниженням температури охолодження (Б) і температури гріючого джерела (В). Температура гріючого джерела вище 60°C цілком забезпечує у ідеалізованому циклі прийнятні значення SOP практично для всіх значень відносної вологості зовнішнього повітря. Аналіз, раніше виконаний в ОДАХ, показав, що перспективними, як робочі тіла АСКП, є водні розчини на основі бромистого літію, при цьому доцільно використовувати добавки, тобто композити на основі LiBr, які знижують корозійну активність і збільшують розчинність; для рішення задач кондиціонування повітря доцільно використовувати розчин $H_2O + LiBr + ZnCl_2 + CaBr_2$; робочий інтервал концентрацій складає 70-75%. Математична модель абсорбційних (десорбційних) процесів уявляється системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_s}{\partial x} = a_1 \cdot (t_r - t_s) + b_1 \cdot (p_r - p^{**}); \\ \frac{\partial t_r}{\partial z} = a_2 \cdot (t_s - t_r); \frac{\partial p_r}{\partial z} = b_2 \cdot (p^{**} - p_r) \end{cases} \quad (17)$$

і граничних умовах: при $x = 0, t_s = t_s^0, \xi = \xi^0$ (початкова концентрація розчину), при $z = 0, t_r = t_r^0, p_r = p_r^0$. Відміна задачі від випарного охолодження в тому, що вона суттєво нелінійна, тому що коефіцієнти a_1, a_2, b_1, b_2 , а також p_s є функціями температури і концентрації розчину.

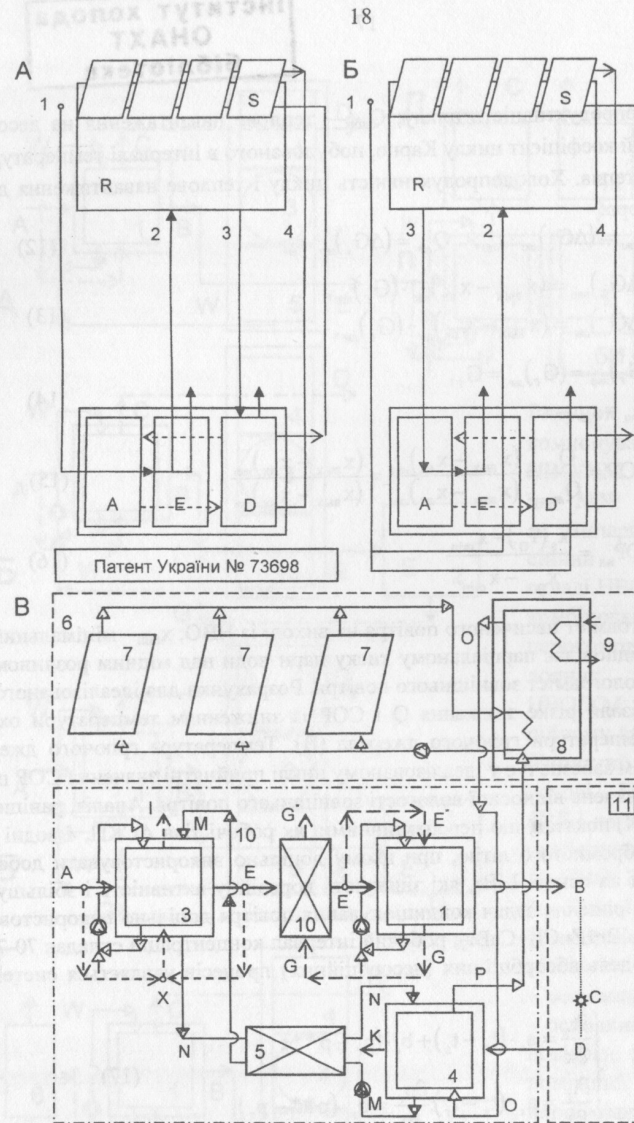


Рисунок 4. Принципові схеми АСКП з непрямою регенерацією абсорбенту. Позначення: А (3), Е (1), D (4) – абсорбер, випарний охолодник, десорбер; R (11) – приміщення; 6 – сонячна система; S (7) – сонячний колектор; 5,10 – теплообмінники; 1 (А) – зовнішнє повітря; 2 (В) – повітря у приміщення; 3 (D) – повітря із приміщення; 4 (О,Р) – вода від сонячного нагрівача; 5 (М,Н) – розчин абсорбенту.

У розрахункові програми для осушувального блоку (абсорбер – десорбер) входять рівняння, апроксимуючі теплофізичні властивості робочих рідин (розчинів) у діапазонах робочих параметрів.

Суміщення декількох робочих процесів у одному апараті забезпечує зниження загального числа ТМА у системі і енерговитрат, оскільки усуває частину комунікацій. Прикладом можуть служити всі основні апарати АСКП, представлені на рис. 5. Внутрішнє випарне охолодження абсорбера (рис. 5Б) забезпечує високу ефективність процесу абсорбції, дозволяючи зменшити витрату абсорбенту і підвищуючи загальний к.к.д. системи. Десорбер упорядкований аналогічно абсорберу. Процеси десорбції протікають у «поновлювальній» частині апарату при взаємодії плівки абсорбенту, що стікає (слабкий розчин), і повітряного потоку, що виносить із апарату вологу, а підвід необхідного для десорбції тепла забезпечується гарячою водою, що надходить у внутрішню порожнину каналів. Всі ТМА АСКП уніфіковані, що забезпечує єдність технологічних операцій при їх виготовленні.

Як зовнішнє гріюче джерело при регенерації абсорбенту використовується геліосистема з плоскими сонячними колекторами СК. У полімерному СК використаний полікарбонат чарункової структури у якості теплоприймача (абсорберу), так і прозорої ізоляції. Розрахунок такого колектора аналогічний розрахунку звичайних СК із подвійним оскленням. Зміна температури рідини по довжині каналу полімерної плити теплоприймача СК:

$$T_{ж}(x) = \frac{b_0 T_0 + I}{b_{ж}} (e^{a_{ж} x} - 1) + T_0^0, \quad (18)$$

Коефіцієнт корисної дії СК можна розрахувати по формулі:

$$\eta = \tau \cdot \varepsilon_i \cdot F' - U \cdot F' \cdot [0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J \quad (19)$$

де $t_{ж1}$ і $t_{ж2}$ – температури рідини на кінцях СК, °С; U_i – коефіцієнт сумарних теплових втрат, Вт/(м²·град). Якщо U і $F' = \text{const}$, залежність η від $[0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J$ являє собою пряму лінію. Величина $[0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J$ називається приведеною температурою.

Розроблена інженерна методики розрахунку АСКП, яка дозволяє, варіюючи тип і концентрацію абсорбенту, параметри довкілля, співвідношення витрат, визначати параметри потоків на виході із системи і підібрати оптимальний варіант комбінованого гріючого джерела. Результати аналізу надані на рис. 9В.

Шостий розділ присвячений інженерним використанням. Результати промислового впровадження випарних (НВО) і випарно-парокомпресійних систем (НВО/ХМ). Розроблено побутовий кондиціонер повітря БКП випарного типу, оснований на схемі НВО/ПВО.

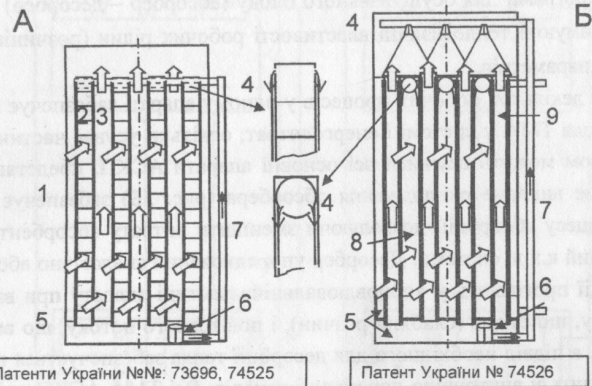


Рисунок 5. Принципові схеми НВО (А) і абсорбера (Б) з насадкою із полімерних багатоканальних плит. Позначення: 1 – пакет насадки НВО; 2 – «суха» частина НВО – канали основного повітряного потоку; 3 – «мокра» частина НВО, – канали допоміжного повітряного потоку; 4 – розподілювач рідини; 5 – емність для рідини; 6 – водяний насос; 7 – рециркуляційний водяний контур; 8 – осушувальна частина насадки абсорбера; 9 – охолоджувальна частина насадки абсорбера.

Наведені результати порівняльного аналізу можливостей випарно-парокомпресійного кондиціонера (у першому ступені НВО і другому – даховий кондиціонер однакової холодопродуктивності). Комбінована схема дозволяє знизити встановлену потужність компресора з 16,8 до 11,3 кВт. Розташування конденсатора ХМ у допоміжному повітряному потоці, що покидає НВО, забезпечує зниження температури конденсації у розрахунковому режимі від 45⁰С до 35⁰С і зниження витрати енергії на стискування на 14%. Можливе повне повернення рідини у випарний контур. На рис. 8Г і Д надані результати вивчення можливостей комбінованих охолодників для параметрів зовнішнього повітря: $t_r = 34^{\circ}\text{C}$ і $x_r = 23$ г/кг, напевне вибраних для самих тяжких, з точки зору задач СКП, районів земної кулі (Ріо-де-Жанейро, Сінгапур, Майамі, Бангкок, Бахрейн). У схемі по рис. 8Д як допоміжний потік використовується повітря, що покидає приміщення. Принципово важлива можливість повернення вологи (конденсату із випарника ХМ) у контур НВО, причому для значень відносної вологи зовнішнього повітря вище 35% може мати місце повне повернення вологи, що витрачена на процес випарного охолодження у НВО, що дає можливість створення повністю замкнутого циклу.

Результати промислового впровадження сонячних систем теплохолододопостачання і кондиціонування повітря на основі НВО/АБС. Сонячні системи гарячого водопостачання (ССГВ) відрізняються за принципом циркуляції теплоносія (з природною і вимушеною циркуляцією), по кількості контурів (з одним або з двома), по роду теплоносія (повітря або розчин), по часу експлуатації (цілорічні і сезонні). Наведені техніко-економічні характеристики пілотної установки АСКП. У апаратах блоку охолодження АСКП (рис. 9Г) використовувалась насадка РН, розроблена із полімерних матеріалів, при цьому усі ТМА, що входять у АСКП, виконано у варіанті суміщення декількох робочих процесів. Це значно скорочує число ТМА, відносно аналогічних схем, розроблених раніше, де кожний етап технологічного процесу послідовно здійснюється у своєму типі апарату. Поперечнотокова схема руху контактуючих потоків забезпечує зручність взаємного компонування чисельних ТМА у єдиному блоці устаткування, знижуючи кількість необхідних «розворотів» повітряних потоків. Це дозволяє зменшити число вентиляторів у схемі та їх енергоспоживання. Усі ТМА альтернативної системи уніфіковані, що забезпечує єдність технологічних операцій при їх виготовленні. Розроблені НВО входять як випарна частина в альтернативні системи. Аналіз можливостей АСКП наведено на рис. 9В для кліматичних умов, коли $x_g > 13$ г/кг. Використовувався абсорбент LiBr++, при концентрації $\xi = 70\%$. Сонячна СКП здатна забезпечити одержання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі. Порівняно з традиційними парокомпресійними СКП альтернативна система забезпечує значне зниження енерговитрат (30-60%).

На основі методології оцінки «повного життєвого циклу - ПЖЦ» («Life Cycle Assessment» - LCA) виконано сумісно з Австралійським дослідницьким центром (Commonwealth Science and Industrial Research Organisation, Australia) порівняльний аналіз розроблених альтернативних систем. На відмінність від традиційного техніко-економічного аналізу у роботі виконана оцінка екологічних індикаторів. Методологія LCA розроблена відповідно із стандартами ISO (14040, 14041, 14042 і 14043). Методику розрахунку екологічних індикаторів використовують для порівняння альтернативних систем з метою мінімізації впливу на довкілля, а також для виявлення потенційних можливостей зниження антропогенного навантаження. При аналізі враховуються: витрата енергії і виділення шкідливих речовин при виробництві матеріалів для об'єкту (або одержання речовин при рециркуляції матеріалів). Нами були вибрані такі еколого-енергетичні критерії: вплив ПЖЦ порівнюваних систем на глобальну зміну клімату (відповідає повній емісії парникових газів); виснаження природних ресурсів при створенні, експлуатації та утилізації систем (відповідає по-

вному споживанню органічного палива і мінеральних ресурсів за ПЖЦ); шкоду, що нанесена довкіллю, тобто відповідні даній шкоді еко - індикатори (окремо враховується шкода людському здоров'ю, екосистемі і виснаження природних ресурсів). Розрахунок усіх обраних критеріїв оснований на методології ECO-INDICATOR 99.

Вплив на клімат виражається у спеціальних одиницях DALY (Disability adjusted life years), тобто у цьому індикаторі враховується втрата працездатності, викликана хворобами від даного виду шкідливого впливу. Відповідно з методикою оцінки повного еквіваленту глобального потепління, вплив на зміну клімату прийнято виражати через kg CO_2 . Враховуються усі викиди CO_2 при виробництві енергії і матеріалів, при експлуатації устаткування і його утилізації. Крім того, враховуються викиди усіх інших парникових газів на всіх стадіях ПЖЦ. Внесок парникових газів у зміну клімату також обчислюється у kg CO_2 (перераховується з допомогою спеціальної величини GWP парникового газу, kg/kg CO_2). Слід відзначити, що 1 kg CO_2 відповідає $2.1 \cdot 10^{-7}$ DALY. Внесок у виснаження ресурсів виражається у МДж (показує додаткові витрати енергії, необхідні у майбутньому для добування руди, палива більш низької якості). Ця величина прямо пропорційна кількості споживаних енергоресурсів на створення, експлуатацію та утилізацію об'єкту. Три категорії шкоди – вплив на здоров'я людини, якість екосистеми і виснаження ресурсів - оцінюються у еко-одиницях. Шкала, у якій порівнюється відносний вплив на довкілля, обрана таким чином, щоб 1 Pt (еко-одиниця) являла одну тисячну частину щорічного навантаження на довкілля, що виникає від одного середньостатистичного жителя Європи (розраховується відношенням загального навантаження на довкілля, пов'язаного з повними викидами будь-якої шкідливої речовини в Європі, до загальної кількості жителів Європи і множенням на 1000).

Відзначимо шкідливі впливи, які відповідають за перераховані вище три категорії шкоди. При оцінці впливу на здоров'я людини (тобто на число і тривалість хвороб та на тривалість життя), визначається вплив системи на: зміну клімату; руйнування озонового шару; викиди канцерогенів; радіоактивне випромінювання; шкідливі викиди у атмосферне повітря. При оцінці впливу на якість екосистеми (тобто на біорізноманітність) визначаються: викиди екотоксинів; внесок у створення кислотних дощів; евтрофікація водоймищ; руйнування ґрунту. При оцінці впливу на виснаження природних ресурсів визначається виснаження мінеральних та паливних ресурсів. Розроблена широка база даних для визначення якості і кількості шкідливих впливів і викидів при виробництві певних матеріалів, що необхідна для виконання розрахункової програми LCA. Після врахування вагових коефіцієнтів і підсумовування усіх шкідливих впливів одержується еко-індикатор, який має розмірність Pt (еко-одиниця), який можна використовувати для порівняння альтернативних об'єктів.

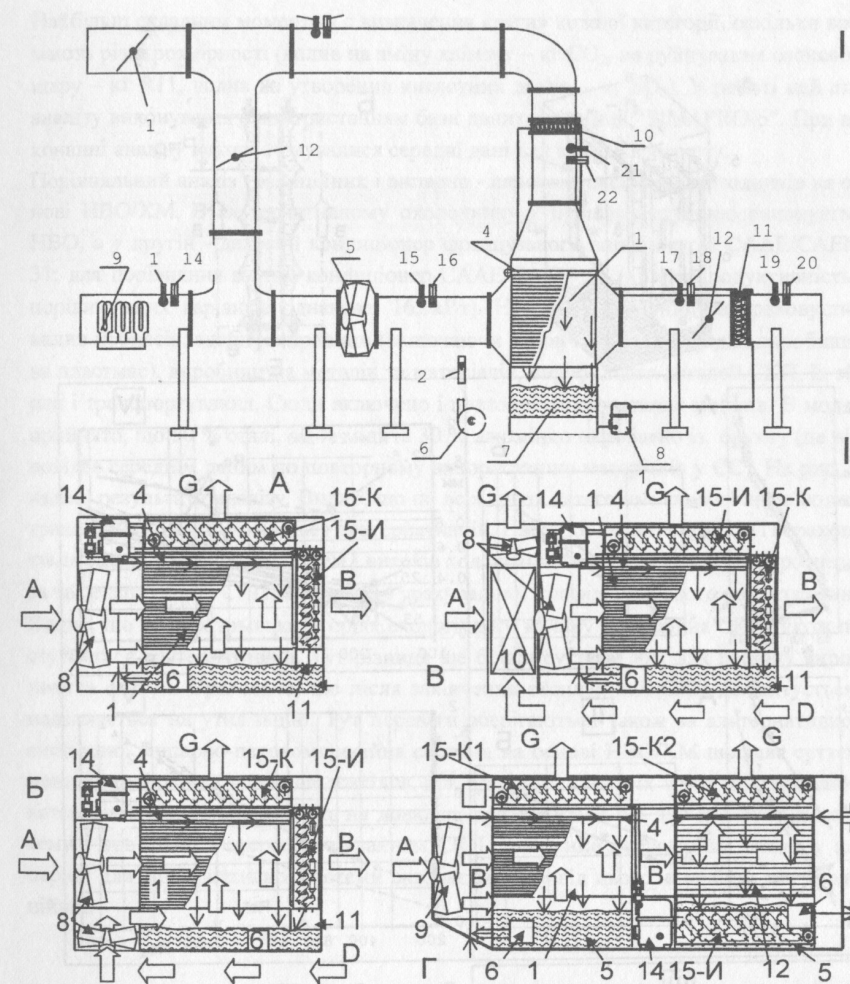


Рисунок 6. I - Експериментальний стенд для дослідження випарно-парокомпресійних охолоджувачів на основі НВО/ХМ. Позначення: 1 - випарний модуль НВО; 4 - водорозподільвач; 5 - вентилятор; 6 - водяний насос; 7 - водяний бак; 8 - ротаційний компресор; 9 - електрокалорифер; 10 - конденсатор; 11 - випарник; 12 - шибер; 13-24 - термометри і термопары; 25 - ротаметри. II - схематичний опис НВО/ХМ (Г - на основі НВО/ГРД і ХМ). Позначення 1 - насадка НВО; 4 - водорозподільвач; 5 - ємність для води; 6 - насос; 8 - вентилятор; 10 - теплообмінник; 11 - повернення конденсату; 12 - градирня; 14 - компресор; 15К, 15И конденсатор і випарник; А, В, Г - повний, основний та допоміжний повітряні потоки, відповідно; D - повітря з приміщення.

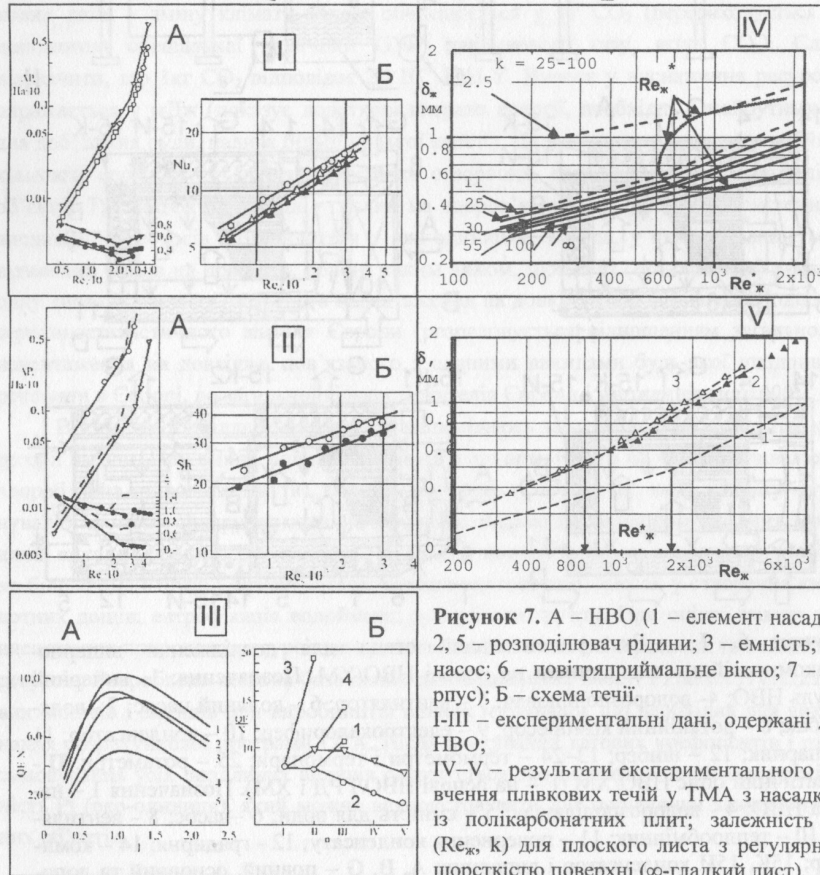
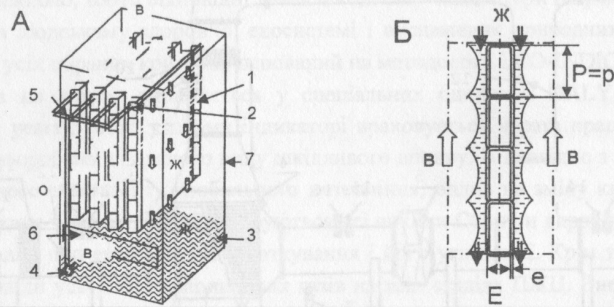


Рисунок 7. А – НВО (1 – елемент насадки; 2, 5 – розподільвач рідини; 3 – ємність; 4 – насос; 6 – повітряприймальне вікно; 7 – корпус); Б – схема течії.

I-III – експериментальні дані, одержані для НВО;

IV-V – результати експериментального вивчення плівкових течій у ТМА з насадкою із полікарбонатних плит; залежність $\delta_{ж}$ ($Re_{ж}$, k) для плоского листа з регулярною шорсткістю поверхні (∞ -гладкий лист).

Найбільш складним моментом є визначення «ваги» кожної категорії, оскільки вони мають різні розмірності (вплив на зміну клімату – кг CO₂, на руйнування озонового шару – кг R11, вплив на утворення кислотних дощів – кг SO₂). У роботі цей етап аналізу виконувався з використанням бази даних програми «SIMAPRO-6». При виконанні аналізу використовувалися середні дані для країн Євросоюзу.

Порівняльний аналіз традиційних і випарно-парокомпресійних охолоджувачів на основі НВО/ХМ. В альтернативному охолоджувачі у першому ступені виконується НВО, а у другий - даховий кондиціонер французького виробництва СААЕ/САЕН-31; для порівняння взятий кондиціонер СААЕ/САЕН-51 (холодопродуктивність у порівнюваних варіантах однакова, 16.5кВт). На стадії виробництва враховується вплив процесів: здобичі сировини (включаючи здобич нафти і газу для виробництва пластмас), виробництва металів та матеріалів, виробництва деталей СКП, їх збірки і транспортування. Сюди включено і повторне використання металів. В моделі прийнято, що 50 % сталі, 40 % міді та 30 % алюмінію вироблено із брухту (це відповідає середнім даним по повторному використанню матеріалів у ЄС). На рис. 10 надані результати аналізу. Видно, що по всіх трьох категоріях екологічного впливу традиційна СКП поступається альтернативній. На стадії експлуатації СКП враховується енергоспоживання систем і витоків холодоагенту. Споживання електроенергії за час експлуатації СКП визначено з урахуванням профілю добового навантаження. Видно, що по всіх трьох категоріях екологічного впливу традиційна СКП також поступається альтернативній. Тут різниця ще більш суттєва, ніж для періоду виробництва систем. Враховано, що після закінчення експлуатації СКП демонтується і надсилається на утилізацію. Тут переваги зберігаються також за альтернативною системою. Випарно-парокомпресійна система на основі НВО/ХМ виявляє суттєво менший шкідливий вплив на довкілля, ніж традиційна по всіх трьох порівнюваних категоріях. Найбільший вплив на довкілля призводиться під час експлуатації системи і пов'язано з енергоспоживанням СКП. Загальний екологічний вплив у цей період для альтернативної системи складає до 65% від цього ж впливу для традиційної.

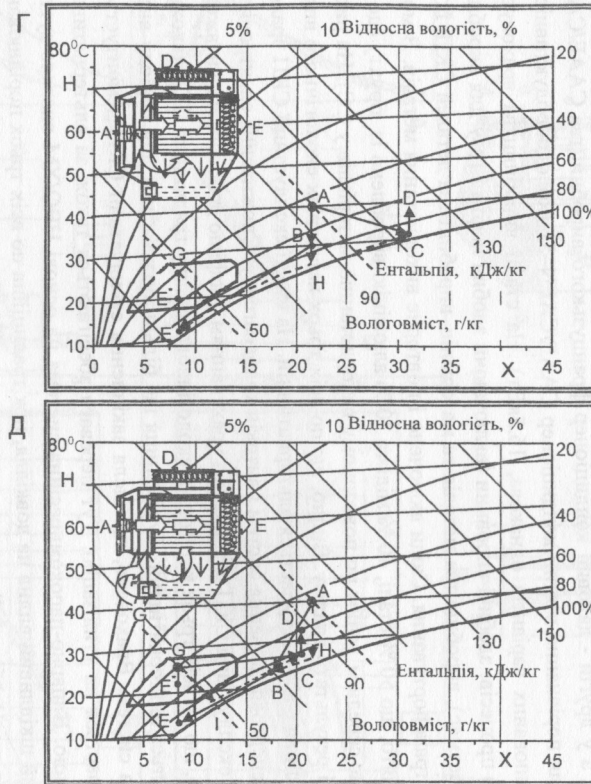
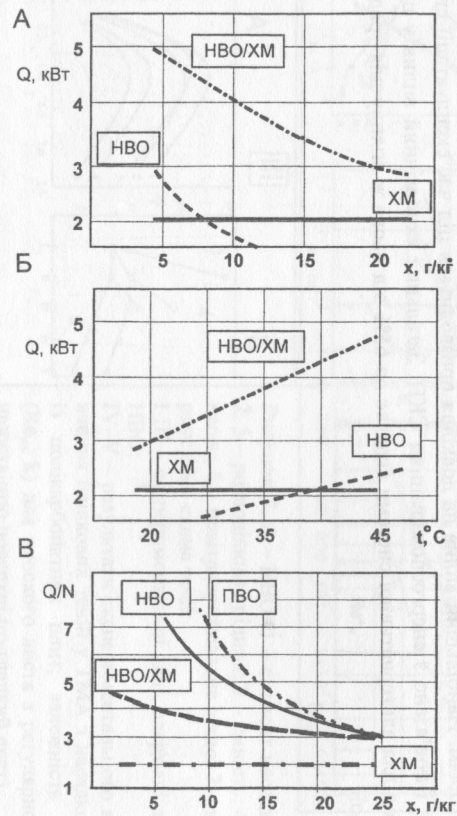


Рисунок 8. А, Б, В - залежність холодопродуктивності НПО, ХМ і комбінованої системи НПО/ХМ від вологовмісту (А) і температури зовнішнього повітря (Б); залежність питомої холодопродуктивності Q/N від вологовмісту (В). Г, Д - хід процесів на Н-Х діаграмі в комбінованій системі НПО/ХМ для прямооточного і рециркуляційного варіантів СКП: А - зовнішнє повітря; D - допоміжний повітряний потік після конденсатору; E - основний повітряний потік після випарника ХМ; G - рециркуляційний потік повітря.

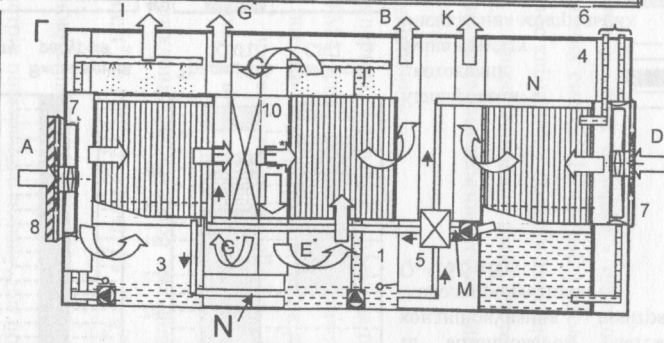
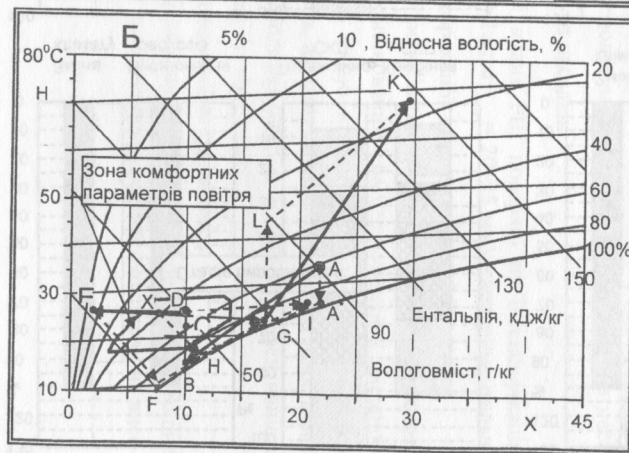
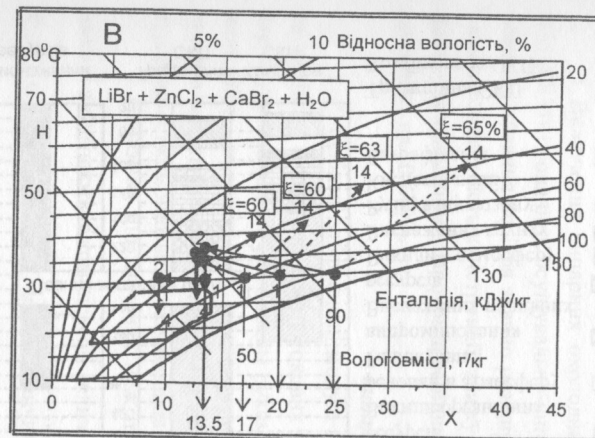


Рисунок 9. Процеси у АСКП для прямої (А) і рециркуляційної схем (Б); вплив вологості зовнішнього повітря на характеристики АСКП (В). Блок охолодження АСКП (Г).

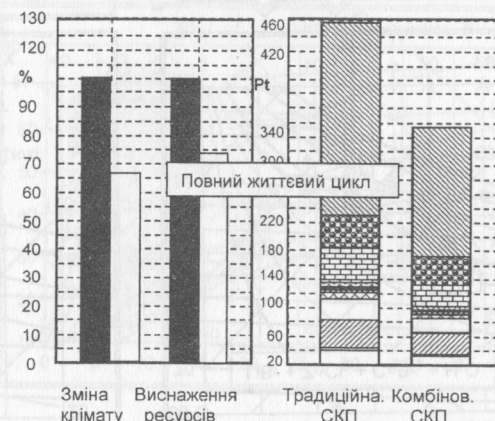
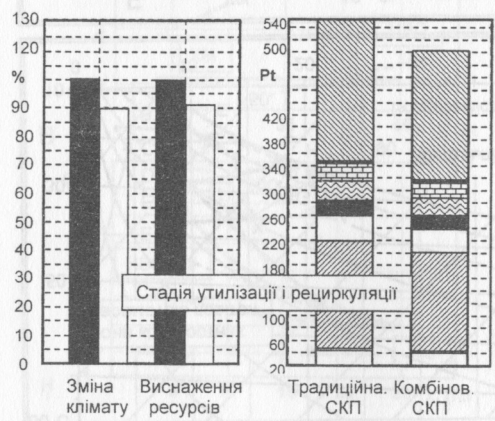
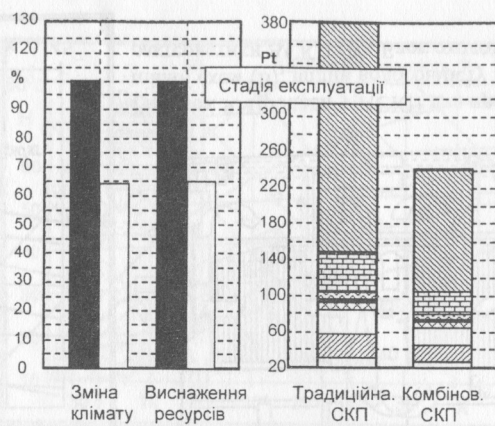
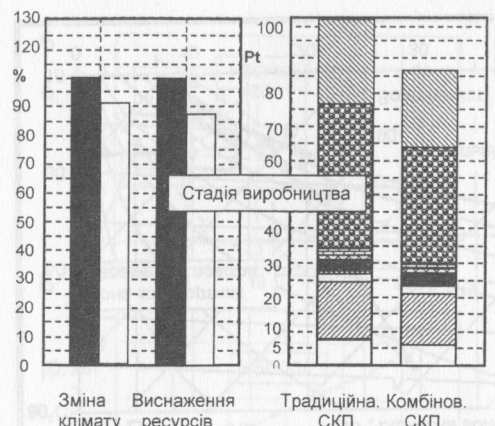


Рисунок 10. Порівняння екологічного впливу повного життєвого циклу двох порівнюваних, традиційної та комбінованої, систем кондиціонування повітря (холодопродуктивність $Q_0=16,5$ кВт)

- Канцерогени
- Екотоксини
- Зміна клімату
- Виснаження мінеральних ресурсів
- Викиди органічних речовин в атмосферу
- Радіоактивне випромінювання
- Виснаження паливних ресурсів
- Викиди у атмосферу
- Виснаження ґрунту
- Руйнування озону
- Кислотні дощі
- Евтрофікація
- Традиційна СКП
- Комбінована СКП

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Включення випарних охолодників у склад випарно - парокомпресійних (НВО/ХМ) і сонячних осушувально-випарних систем (НВО/АБС.) охолодження та кондиціонування повітря значно розширює кліматичну область використання, підвищує компактність конструкції, знижує енергоспоживання таких систем (в порівнянні з традиційними парокомпресійними системами забезпечується зниження енерговитрат на 30-60%).

випарні охолодники

2. Розроблені уніфіковані модулі випарних охолодників прямого та непрямого типів на основі поперечнотокових ТМА плівкового типу з багатоканальною структурою насадки і роздільним рухом потоків газу і рідини, а також регулярною шорсткістю поверхні для інтенсифікації процесів тепломасообміну, дозволяють суттєво знизити рівень охолодження та можуть використовуватись в складі багатуступневих і комбінованих охолодників.

3. Показано, що значення меж протікання процесів при випарному охолодженні визначаються комплексом величин: $t_m^0 = f(t_{ж}^1, t_m^1, l = G_r/G_{ж})$; $h_{г.пред}^{2*} = f(t_{ж}^1, t_m^1, l = G_r/G_{ж})$, в першу чергу, величиною співвідношення $l = G_r/G_{ж}$ (для НВО $l = G_o/G_v$); правильне визначення параметрів повітряного потоку, що покидає апарат, відіграє важливу роль, оскільки дозволяє запобігти небезпеки повного насичення повітряного потоку до його виходу із насадки.

4. Експериментально встановлено: вплив РШ поверхні на інтенсифікацію процесів ($k_{opt} = p/e = 11-25$; $l = G_o/G_v = 1.0$; $d_{3,opt} = 20-25$ мм); експериментально одержані залежності, що забезпечують розрахунок і проектування ВО.

5. Експериментальне дослідження процесів тепломасообміну в випарних охолодниках прямого і непрямого типів, комбінованих і багатуступневих випарних охолодниках, дозволило встановити, що число ступенів у каскаді охолодників НВО/НВО не доцільно перевищувати двох, а також рекомендувати для практичного використання двуступеневу схему охолодника у складі НВО/ПВО, ефективність якої не набагато менша, але енерговитрати суттєво нижчі.

випарно-парокомпресійні охолодники

6. Створення випарно - парокомпресійних систем на основі НВО (перший ступінь) і ХМ (другий ступінь) дозволяє «включити» випарний охолодник на висо-

кому температурному рівні, де він достатньо ефективний, і використовувати допоміжний повітряний потік для обдування конденсатора ХМ.

7. Об'єднання НВО і ХМ у єдину систему дозволяє знизити витрати води на підживлення для заміни випаруваної у НВО; кількість води, що сконденсувалася на поверхні випарника ХМ, прямо пропорційна вологості оброблюваного повітря, а кількість випаруваної води у допоміжних каналах НВО – зворотно пропорційна його вологості; при відносній вологості 35–45% втрати на випарування можуть бути компенсовані повністю.

8. Результати зіставлення випарно - парокompресійного кондиціонера (у першій ступені НВО і у другий даховий кондиціонер СААЕ/САЕН – 31) із кондиціонером СААЕ/САЕН – 51, показали, що комбінована схема дозволяє знизити встановлену потужність компресора з 16.8 до 11.3 кВт; забезпечує зниження температури конденсації від 45°C до 35°C і зниження витрати енергії на стискування на 14%; з'являється можливість повного повернення води у випарний контур.

осушувально-випарні охолодники

9. Для створення альтернативних систем перспективний відкритий абсорбційний цикл із використанням сонячної енергії для регенерації сорбенту; переважною областю практичного використання таких систем є кондиціонування повітря, що обумовлено кореляцією між інсоляцією і рівнем охолодження, який потрібен, і порівняно невисокими температурами регенерації абсорбенту.

10. Розроблені схемні рішення АСКП виключають прямий контакт абсорбенту і повітря, що подається у приміщення; розроблено уніфіковану тепломасообмінну апаратуру, основу на принципі суміщення декількох робочих процесів у єдиному ТМА, а також на широкому використанні полімерних матеріалів у конструкції ТМА, зокрема, в конструкції сонячного колектора СК; розроблені СК забезпечують необхідний температурний рівень регенерації абсорбенту.

11. Для розглянутого діапазону початкових параметрів повітря ($x_r = 13\text{--}25$ г/кг, $t_r = 20\text{--}45$ °C) попереднє осушування дозволяє знизити його волого вміст до значення $x_r < 13$ г/кг, що забезпечує можливість одержання комфортних параметрів повітря тільки методами випарного охолодження; порівняно із традиційними парокompресійними системами, АСКП забезпечує зниження енерговитрат (30–60%).

Екологічна оцінка нових рішень

12. Виконаний загальний екологічний аналіз альтернативних рішень в області холодильних і кондиціонуючих систем з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл» (Life Cycle Assessment, міжнародні стандарти (ISO 14040,

14041, 14042 и 14043, «eco-indicator 99», база даних програми «SimaPro-6»); робота виконувалась сумісно з Австралійським дослідницьким центром (Commonwealth Science and Industrial Research Organisation, 3072, Australia).

13. Альтернативна система АСКП (НВ/ХМ) приводить до меншого виснаження природних ресурсів, ніж традиційна СКП; вона вносить менший внесок у глобальну зміну клімату. Найбільший вплив на довкілля призводиться під час експлуатації системи; внесок періоду виробництва складає близько 20% від внеску за весь життєвий цикл, а внесок періоду утилізації незначний; загальний екологічний вплив для альтернативної системи складає всього 64.5% від цього ж впливу для традиційної системи.

14. Вибір АСКП і АХС по двох критеріях, що аналізуються (вплив на виснаження природних ресурсів і внесок у глобальне потепління) сприяє реалізації закону України про енергозбереження і Кіотського протоколу, націленого на зниження емісії парникових газів; загальний екологічний вплив для традиційної СКП також більше, ніж для альтернативної, що ще раз підтверджує переваги останньої.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії по темі роботи

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. – Донецк.: Норд-Пресс, ОГАХ, 2006. – 341 с.
2. Ландик В.И., Шевченко В.П., Шубин А.А., Самсоненко А.А., Жидков В.В., Филипцов С.Н., Ступин А.Б., Горин А.Н., Гейер Г.В., Красновский И.Н. Научно-технические основы создания современных бытовых холодильных приборов. – Донецк.: ДонНУ, 2002. – 200 с.

Стандарти

3. Горин О.М., Розен В.П., Мамченко С.В., Нуждина Ю.А., Соловей О.І., Шульга Л.А., Шульга Ю.І. Енергетичне маркування електрообладнання побутового призначення: Визначення енергетичної ефективності кондиціонерів повітря. ДСТУ 4352:2004: Видання офіційне. К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 14 с.

Статті по темі роботи

4. Концов М.М., Дорошенко А.В., Филипцов С.Н., Горин А. Н. Интенсификация тепло- и массообмена в аппаратах альтернативных холодильных систем // Холодильна техніка і продовольча безпека: Сб. наук. праць наук.-техн. конференції м. Одеса, 22 груд. 2004. – Одеса, 2004. - С. 39 – 46. *Особистий внесок: постановка задачі, участь у виконанні розрахунків, аналіз розрахунків.*
5. Горин А.Н. Испарительные охладители непрямого типа // Вісник Донецького університету: Серія А: Природничі науки: Науковий журнал. – Донецьк: ДонНУ, 2006. – Т.1., Ч.2. – С.222-229. *Особистий внесок: постановка задачі.*

6. Горін О.М. Випарні охолоджувачі непрямого типу. Експериментальне дослідження // Вісник Донецького університету: Серія А: Природничі науки: Науковий журнал. – Донецьк: ДонНУ, 2006. – Вип 2. – С. 167-175. *Особистий внесок: постановка задачі, участь у виконанні розрахунків аналіз розрахунків.*

7. Горін О.М., Шубін О.О., Самсоненко О.О., Філіпцов С.М. Екологічні проблеми сучасної холодильної промисловості // Обладнання та технології харчових виробництв: Тематичний збірник наукових праць. Вип. 9. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2003 – С. 248-255. *Особистий внесок: аналітичне дослідження.*

8. Дорошенко А.В., Филипцов С.Н., Горин А.Н. Испарительные охладители непрямого и комбинированного типов // Холодильная техника и технология. – 2004. – №6. – С. 15-22. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

9. Дорошенко А.В., Демьяненко Ю.И., Филипцов С.Н., Горин А.Н. Испарительные охладители непрямого и комбинированного типов для СКВ // Холодильная техника и технология. – 2005. – № 2. – С.46–52. *Особистий внесок: постановка задачі, участь у виконанні розрахунків, аналіз розрахунків.*

10. Дорошенко А.В., Демьяненко Ю.И., Филипцов С.Н., Горин А.Н. Испарительные охладители комбинированного типа для систем кондиционирования воздуха // АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика). – 2005. – №6. – С. 58-63. *Особистий внесок: виконання розрахунків.*

11. Филипцов С.Н., Горин А.Н., Дорошенко А.В., Демьяненко Ю.И. Энергетические и экологические аспекты применения испарительных охладителей непрямого и комбинированного типов для СКВ // Вісник Донецького університету: Сер. А: Природничі. Науки: Науковий журнал. – Донецьк: ДонНУ, 2005. – Т.1., Ч.2. – С. 368 – 374. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

12. Дорошенко О.В., Дем'яненко Ю.І., Філіпцов С.М., Горін О.М. Випарні охолоджувачі комбінованого типу для систем кондиціонування повітря // Ринок інсталяцій: теплотехніка, сантехніка, газопостачання. – 2005. – №7-8. – С.16-19. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

13. Филипцов С.Н., Горин А.Н., Дорошенко А.В., Федоров А.Г. Экспериментальный стенд для изучения охладителей испарительно-парокомпрессионного типа // Холодильная техника и технология. – 2006. – №1. – С. 5–9. *Особистий внесок: виконання розрахунків.*

14. Горін О.М. Випарно-парокомпресійний охолоджувач //Збірник наукових праць ДДТУ (технічні праці). – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2006. – С. 179-184. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

15. Горин А.Н. Экспериментальное изучение комбинированных испарительно-парокомпрессионных охладителей // Металл и литье Украины / Физико-технологический институт металлов и сплавов. – К., 2006. – №11-12. – С. 22-26. *Особистий внесок: участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

16. Горин А.Н., Чепурненко В.П., Дорошенко А.В. Экспериментальное изучение комбинированных испарительно-парокомпрессионных охладителей // Холодильная техника и технология. – 2006. – №6 (104). – С. 8-13. *Особистий внесок: участь у виконанні експериментальних досліджень.*

17. Дорошенко А.В., Горин А.Н. Альтернативные системы кондиционирования воздуха. Солнечные холодильные и кондиционирующие системы на основе открытого абсорбционного цикла // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование. – 2005. – №1. – С. 60-64. *Особистий внесок: постановка задачі, участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

18. Горин А.Н. Солнечные системы кондиционирования воздуха // Современные проблемы холодильной техники и технологии: Сб. науч. трудов 4-ой Междунар. науч.-техн. конф., г. Одесса, 21-23 сент. 2005 г. – Одесса: ОГАХ, 2005 – С. 34-35. *Особистий внесок: постановка задачі, участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

19. Дорошенко А.В., Горин А.Н. Солнечные холодильные и кондиционирующие системы // Отопление, водоснабжение, вентиляция + кондиционеры. – 2005. – №1. – С. 67–72. *Особистий внесок: участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

20. Дорошенко А.В., Горин А.Н. Солнечные системы кондиционирования воздуха // Холодильная техника и технология. – 2005. – №1. – С. 41-47. *Особистий внесок: аналіз розрахунків.*

21. Дорошенко А.В., Аль-Гарби Набиль Муса, Горин А.Н. Солнечные СКВ с прямой регенерацией абсорбента // Холодильная техника и технология. – 2005. – №5 (97). – С. 51-55 (перепечатка в журнале Холодильная техника, Россия. – 2006. – №2. – С. 52-56). *Особистий внесок: аналіз розрахунків.*

22. Горін О.М. СКП на основі сонячного абсорбційного циклу // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. збірник наукових праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2006. – Вип. 15. – С. 10-18. *Особистий внесок: аналіз розрахунків.*

23. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Чепурненко В.П. Солнечные системы теплоснабжения // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса: ОПИ, 2006. – Вып. 2 (26). – С. 79-82. *Особистий внесок: участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

24. Горин А.Н. Солнечные системы теплоснабжения ССГВ // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – №28. – С.31-42. *Особистий внесок: участь у виконанні розрахунків та аналіз розрахунків.*

25. Дорошенко А.В., Хлиева О. Горин А.Н., Koltun P. Эколого-энергетическая оценка испарительно-парокомпрессионных охладителей на основе анализа полного жизненного цикла (Life Cycle Assessment) // Холодильная техника и технология. – 2006. – №3 (101). – С. 41–48. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

26. Горин А.Н. Эколого-энергетическая оценка испарительно-парокомпрессионных охладителей на основе методологии полного жизненного цикла (Life Cycle Assessment) // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб. наук. праць. – Харків: Харківській державний університет харчування та торгівлі, 2006. – Вип.1(3). – С. 188-202. *Особистий внесок: постановка задачі, аналітичне дослідження.*

Патенти України по темі роботи

27. Дорошенко О.В., Дем'яненко Ю.І., Горін О.М., Філіпцов С.М. Спосіб непря-

мого випарного охолодження повітря або води. Патент України на винахід № 73696. Зареєстрований 15.08.05. Опублікований 15.08.05. Бюлетень №8.

28. Дорошенко О.В., Дем'яненко Ю.І., Горін О.М., Філіпцов С.М. Спосіб двохступінчатого комбінованого охолодження і кондиціонування повітря. Патент України на винахід № 73697. Зареєстрований 15.08.05. Опублікований 15.08.05. Бюлетень №8.

29. Дорошенко О.В., Дем'яненко Ю.І., Горін О.М., Філіпцов С.М. Спосіб сонячного охолодження і кондиціонування повітря. Патент України на винахід № 73698. Зареєстрований 15.08.05. Опублікований 15.08.05. Бюлетень №8.

30. Дорошенко О.В., Федоров А.Г., Горін О.М., Філіпцов С.М. Випарний охолоджувач непрямого типу. Патент України на винахід № 74525. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

31. Дорошенко О.В., Дем'яненко Ю.І., Бузань А.В., Горін О.М., Філіпцов С.М. Двоконтурна мокра-суха вентиляторна градирня. Патент України на винахід № 74524. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

32. Дорошенко О.В., Горін О.М., Філіпцов С.М. Абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням. Патент України на винахід № 74526. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

33. Горін О.М., Філіпцов С.М., Дорошенко О.В., Шестопапов К.О., Сухнатов А.В. Полімерний сонячний колектор. Патент України на винахід № 74522. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

34. Горін О.М., Філіпцов С.М., Дорошенко О.В., Глауберман М.А., Гліксон А.Л. Полімерний сонячний колектор. Патент України на винахід № 74521. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

35. Дорошенко О.В., Глауберман М.А., Горін О.М., Філіпцов С.М. Плоский сонячний металополімерний колектор, Патент України на винахід № 74523. Зареєстрований 15.12.05. Опублікований 15.12.05. Бюлетень №12.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

T , t - температура; p - тиск; h - ентальпія; x - вологовміст; c_p - теплоємність; ρ - густина; r - прихована теплота пароутворення; ϕ - відносна вологість; ξ - концентрація абсорбенту у розчині; I - інтенсивність сонячної радіації; τ - час; δ - товщина рідинної плівки; G - масова витрата; Q - кількість тепла; $I = G_r/G_{ж}$ - співвідношення витрат потоків газу і рідини; $I = G_r/G_v$ - співвідношення основного і допоміжного повітряних потоків у НВО; U - коефіцієнт теплових втрат; R - термічний опір; E - ефективність; COP - коефіцієнт корисної дії (coefficient performance); α - коефіцієнт теплообміну; β - коефіцієнт масообміну; Nu , Sh , Pr , Re , Fr , We - числа Нуссельта, Шервуда, Прандтля, Рейнольдса, Фруда і Вебера, відповідно. Індекси: $г$, $ж$ - газ, рідина; $п$, $о$, $в$ - повний, основний і допоміжний повітряні потоки; $м$, $р$ - температура повітря по мокрому термометру і температура точки роси; s - розчин абсорбенту (сл, кр - слабкий і міцний розчин); $ід$ - ідеальний.

АНОТАЦІЯ

Горін О. М. «Альтернативні системи охолодження і кондиціонування повітря з використанням випарного охолодження». – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.05.14 – «Холодильна та криогенна техніка», присвячена розвитку наукових і інженерних основ створення альтернативних систем кондиціонування повітря з використанням методів випарного охолодження. Особливий інтерес являють випарні охолодники непрямого типу НВО, у яких охолодження повітря досягається без прямого контакту з водою. Розроблено НВО на основі апаратів плівкового типу з багатоканальною структурою насадки і роздільним рухом потоків газу і рідини, а також регулярною шорсткості поверхні, як метод інтенсифікації тепломасообміну. Виконано моделювання процесів сумісного тепломасопереносу у НВО з урахуванням: термічних опорів потоків газу і рідини, особливостей течії рідинної плівки по поверхням із РШ, характеру розподілення сухих і змочених ділянок поверхні насадки. Експериментально одержані залежності, що забезпечують розрахунок і проектування охолодників. Розглянуто умови роботи випарних охолодників прямого і непрямого типів, комбінованих і багатоступеневих.

Створення випарно-парокомпресійних систем дозволяє «включити» випарний охолодник на високому температурному рівні, де він достатньо ефективний, і використати допоміжний повітряний потік для обдування конденсатора ХМ, а також знизити витрати води на підживлення замість випаруваної у НВО. Показано, що при відносній вологості 35–45%, витрати на випарювання можуть бути компенсовані повністю.

Переважною областю практичного використання відкритого абсорбційного циклу з використанням сонячної енергії для регенерації сорбенту (осушувально-випарні охолодники) є кондиціонування повітря. Розроблено схемні рішення АСКП, у яких виключається прямий контакт абсорбенту і в повітря, що подається у приміщення, та уніфікована тепломасообмінна апаратура, основана на принципі суміщення декількох робочих процесів у єдиному ТМА а також на широкому використанні полімерних матеріалів. Розроблені СК забезпечують потрібний температурний рівень регенерації абсорбенту. Показано, що для широкого діапазону початкових параметрів повітря попереднього осушування забезпечує можливість одержання комфортних параметрів повітря тільки методами випарного охолодження.

Виконано загальний екологічний аналіз альтернативних рішень з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл» Альтернативна система АСКП (НВО/ХМ) приводить до меншого виснаження природних ресурсів, ніж тра-

диційна і вносить менший внесок у глобальну зміну клімату. Показано, що найбільший вплив на довкілля призводиться під час експлуатації системи; внесок періоду виробництва складає близько 20% від внеску за весь життєвий цикл, внесок періоду утилізації незначний, загальний екологічний вплив для альтернативної системи складає всього 65% від цього ж впливу для традиційної системи.

Ключові слова: альтернативна система, охолодження, кондиціонування повітря, сонячна система, гідродинаміка, тепломасообмін, абсорбер - осушувач, десорбер-регенератор, абсорбент, випарний охолодник, насадка регулярної структури, полімерні матеріали, повний життєвий цикл, екологічний вплив.

АННОТАЦІЯ

Горин Александр Николаевич «Альтернативные системы охлаждения и кондиционирования воздуха с использованием испарительного охлаждения». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования». Одесская государственная академия холода, – Одесса, 2007.

Диссертация посвящена развитию научных и инженерных основ создания альтернативных систем с использованием методов испарительного охлаждения, эффективность которых ограничено климатическими условиями и необходимостью подпитки водой испарительного контура. Рассмотрены два решения этой проблемы: интегрирование естественных и искусственных методов охлаждения в испарительно-парокомпрессионных системах; создание осушительно-испарительных охладителей на основе открытого абсорбционного цикла и солнечной регенерации абсорбента и последующего использования непрямого испарительного охлаждения.

Особый интерес представляют испарительные охладители непрямого типа НИО, в которых охлаждение воздуха достигается без прямого контакта с водой. Разработаны НИО на основе аппаратов пленочного типа с многоканальной структурой насадки и раздельным движением потоков газа и жидкости, а также регулярной шероховатости поверхности (РШ). Выполнено моделирование процессов совместного тепломассопереноса в НИО с учетом термических сопротивлений потоков газа и жидкости, особенностей течения жидкостной пленки по поверхностям с РШ и характера распределения сухих и смоченных участков поверхности насадки.

Показано, что значения пределов протекания процессов при испарительном охлаждении определяются комплексом величин: $t_m^0 = f(t_j^1, t_m^1, l = G_r/G_j)$; $h_{г.пред}^{2*} = f$

$(t_j^1, t_m^1, l = G_r/G_j)$, в первую очередь, величиной соотношения $l = G_r/G_j$ (для НИО $l = G_o/G_b$). Экспериментально установлены: влияние РШ поверхности на интенсификацию процессов ($k_{опт} = p/e$; $l = G_o/G_b = 1.0$; $d_{з.опт} = 20-25$ мм) и получены зависимости, обеспечивающие расчет и проектирование охладителей. Рассмотрены условия работы испарительных охладителей прямого и непрямого типов, комбинированных и многоступенчатых; показано, что число ступеней в каскаде охладителей НИО/НИО не должно превышать двух, а оптимальной является схема охладителя в составе НИО/ЛПО.

Создание испарительно-парокомпрессионных систем позволяет «включить» испарительный охладитель на высоком температурном уровне, где он достаточно эффективен, и использовать вспомогательный воздушный поток для обдува конденсатора ХМ. При относительной влажности 35–45%, потери на испарение могут быть компенсированы полностью. Разработанная комбинированная система в составе НИО/ХМ полностью обеспечивает получение комфортных параметров воздуха без климатических ограничений и снижает энергозатраты. Она позволяет рационально интегрировать испарительные методы охлаждения, существенно снижая основной недостаток этих методов, заключающийся в необходимости подпитки испарительного контура свежей водой.

Осушительно-испарительные охладители. Предпочтительной областью практического использования открытого абсорбционного цикла с использованием солнечной энергии для регенерации сорбента является кондиционирование воздуха, что обусловлено корреляцией между инсоляцией и требуемым уровнем охлаждения и сравнительно невысокими температурами регенерации абсорбента. Разработаны схемные решения АСКВ, в которых исключается прямой контакт абсорбента и подаваемого в помещение воздуха и унифицированная тепломассообменная аппаратура, основанная на принципе совмещения нескольких рабочих процессов в едином ТМА а также на широком применении полимерных материалов. Разработанные СК обеспечивают требуемый температурный уровень регенерации абсорбента. Оценка рабочих тел (абсорбентов) на основе LiBr, показала их принципиальную пригодность для решения задач охлаждения и кондиционирования; ориентировочный рабочий диапазон концентраций составляет 70–75%. Показано, что для широкого диапазона начальных параметров воздуха предварительное осушение позволяет снизить его влагосодержание до значения $x_r < 13$ г/кг, что обеспечивает возможность получения комфортных параметров только методами испарительного охлаждения; в сравнении с традиционными парокомпрессионными системами, АСКВ обеспечивает снижение энергозатрат (30–60%).

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»). АСКВ приводит к меньшему истощению природных ресурсов, чем традиционная и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата. Показано, что наибольшее воздействие на окружающую среду производится во время эксплуатации системы; вклад периода производства составляет около 20% от вклада за весь жизненный цикл, а вклад периода утилизации незначителен; общее экологическое воздействие для альтернативной системы составляет всего 65% от этого же воздействия для традиционной системы. Выбор альтернативных решений по двум критериям (влияние на истощение природных ресурсов и вклад в глобальное потепление) способствует реализации закона Украины об энергосбережении и Киотского протокола, направленного на снижение эмиссии парниковых газов.

Ключевые слова: альтернативная система, охлаждение, кондиционирование воздуха, солнечная система, гидродинамика, тепломассообмен, абсорбер-осушитель, десорбер-регенератор, абсорбент, испарительный охладитель, насадка регулярной структуры, полимерные материалы, полный жизненный цикл, экологическое влияние.

ABSTRACT

Gorin A. N. "Alternative systems of cooling and air conditioning with the use of evaporative cooling". - Manuscript.

The theses on competition of a academic degree of Doctor of Technical Sciences in the speciality 05.05.14 - "Refrigeration and Cryogenic Engineering, and Air Conditioning Systems" The Odessa State Academy of Refrigeration, - Odessa, 2007.

The dissertation is devoted to the development of scientific and engineering of creation of alternative systems of cooling and air conditioning with the use of evaporative coolings fundamentals. In particular evaporative coolers of indirect type IEC are considered in which cooling of air is achieved without direct contact to water. IEC on the basis of devices of film type with multichannel structure of a nozzle and separate movement of streams of gas and liquid have been developed as well as regular roughness of a surface (RS) well used as method of intensification of heat and mass-transfer.

Modeling joint heat and mass transfer processes in IEC with the account of the thermal resistance of streams of gas and a liquid flow feature of a liquid film on surfaces with RS, the character of distribution of the dry and moistured sites on a surface of a nozzle has been conducted. The experimental dependences for calculation and design of coolers are experimentally received. Operating conditions of evaporative coolers of direct and indirect types (combined and multistage) have been considered.

Creation of evaporative-refrigeration systems (IEC/RM) allows one "to turn on" the evaporative cooler at a high temperature level where it is effective enough, and to use an auxiliary air stream for condenser RM, and also to lower the charge of water on additional charging in IEC. It was shown, that at relative humidity of 35-45 %, the evaporation losses can be compensated completely.

Preferable area of practical use of open absorption cycle with the use of solar energy for regeneration of a sorbent is the air conditioning. Circuit designs of AACs in which a direct contact of an absorbent and air submitted in a premise and unified heat and mass transfer apparatus (HMA) based on a principle of overlapping of several working processes in uniform HMA and also on wide application of polymeric materials have been developed. Developed solar collectors SC provide a required temperature level of regeneration of an absorbent. It was shown, that for a wide range of initial parameters of air preliminary dehumidification provides an opportunity to achieve comfortable parameters of air with methods of evaporative cooling only.

The general ecological analysis of alternative systems with use of methodology and the database «Life Cycle Assessment» has been conducted. Alternative system AACs (IEC/RM) lead to a smaller exhaustion of natural resources, than traditional ones and make smaller contribution to global climate change. It was demonstrated, that the greatest environment impact is made during operation of a system; the contribution of the manufacturing period of makes about 20 % from the contribution the life cycle, and the contribution of the period of recycling is insignificant; the general ecological influence for alternative system makes only 65 % from the same influence for traditional system.

Key words: alternative system, cooling, air conditioning, solar system, hydrodynamics, heat and mass transfer, absorber, desorber-regenerator, absorbent, evaporative cooler, nozzle of regular structure, polymeric materials, ecological influence.