

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Радченка Миколи Івановича, завідувача кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України на дисертаційну роботу Гончаренка Володимира Анатолійовича "Інтенсифікація процесів у тепломасообмінних апаратах з рухомою насадкою для багатофункціональних сонячних холодильних систем", представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування

**Загальна характеристика роботи.** Робота виконана в Одеській Національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Вона містить 164 сторінки тексту, 129 сторінок рисунків і таблиць, список літератури з 181 найменувань.

**Оформлення дисертації.** Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення".

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених завдань дослідження, матеріал викладено грамотною технічною мовою.

Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій.

Зміст автореферату ідентичний змісту дисертації і відображає основні положення роботи.

**Зміст дисертації, об'єкт і предмет** дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.05.14 "Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування".

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет, мету та основні завдання дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, відображено повноту їх викладення у публікаціях та ступінь апробації на конференціях, зазначено особистий внесок здобувача у працях зі співавторами. Обсяг та форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до кандидатських дисертацій і достатні для ознайомлення з вихідними передумовами та змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі проаналізовано проблеми вдосконалення багатофункціональних сонячних систем теплохолодопостачання та кондиціонування повітря на основі осушувально-випарних методів і сонячної енергії. За результатами аналітичного огляду багатофункціональні сонячні системи осушувально-випарного типу з непрямую регенерацією абсорбенту визначено як перспективний напрям розвитку сонячної енергетики,

сформульовано цілі і завдання дослідження, наукову новизну і основні результати роботи, її практичну цінність.

**Другий розділ** присвячений розробці схемних рішень сонячних багатофункціональних холодильних систем (СХС) і систем кондиціонування повітря (ССКП) осушувально-випарного типу, відповідної тепломасообмінної апаратури (ТМА) для сонячних систем, а також вибору робочого тіла для осушувальних контурів систем. Визначено перспективні принципові рішення сонячних холодильних систем: сонячні тепловикористовуючі системи абсорбції з непрямою регенерацією абсорбенту; сонячні полімерні колектори СКр; використання ТМА з рухомою псевдозрідженою насадкою РНт-к в осушувальному і охолоджувальному контурах сонячних систем.

Як абсорбенти використовуються водні розчини бромистого літію з добавками, що знижують корозійну активність і збільшують розчинність: розчини LiBr ( $H_2O+LiBr$ ) і  $LiBr+(H_2O+LiBr+LiNO_3)$ ; концентрація LiBr 60-65% при температурі регенерації абсорбенту 30-60°C.

Детальний аналіз процесів тепломасообміну в осушувальному і охолоджувальному контурах сонячних холодильних систем дав змогу автору розробити принципово нові і перспективні схемні рішення з використанням теплового (охолоджувального) потенціалу відпрацьованих у випарних охолоджувачах, абсорберах і десорберах повітряних і рідинних потоків, вперше поширити принцип регенерації на теплові потоки в холодильному і абсорбційно-десорбційному циклах.

Розроблені варіанти як охолоджувального контуру непрямого типу води (рідини) НВОр або повітря (газу) НВОг, так і осушувального контуру абсорбера АБР і десорбера-регенератора ДБР з розмежуванням об'єму рухомих насадок РНт-к на псевдозріджені шари насадки між елементами теплообмінника і розміщенням об'єму РНт-к між секціями теплообмінника, які виконують функцію опорно-роздільних решіток ОРР і сепаратора крапельної вологи (принцип багатофункціонального використання ТМА).

Розроблені принципово нові варіанти СХС і ССКП на основі абсорбера внутрішнім випарним охолодженням АБРво, що забезпечує підвищення ефективності процесу абсорбції і додаткове зниження температурного рівня для подальш охолодження.

Наведений у розділі матеріал свідчить про значний обсяг виконаних досліджень, а запропоновані автором вдосконалені схемні рішення сонячних багатофункціональних систем СХС та ССКВ відзначаються принциповою новизною і правомірно віднесені до його важливих наукових результатів.

**Третій розділ** присвячений експериментальному дослідженню процесів гідроаеродинаміки трифазового псевдозрідженого шару насадки "газ-рідина-тверде тіло" у вільному об'ємі (РН) і з розміщенням в його об'ємі теплообмінником (РНт-к). Розглядалися питання гідроаеродинаміки переходу насадки в псевдозріджений стан, гістерезису і захливання шару РН; визначення робочих діапазонів навантажень по газу і рідині та відповідних режимів псевдозрідження насадки, структури трифазового рухомого шару з урахуванням затримки рідини, динамічної висоти шару РН тощо; оптимального

режиму роботи колони з рухомою насадкою і відповідних геометричних параметрів елементів і шару РНт-к, матеріалу елементів; раціонального принципу компоновки шару РНт-к, включаючи тип і число теплообмінних елементів в об'ємі псевдозрідженого шару.

Визначено діапазон значень ефективної щільності насадкових елементів  $\rho_{\text{ен}} = 300\text{--}600 \text{ кг/м}^3$ , який в свою чергу допускає експлуатацію в широкому діапазоні швидкостей повітряного потоку  $w_r$  від 2,5 (3,0) до 5,9 (6,3) м/с відповідно до  $\rho_{\text{ен}}$ , що забезпечують прийнятне винесення рідини і порівняльно невелику динамічну висоту шару, а відтак і енергетичні витрати на її підтримання. При цьому ТМА працює в режимі розвинутого псевдозрідження з гомогенним шаром рухомих насадок і при зростанні  $w_r$  (навантажень по повітряному потоку) завдяки компенсуючому механізму розширення шару.

За результатами дослідження режиму "захливання" РН на високих навантаженнях по повітряному потоку побудовані інверсійні криві для різних варіантів розміщення теплообмінних елементів в об'ємі псевдозрідженого шару насадки. Виділені зони початкового і розвинутого псевдозрідженого шару насадки і зони граничних навантажень по повітрю. Вперше отримані дані в діапазоні мінімальних навантажень, які дозволяють запобігати падінню затримки рідини в шарі РНт-к, а відтак і ефективності випарного охолодження як у НВОг, так і в НВОр, без яких неможливий розрахунок і проектування ТМА на основі РН.

**Четвертий розділ** присвячений експериментальному дослідженню процесу випарного охолодження води в градирні ГРД (РН) і НВОр (РНт-к), що дозволило виявити вплив співвідношення масових потоків повітря і рідини  $l = G_r/G_p$  (НВОр) та основного і допоміжного потоків  $l = G_{\text{оп}}/G_{\text{дп}}$  (НВОг) на ступінь наближення до природної межі охолодження – температури повітря за мокрим термометром на вході в апарат  $t_m^1$  та температури води  $t_p^1$  на виході з апарата відповідно до стану насиченого повітря (граничного). Зростання величини  $l$  забезпечує більше наближення до межі при меншому ступені використання повітря  $E_r$ , проте при цьому зростає вірогідність реконденсації вологи з потоку повітря, який скидається у довкілля. Лінія зміни стану повітряного потоку у НВОр має більш виражену кривизну. Ступінь використання допоміжного повітряного потоку у НВОг зі зменшенням величини  $l = G_{\text{оп}}/G_{\text{дп}}$  знижується, однак при цьому зростає загроза реконденсації вологи з допоміжного повітряного потоку, що скидається. Досліджено характер зміни параметрів основного "О" і допоміжного "Д" повітряних потоків у НВОг. Встановлено, що температура води залишається незмінною у циклі і на декілька градусів вище температури повітряного потоку на вході в НВО за мокрим термометром; температури основного і допоміжного повітряних потоків знижуються; вологовміст основного повітряного потоку залишається незмінним.

Результати дослідження ефективності процесів у випарних водоохолоджувачах непрямого типу НВОр з РНт-к узагальнені у вигляді залежностей ступеня використання води  $E_p = (t_p^1 - t_p^2)/(t_p^1 - t_m^1) = f(\Lambda)$  і повітря  $E_r = (h_r^2 - h_r^1)/(h_r^{2*} - h_r^1) = f(\Lambda)$ . Показано, що зменшення живого перетину ОРР  $f_{\text{орр}}$  призводить до зростання ефективності процесу, як і зростання висоти

опорно-роздільної решітки  $h_{\text{орр}}$ . Для величини  $l^* = G_p/G_r = 1$  одержано саме високе значення ступеня охолодження води  $E_{\text{ж}} \approx 60\%$ .

**П'ятий розділ** присвячений вирішенню прикладних завдань розробки й аналізу принципів можливостей СХС і ССКП. Створений типорозмірний ряд вентиляторних двоконтурних градирень з рухомою псевдозрідженою насадкою ГРНдв (НВОр), який включає повністю автономні секції продуктивністю 25, 50 і 100 куб. м/год по охолоджуваній воді і вирішений на основі принципу багатоеlementного масштабування, що істотно знижує вплив проблеми нерівномірності роздачі контактуючих потоків у перерізі апарата. Такі градирні можуть автономно використовуватись у традиційних енергосистемах (холодильних, криогенних, у хімічних виробництвах та інш.) й у складі розроблених СХС.

Розроблена сонячна холодильна система СХС (формула ДБР ↔ АБР → НВОр та інш.) здатна забезпечити охолодження води на рівні  $t_p^2 = 6-10^\circ\text{C}$  і, таким чином, значно розширити практичне використання методів випарного охолодження середовищ, включаючи традиційні холодильні системи харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії. В середньому розроблені ССКП і СХС забезпечують зниження енерговитрат до 35% порівняно з традиційною парокомпресійною технікою. Виконаний порівняльний екологічний аналіз нових рішень для сонячних систем (при порівнянні парокомпресійної СКП і двох альтернативних варіантів ССКП на основі ТМА з РН і РНт-к). Результати виконаного аналізу переконливо свідчать про істотні переваги розроблених ССКП (СХС) на основі рухомої насадки РНт-к за всіма основними екологічними показниками.

**У висновках** наведені основні результати, отримані в ході виконання дисертаційного дослідження. Аналіз результатів і висновків підтверджує, що мета дисертаційної роботи досягнута, а завдання досліджень виконані.

#### **Актуальність теми дисертації**

Взаємозв'язок проблем енергетики та екології диктують підвищені вимоги до сучасних холодильних систем, в першу чергу, зниження витрат і антропогенного впливу на довкілля. Аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних наукових та інженерних досліджень останніх років показав зростання інтересу до випарних методів охолодження середовищ і створення альтернативних систем на їх основі. Особливий інтерес становлять випарні повітря- і водоохолоджувачі непрямого типу НВОг і НВОр. Побудова осушувально-випарних холодильних систем (СХС) і систем кондиціонування повітря (ССКП) на основі відкритого тепловикористовуючого абсорбційного циклу дозволяє зняти кліматичні обмеження застосування випарних методів в ССКП і покращити їх енергетичні та екологічні показники.

Актуальність тематики підтверджується також відповідністю державним програмам розвитку енергетичного комплексу України, законотворчим актам: Постанові Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94р., що затвердила "Закон України про енергозбереження", Постанові Кабінету Міністрів України

№583 від 14.04.99 р. "Про Міжвідомчу комісію із забезпечення виконання Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату" та планам НДР ОНАХТ.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.** В дисертаційній роботі наведено комплексний аналіз існуючої проблеми, теоретичні та практичні дослідження головних аспектів її розв'язання. Всі розділи дисертації підпорядковані досягненню мети дослідження та логічно пов'язані між собою. Отримані результати, висновки та рекомендації науково обґрунтовані.

**Достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій, одержаних в дисертації, на теоретичному та практичному рівнях підтверджується коректним застосуванням математичного апарату, сучасних методів розрахунків, а також результатами експериментальних досліджень в лабораторних умовах.

**Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій** полягає в тому, що автором за результатами теоретичних і експериментальних досліджень:

- обґрунтовано, що створення багатофункціональних сонячних холодильних систем (СХС) і систем кондиціонування повітря (ССКП) доцільне на основі тепловикористовуючого циклу абсорбції, для реалізації якого в ТМА осушувального і охолоджувального контурів вперше була використана рухома псевдозріджена насадка ("газ-рідина-тверде тіло") з розміщенням теплообмінних елементів безпосередньо в шарі насадки (шар РНт-к), що забезпечує ефективну і надійну роботу ТМА на розчинах абсорбентів і запобігання забрудненню теплообмінних робочих поверхонь;
- розроблені принципи раціонального функціонування осушувального і охолоджувального контурів багатофункціональних сонячних холодильних систем з використанням теплового (охолоджувального) потенціалу відпрацьованих у випарних охолоджувачах, абсорберах і десорберах повітряних і рідинних потоків шляхом регенерації тепла в суміщених холодильному та абсорбційно-десорбційному циклах;
- вперше запропонований і реалізований принцип випарного охолодження непрямого (НВОг, НВО-Рг і НВОр) розміщенням теплообмінника безпосередньо в шарі рухомої насадки (шар РНт-к); принцип було реалізовано також в десорберах ДБР і абсорберах АБР контурів сонячних систем СХС, зокрема абсорбера охолодженої води продуктового контуру НВОр, що забезпечує підвищення ефективності процесу абсорбції і зниження температурного рівня подальшого випарного ;
- вперше за результатами експериментальних досліджень визначено раціональний діапазон значень ефективної щільності насадкових елементів  $\rho_{en} = 300-600 \text{ кг/м}^3$ , який в свою чергу дозволяє експлуатацію в широкому діапазоні швидкостей повітряного потоку (навантажень по повітряному потоку)  $w_r$  від 2,5(3,0) до 5,9(6,3) м/с відповідно до  $\rho_{en}$ , що забезпечують функціонування в режимі розвинутого псевдозрідження з гомогенним шаром

рухомих насадок, прийнятне винесення рідини і порівняльно невелику динамічну висоту шару, а відтак і енергетичні витрати на її підтримання;

- результати експериментального дослідження ефективності процесів у випарних водоохолоджувачах непрямого типу НВОр з РНт-к узагальнені у вигляді емпіричних залежностей ступеня використання води  $E_p = (t_p^1 - t_p^2)/(t_p^1 - t_m^1) = f(\Lambda)$  і повітря  $E_r = (h_r^2 - h_r^1)/(h_r^{2*} - h_r^1) = f(\Lambda)$  від співвідношення масових потоків повітря і рідини  $l = G_r/G_p$  (НВОр) та основного і допоміжного потоків  $l = G_{от}/G_{дп}$  (НВОг); отримані залежності, що описують значення критичних швидкостей ( $w'_0, w_l$ ), динамічної висоти, ефективності процесів тепломасообміну в шарі РНт-к; вперше виконано дослідження режиму "захливання" РНт-к на високих навантаженнях по повітряному потоку і збудована інверсійна крива, що дозволяє визначити робочий діапазон навантажень;
- розроблені принципи конструювання уніфікованої ТМА для і охолоджувального контурів сонячних систем з використанням РНт-к;
- розроблені сонячні холодильні системи (СХС) і системи кондиціонування повітря (ССКП), що реалізують запропоновані принципи функціонування і охолоджувального контурів на базі ТМА з рухомою псевдозрідженою насадкою: ССКП (формула ДБР ↔ АБР → НВОг), яка здатна забезпечити комфортні параметри повітря для будь-яких кліматичних умов і значне зниження енерговитрат (до 35%); СХС (формула ДБР ↔ АБР → НВОр), яка забезпечує охолодження води до рівня температур  $t_p^2 = 6-10^\circ\text{C}$  і, таким чином, значно розширює можливість практичного використання методів випарного охолодження середовища у ряді харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії.

### Шляхи використання результатів дослідження

Пропонується впровадження методики конструювання уніфікованої ТМА для і охолоджувального контурів в організаціях, що займаються проектуванням та виготовленням сонячних систем охолодження, а також у вищих навчальних закладах при підготовці фахівців за відповідними навчальними програмами.

### Оцінка змісту дисертаційної роботи

Зміст дисертації відповідає національним вимогам щодо поліпшення енергетичних та екологічних показників систем осушування повітря, теплохолодопостачання і кондиціонування. Одержані автором теоретичні та прикладні результати у сукупності вирішують науково-прикладне завдання розробки багатофункціональних сонячних холодильних систем і систем кондиціонування повітря доцільне на основі тепловикористовуючого циклу абсорбції, що забезпечує скорочення енергетичних витрат і антропогенного впливу на довкілля.

Матеріал подано у логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків по розділах і загальних висновків по роботі, що сприяє її сприйняттю як цілісного дослідження.

Наведені в роботі результати одержані автором **особисто**.

**Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.** Основні результати та положення дисертаційної роботи викладені в 7 наукових статтях у фахових виданнях (дві публікації в журналі Молдавської академії наук), 5 – в наукових виданнях, які входять до наукометричних БД, відповідно до вимог МОН України.

Основні положення роботи апробовані на науково-технічних конференціях та семінарах всеукраїнського та міжнародного рівня. Автореферат і публікації достатньо повно й об'єктивно відображають зміст дисертаційної роботи та її основні положення.

### **ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

1. Сонячні холодильні системи на основі тепловикористовуючого абсорбційного циклу розроблено за варіантами з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту та з непрямою регенерацією, прийнятими автором за базові, причому в першому варіанті в схемі відсутній абсорбер традиційного типу, замість якого використовується сонячний газорідинний колектор-регенератор. Автору слід було більш аргументовано обґрунтувати вибір варіанту абсорбційної системи.

2. Результати, отримані для полімерних сонячних рідинних колекторів, варто було співставити з кращими світовими аналогами, зокрема з металевими абсорберами.

3. Отримані автором експериментальні характеристики тепломасообмінних апаратів з рухомою псевдозрідженою насадкою варто було порівняти з даними по тепломасообмінних апаратах плівкового типу, враховуючи підвищення енерговитрат на організацію більш складних і енерговитратних процесів в апаратах з рухомою насадкою.

4. Автором експериментально визначено затримання рідини у псевдозрідженому шарі насадки (об'єм рідини, яка знаходиться в робочій зоні на рис. 3,27), що визначає реальну поверхню тепломасообміну, проте не враховане відповідне зростання аеродинамічного опору шару.

5. Експериментально показано, що зменшення витрати рідини нижче критичного значення ( $8-9\text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ год})$ ) на рис. 4.10Б) призводить до падіння величини затримання рідини в шарі, що рівнозначне скороченню площі поверхні тепломасообміну між контактуючими потоками повітря та рідини і значно знижує ефективність випарного охолодження у водоохолоджувачі НВОр. Не зрозуміло, як ця критична величина відрізняється для повітряних та водоохолоджувачів непрямого типу НВОг і НВОр.

6. Перехід на ТМА з рухомою псевдозрідженою насадкою поряд з перевагами по надійності експлуатації веде до зростання аеродинамічного опору шару і, відповідно, питомих енерговитрат, однак порівняння в повному обсязі не проведене.

7. Автором розроблені типорозмірні ряди градирень з рухомою насадкою для холодильної техніки та енергетичних (традиційних і

альтернативних) систем на основі принципу багатосекційної збірки, що забезпечує сезонне скорочення енергетичних витрат. Однак відповідне порівняння з відомими рішеннями водоохолоджувачів відсутнє.

8. Порівняльний еко-енергетичний аналіз нових і традиційних рішень (розділ 5.3) автором проведений для систем кондиціонування повітря ССКП, проте він не поширений на розроблювані сонячні холодильні системи СХС.

9. Аналіз можливостей розроблених сонячних систем СХС і ССКП слід у подальшому поширити з урахуванням кліматичних зон України та європейських держав в умовах цілорічної експлуатації (зміни параметрів зовнішнього повітря, коливання сонячної активності та вітронавантаження в місцях установки сонячної системи тощо).

### Загальні висновки

Наведені зауваження не знижують наукового значення та практичної цінності виконаного дослідження і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, зміст якої повністю відповідає паспорту спеціальності 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування.

Дисертаційна робота є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, містить не захищені раніше наукові положення й одержані автором нові науково обгрунтовані результати.

Виходячи з актуальності та наукового рівня виконаних досліджень, вважаю, що робота "Інтенсифікація процесів у тепломасообмінних апаратах з рухомою насадкою для багатофункціональних сонячних холодильних систем" за актуальністю, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів повністю відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", щодо дисертацій, представлених на здобуття ступеня кандидата технічних наук, а її автор – Гончаренко Володимир Анатолійович цілком заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування.

Завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
доктор технічних наук, професор

М. І. Радченко

Підпис д-ра техн. наук, професора Радченку М.І. засвідчую:

Проректор



С. І. Трушляков

ОБЕРЯНО 8.02 2017

ВУЗНИЙ СЕКРЕТАР

МІЛОШАНОВ В. І.