

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**ГОНЧАРЕНКО ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 536.248.2: 532.529.5

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ТЕПЛОМАСООБМІННИХ АПАРАТАХ З РУХОМОЮ НАСАДКОЮ ДЛЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СОНЯЧНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса 2017

Дисертація є рукопис.

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор **Дорошенко Олександр Вікторович**,  
професор кафедри термодинаміки і відновлювальної енергетики Одеської  
національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки Укра-  
їни

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Нікульшин Володимир Руслано-  
вич**, завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики  
Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і  
науки України.

доктор технічних наук, професор **Радченко Микола Іванович**, завіду-  
вач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету ко-  
раблебудування ім. адм. Макарова Міністерства освіти і науки України.

Захист дисертації відбудеться "21" лютого 2017 р. в 12.00, в ауд. 108 на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при Одеській національній  
академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса,  
65082, Україна.

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

Автореферат розісланий « 11 » січня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03  
д.т.н., професор



Мілованов В.І

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Взаємозв'язок проблем енергетики та екології диктують нові 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 можливостей випарних методів охолодження середовищ і створення альтернативних систем на їх основі. Особливий інтерес мають випарні повітряно- 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 застосовності випарних методів у ССКП і покращити їх енергетичні та екологічні показники.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно із законотворчими актами: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94р. що затвердила “Закон України про енергозбереження”, 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); Виконання роботи входило в плани НДР ОНАХТ.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вдосконалення багатофункціональних сонячних систем: осушування повітря, теплохолодопостачання і кондиціонування повітря на основі осушувально-випарних методів і сонячної енергії для підтримки безперервності циклу. Вирішувалися наступні **задачі**: – розробка схемних рішень сонячних холодильних і кондиціонуючих систем з непрямою регенерацією абсорбенту; – створення уніфікованої тепломасообмінної апаратури ТМА (абсорбера-осушувача, десорбера-регенератора, випарних охолоджувачів непрямого типу НВОг і НВОр) на основі рухомих псевдозріджених шарів насадок РНт-к («газ-рідина-тверде тіло»), з розміщеними в об'ємі РН теплообмінних елементів, що забезпечують можливість ефективної і надійної роботи на розчинах абсорбентів (запобігання небезпеці забруднень робочих поверхонь); – вивчення процесів тепломасообміну в основних ТМА осушувального і охолоджувального контурів і проведенні експериментального дослідження випарних охолоджувачів і абсорберів з РНт-к; – отримання залежностей і рекомендацій, які забезпечують розрахунок і конструювання сонячних систем та їх основних елементів; виконання порівняльного еколого-енергетичного аналізу традиційних і альтернативних рішень холодильних систем.

**Об'єктом дослідження** є сонячні багатофункціональні системи теплохолодопостачання і кондиціонування повітря **Предметом** дослідження є процеси тепломасообміну в основних елементах осушувального і охолоджувального контурів сонячних систем. **Методи дослідження**: теоретичне вивчення та експериментальне дослідження на натурних зразках тепломасообмінних

апаратів ТМА з рухомою насадкою (РН), – випарних охолоджувачів середовища, абсорберів і десорберів.

**Наукова новизна** роботи визначається наступними результатами:

1. Показано, що для створення сонячних холодильних (СХС) і кондиціонуючих (ССКП) систем перспективне використання тепловикористовуючого циклу абсорбції і розроблені схемні рішення для багатофункціональних сонячних систем; вперше використана в ТМА осушувального і охолоджувального контурів рухома псевдозріджена насадка («газ-рідина-тверде тіло»), що забезпечує можливість ефективної і надійної роботи на розчинах абсорбентів і запобігання небезпеці забруднень робочих поверхонь, з розміщенням безпосередньо в шарі рухомої насадки теплообмінних елементів (шар РНт-к);

2. Розроблені принципи конструювання уніфікованої ТМА для і охолоджувальної сонячних систем з використанням РНт-к; вперше обгрунтований перехід на ВО непрямого (НВОг, НВО-Рг і НВОр) розміщенням безпосередньо в шарі рухомої насадки теплообмінника (шар РНт-к); аналогічні рішення розроблені для десорбера ДБР і абсорбера АБР контура сонячної системи; розроблений варіант сонячної системи СХС абсорбера охолодженої води продуктового контуру НВОр, що забезпечує підвищення ефективності процесу абсорбції і зниження температурного рівня подальшого випарного ;

3. Вперше, на основі виконаного експерименту, показано, що оптимальний діапазон  $\rho_{\text{эН}}$  для реалізації процесів тепломасообміну в шарі РНт-к складає  $\rho_{\text{эН}} = 300-600 \text{ кг/м}^3$ , і рекомендовані значення навантажень: для випарних охолоджувачів (НВОг і НВОр) –  $w_{\text{г}} \cong 2,5-6,0 \text{ м/с}$ ; діапазон навантажень по рідині (рециркуляційний контур НВО) –  $q_{\text{ж}} \approx 8,0 - 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ; оптимальне значення співвідношення потоків складає для НВОр  $I = G_{\text{г}}/G_{\text{ж}} = 1,1-1,2$ ; одержані вирази, що описують значення критичних швидкостей ( $w'_0$ ,  $w_I$ ), динамічної висоти, ефективності процесів тепломасообміну в шарі РНт-к; вперше виконано вивчення режиму «захливання» РНт-к на високих навантаженнях по газовому потоку і збудована інверсійна крива, що забезпечує можливість конкретизації робочого діапазону навантажень;

4. Розроблена ССКП (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НВОг), здатна забезпечити отримання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі забезпечуючи значне зниження енерговитрат (до 35%); СХС (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НВОр) може забезпечити охолодження води на рівні  $t_{\text{р}}^2 = 6-10^0\text{C}$  і, таким чином, значно розширити можливість практичного використання методів випарного охолодження середовища у ряді харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії.

**Обгрунтованість і достовірність наукових положень і результатів** підтверджуються результатами експериментально-розрахункових досліджень і добрим якісним і кількісним узгодженням отриманих результатів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці рекомендацій по розрахункам і конструюванням сонячних систем СХС і ССКП. Матеріали дисертації передані ТОВ «Вент-Сервіс» та АТ «САН-ЕКО ПЛЮС»

для промислової реалізації і використовуються в учбовому процесі на кафедрі термодинаміки та відновлювальної енергетики ОНАХТ в курсах лекцій і практичних занять по нетрадиційній енергетиці в 2014-2016 роках.

**Особистий внесок автора.** Автором розроблені схемні рішення сонячних систем СХС і ССКП, випарних охолоджувачів ВО на основі РНт-к (НВОг і НВОр); проведено цикл експериментально-розрахункових досліджень; виконано аналіз і узагальнення отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації** проводилась на: III Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (МОНУ країні, НУК ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, 19 – 21 листопада 2014 р; на XV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (ОНАХТ. 2015р.)

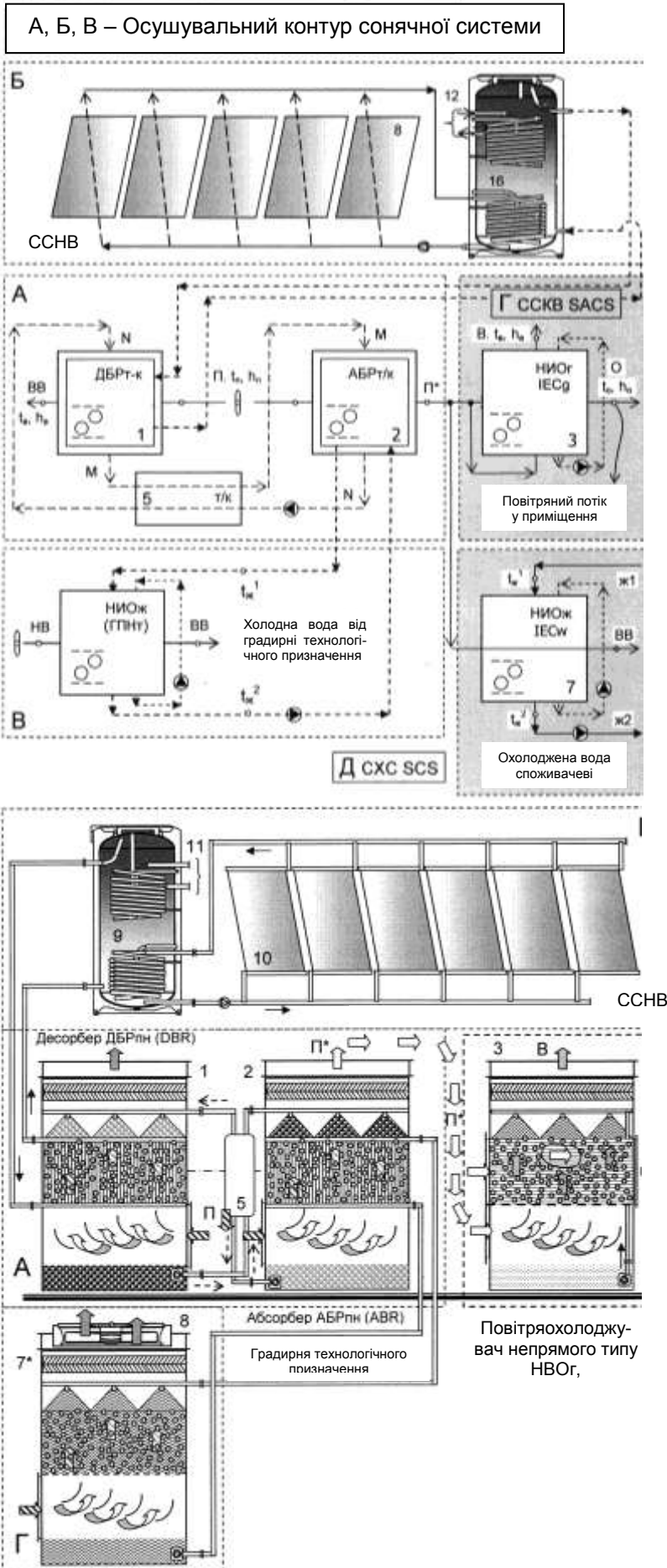
**Публікації.** Основні наукові і прикладні результати автора представлені в 7 публікаціях у науково-технічних журналах (дві публікації в журналі Молдавської академії наук), і були апробовані у 2 доповідях на міжнародних і науково-практичних конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Вона містить 164 сторінок тексту, 129 сторінки малюнків і таблиць, список літератури з 181 найменувань

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі і першому розділі роботи відбита актуальність проблеми, виконано аналітичний огляд, що характеризує досягнення досліджень у світі в даній області і, як перспективний напрям розвитку сонячної енергетики, виділені багатofункціональні сонячні системи осушувально-випарного типу з непрямою регенерацією абсорбенту, сформульовано цілі і завдання дослідження; виявлені і сформульовані наукова новизна і основні результати роботи і визначена її практична цінність.

**Другий розділ** присвячений розробці схемних рішень сонячних багатofункціональних систем (СХС і ССКП) осушувально-випарного типу; розробці тепломасообмінної апаратури для сонячних систем, а також вибору робочого тіла для осушувального контуру системи. Аналітичний огляд дозволив виділити, як перспективний напрям розробок, наступні принципи: сонячні тепловикористовуючі системи абсорбції з непрямою регенерацією абсорбенту; сонячні полімерні колектори СКр; широке використання ТМА з рухомою псевдозрідженою насадкою РНт-к в осушувальному і охолоджувальному контурах сонячних систем. Сонячна система (рис. 1-2, 4) включає два контури: осушування повітряного потоку (А) і охолоджувальний (Г і Д), в якому охолоджується вода (СХС), або відбувається термовологісна обробка повітря (ССКП). Осушувальний контур складається з абсорбера-осушувача зовнішнього повітря (АБР) з рухомою псевдозрідженою насадкою,



**Рис. 1.** Принципова схема сонячної абсорбційної системи з повітроохолоджувачем НВОг і водоохолоджувачем НВОр в охолоджувальному контурі.

Формули:

ССКВ: ДБР-АБР-НВОг;  
СХС: ДБР-АБР-НВОр).

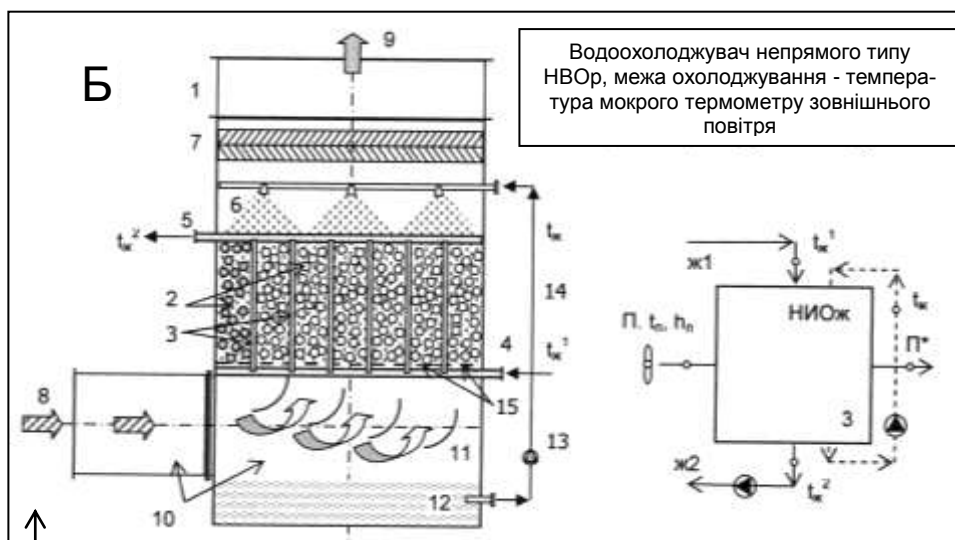
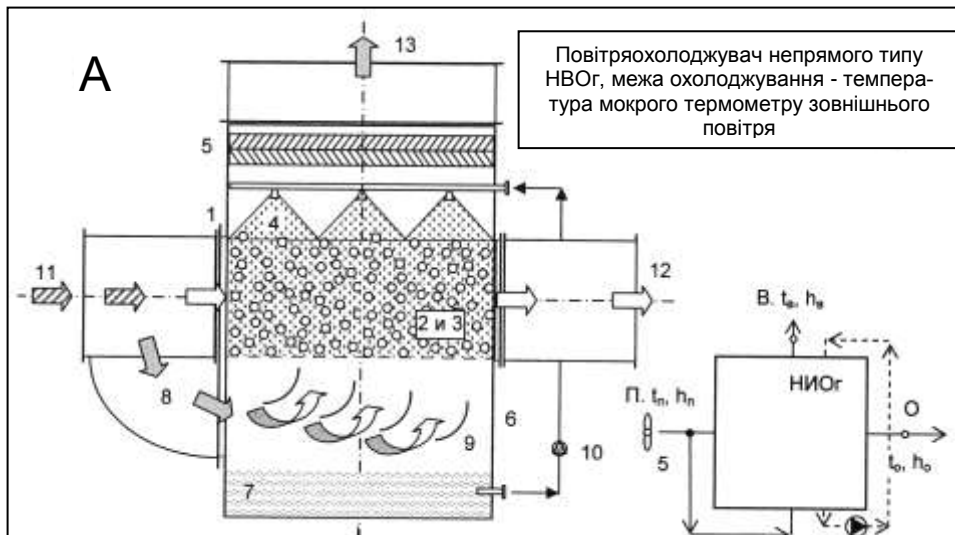
Позначення: 1 – десорбер ДБР; 2 – абсорбер АБР; 3 – повітроохолоджувач НВОг; 5 – теплообмінник кріпкого гарячого і слабкого холодного розчинів абсорбенту; 7 – водоохолоджувач НВОр; 8 – сонячна система у складі рідинних колекторів СКр і баке-теплоаккумулятора. ЗВ – зовнішнє повітря; П, О і В – повний, основний і допоміжний повітряні потоки (НВОг); ВП – викид повітря із ДБР і НВОр; М, N – кріпкий і слабкий розчини абсорбенту

**Рис. 2.** Принципова (розгорнута) схема сонячної системи кондиціонування повітря ССКП (Б) за формулою ДБР-АБР-НИОг.

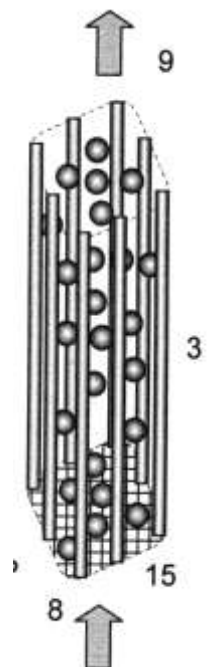
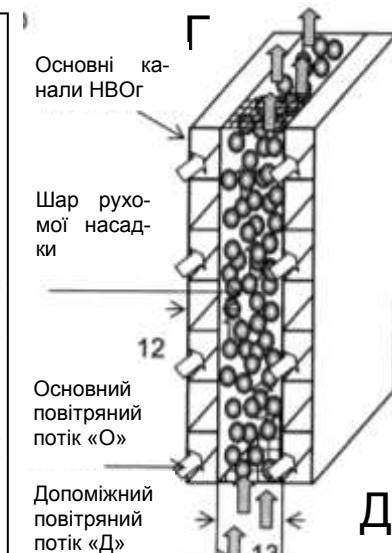
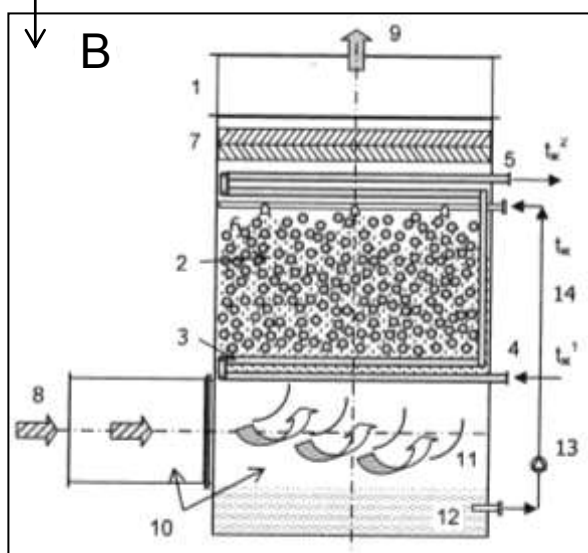
Позначення по рис. 1, доп.: 7\* – градирня технологічного призначення ГПНт; 9 – бак-теплоаккумулятор БТА; 10 – сонячний полімерний рідинний колектор СКр

десорбера-регенератора (ДБР), причому абсорбер потребує охолодження, оскільки в процесі поглинання водяної пари виділяється тепло, а десорбер у підводі тепла для регенерації абсорбенту. Для цих цілей передбачений теплообмінник, що розміщується безпосередньо в об'ємі РН. Задачу охолодження вирішує водоохолоджувач НВОр (В), а завдання генерування теплової енергії сонячна система (Б), що складається з набору СКр і бака-теплоаккумулятора (12 – додаткове гріюче джерело, необхідність в якому визначається природними коливаннями сонячної активності і робочими параметрами сонячної системи, що змінюються). Охолоджувальний контур включає випарний охолоджувач непрямого типу, – води НВОр, – або НВОг, що забезпечує подачу у приміщення повітря, що пройшло термовологісну обробку. Повітряний потік (свіже зовнішнє повітря) при осушуванні в абсорбері АБР знижує вологовміст  $x_2$ , що забезпечує значний потенціал подальшого випарного охолодження води в НВОр або повітрі в НВОг.

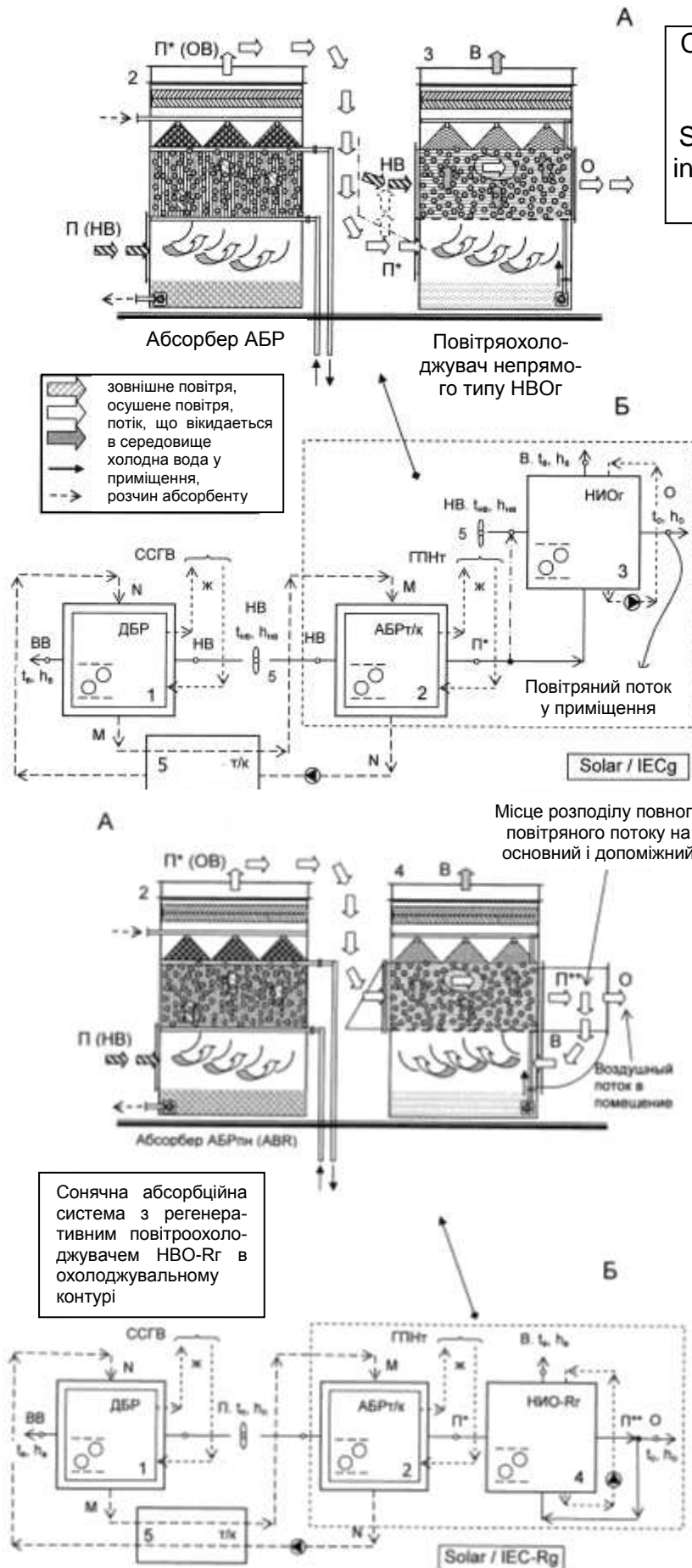
Як ТМА використовуються розроблені апарати уніфікованого типу з руховою насадкою сферичної форми (трьохфазний псевдозріджений шар «газ-рідина-тверде тіло») і розміщеним у ньому теплообмінником (ПНт-к). Це забезпечує можливість самоочищення робочих поверхонь і стінок корпусу ТМА, що, при роботі із зовнішнім повітрям і розчинами абсорбентів, є принципово важливими умовами підтримки працездатності систем. На рис. 3А представлено зроблений варіант випарного повітроохолоджувача НВОг. У варіанті НВО-Рг (рис. 4), представлено перспективне рішення з розділенням повного повітряного потоку не на вході в апарат (як у НВОг), а на виході з «сухої» частини охолоджувача (на основній «О» і допоміжний «Д» повітряні потоки; тут розділяється вже охолоджений при незмінному вологовмісті повний повітряний потік). Для НВО-Рг межею охолодження є температура точки роси повітряного потоку, що поступає в апарат, –  $t_p$ , що істотно розширює можливості ССКП. На рис. 3Б і В представлені розроблені варіанти водоохолоджувачів НВОр: Б – (варіант 1) об'єм РНт-к з розчленовуванням на псевдозріджені шари насадки між елементами теплообмінника, і В – (варіант 2) де об'єм РНт-к розміщений між секціями теплообмінника, що грають роль опорно-роздільних решіток ОРР і сепаратора крапельної вологи. По таких схемах оформлюються і ТМА осушувального контуру, АБР і ДБР. У теплообмінники АБР поступає вода від НВОр, а в теплообмінники десорбера ДБР – теплоносій від сонячної водонагрівальної системи. Оскільки повітря, яке покидає НВОр, як і НВОг (потік «Д») є зволеним, але достатньо холодним, воно може використовуватися для попереднього охолодження гарячого міцного розчину абсорбенту, що покидає ДБР. Як абсорбенти використовуються водні розчини бромистого літію, з добавками, що знижують корозійну активність і збільшують розчинність. Це розчини LiBr ( $H_2O+LiBr$ ) і LiBr+ ( $H_2O+LiBr+LiNO_3$ ); необхідна концентрація LiBr повинна складати 60-65% при температурі регенерації абсорбенту 30-60°C. Плоский сонячний колектор СКр включає теплоприймач-абсорбер (А), прозоре покриття (ПП) з повітряним зазором між ПП і теплоприймачем (ВЗ), і теплоізоляцію дна (ІЗ).



НВОр, (ІЕСw)  
Двоконтурна  
градирня



**Рис. 3.** Принципові схеми і основні елементи (Г і Д) випарних повітряохолоджувача НВОг (А) і водоохолоджувача НВОр (Б і В, варіанти з вертикальним і горизонтальним розташуванням теплообмінника) з рухомою насадкою РНт-к.



Сонячна система ССКП з повітроохолоджувачем НВОг  
 Solar liquid-desiccant cooling and air conditioning systems (Solar / IECg)

Принципова схема сонячної абсорбційної системи з повітроохолоджувачем НВОг в охолоджувальному контурі (формула ДБР-АБР-НВОг); в абсорбері осушується тільки допоміжний повітряний потік.

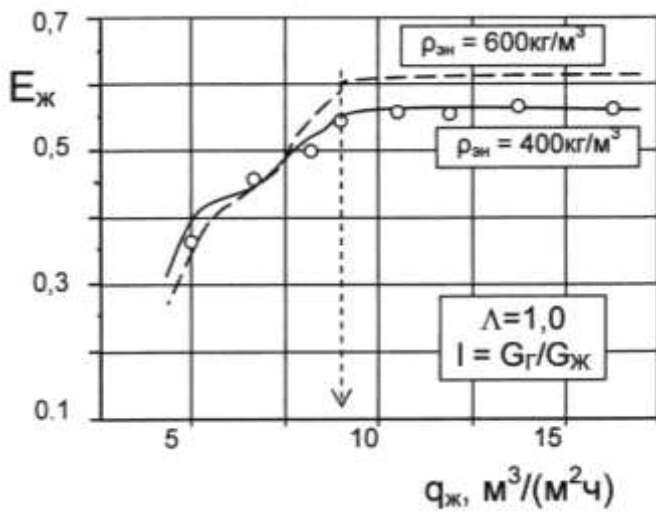
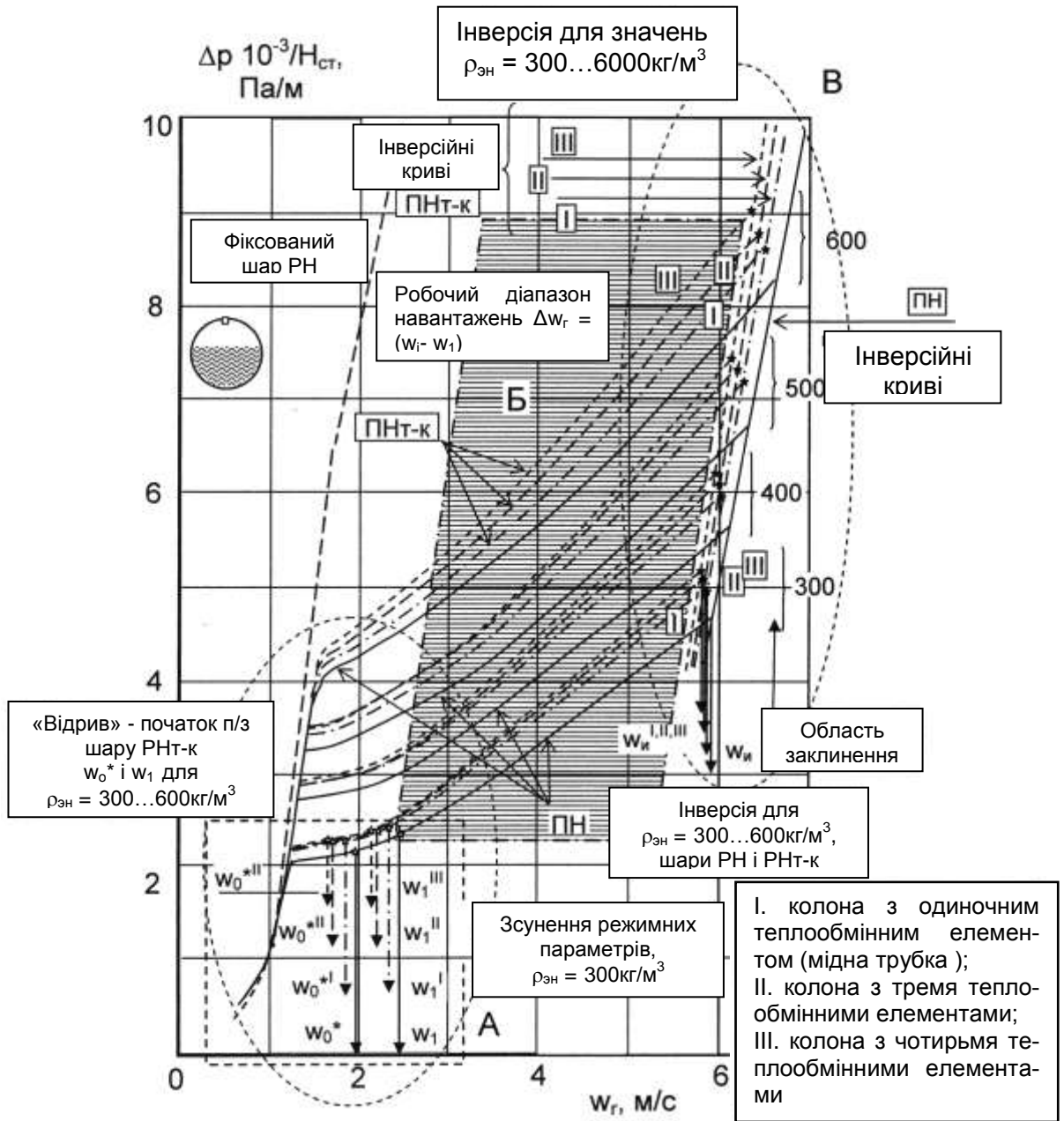
Принципова схема сонячної абсорбційної системи з регенеративним повітроохолоджувачем НВО-Rг в охолоджувальному контурі (формула ДБР-АБР-НВО-Rг)

Сонячна абсорбційна система з регенеративним повітроохолоджувачем НВО-Rг в охолоджувальному контурі

**Рис. 4.** Сонячна система кондиціонування повітря ССКП з повітроохолоджувачем НВОг. Позначення по рис. 1.

Раніше в ОНАХТ був розроблений полімерний СКр і підтверджені його високі характеристики. На рис. 4 представлена принципова схема ССКП, вирішена за формулою  $\text{ДБР} \leftrightarrow \text{АБР} \rightarrow \text{НВОг}$ . У абсорбері може осушуватися тільки «допоміжний» повітряний потік, який у контакті з водою рециркуляційного контуру забезпечує як «допоміжного», так і «основного» повітряних потоків в НВОг. Розроблений і варіант ССКП, коли в «основні» канали НВОг суміш зовнішнього повітря (ЗП) і осушеного в абсорбері. СХС має формулу  $\text{ДБР} \leftrightarrow \text{АБР} \rightarrow \text{НВОр}$ . З погляду ССКП доцільна спільна подача у приміщення як повітряного потоку, що в термовологісну обробку в НВОг, так і охолодженої в НВОр води (рис. 1) по формулі:  $\text{ДБР} \leftrightarrow \text{АБР} \rightarrow \uparrow \text{НВОг} / \text{НВОр}$ . Вперше розроблені принципово нові варіанти СХС і ССКП на основі абсорбера внутрішнім випарним охолодженням АБРво, що забезпечує підвищення ефективності процесу абсорбції і подальше зниження температурного рівня і н охолодження.

**Третій розділ** присвячений експериментальному вивченню процесів гідро-аеродинаміки трифазного псевдозрідженого шару насадки «газ-рідина-тверде тіло» у вільному об'ємі (РН) і з розміщеним в його об'ємі теплообмінником (РНт-к). Стенд є колоною циліндрової форми, діаметром  $D_k \approx 200$  мм і висотою робочої зони  $H_{pz} = 0,95$  м. Усередині колони розміщена ОРР з шаром рухомої насадки РН і водороздільник з варійованим розташуванням по висоті колони. Величини  $f_{opp} = 65-85\%$  і  $H_{ct} = 50 - 160$  мм змінювалися в ході експериментів дискретно. Усередині колони, в об'ємі п/о шару насадки, розміщувався набір теплообмінних елементів. Експериментальне дослідження виконувалося в режимі для СХС на основі НВОр, з трубчастим типом теплообмінних елементів. Використовували два основні варіанти розміщення теплообмінних елементів в об'ємі шару РН: з розміщеними у ньому вертикальними теплообмінними елементами, і з горизонтально розташованими секціями теплообмінника, що виконують роль ОРР у нижній частині, і краплеуловлювача у верхній частині колони. У нижній і верхній розподільних камерах розташовані датчики для виміру температури і вологості повітряних потоків. Сепаратор краплинної вологи забезпечував повернення рідини, що відноситься повітряним потоком у систему і вимір її кількості. Можливості стенду: витрати теплоносіїв і теплофізичні параметри змінювалися в діапазонах:  $w_r = 1,5-7$  м/с,  $q_{ж} = 5-35$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч),  $t_r$  до 50°C,  $\phi_r = 30-90\%$ , початкова температура рідини  $t_{ж}^1$  до 40°C. Найважливішою характеристикою апаратів з РН є кількість утримуваної рідини, або затримка  $H_r$ , що визначає поверхню перенесення у п/з шарі насадки. Дані, що існують в літературі по  $H_r$  в РН, суперечливі і фрагментарні. Вони отримані в обмеженому діапазоні навантажень, без реального врахування впливу ефективної щільності елементів насадки  $\rho_{эн}$ . У роботі був використаний циркуляційний метод, заснований на принципі збереження кількості рідини при роботі по замкнутому контуру. У дослідях використовували порожні целулоїдні кулі, величина  $\rho_{эн}$  варіювалася послідовним частковим заповненням водою в контрольних партіях.



**Рис 5.** До визначення граничних навантажень. Експериментальні криві псевдозрідження (А) для: вільного шару РН (суцільні лінії) і для шару РНТ-к із розміщеними у ньому теплообмінними елементами (пунктирні лінії).

Вплив щільності зрошення  $q_p$  (реальної поверхні теплообміну ( $w_r = 3,5 \text{ м/с}$ )) на ефективність процесу у НВОр

Величина  $\rho_{\text{эн}}$  була прийнята в оптимальному діапазоні значень ( $\rho_{\text{эн}} = 300 - 600 \text{ кг/м}^3$ ), що забезпечує вихід на режим розвиненого п/з. Програма дослідження охоплювала питання: гідроаеродинаміка рухомого шару «газ-рідина-тверде тіло» з урахуванням критичних явищ в системі (перехід насадки в псевдозрідження, явища гістерезису і захлинання шару РН); визначення робочих діапазонів навантажень по газу і рідині і відповідних режимів псевдозрідження насадки, структури трифазного рухомого шару з урахуванням затримки рідини, динамічної висоти шару РН, порозності і пр.; оптимальний режим роботи колони з рухомою насадкою і відповідні йому геометричні параметри елементів і шару РНт-к, включаючи вплив  $f_{\text{орр}}$ ,  $H_{\text{ст}}$ ,  $\rho_{\text{эн}}$ , форми і матеріалу елементів; оптимальний принцип компоновки шару РНт-к, включаючи характер і число теплообмінних елементів, що розташовуються в об'ємі п/з шару. Основні результати для РНт-к представлені на рис. 5 на фоні раніше отриманих даних для вільного шару РН. З практичної точки зору, важливим представляється питання про характер переходу шару насадки із стаціонарного в рухомий стан. Критичні швидкості переходних процесів в системі РН:  $w^*_0$  – початок псевдозрідження «зрошеного» РНт-к шару насадки;  $w_1$  – початок розвиненого псевдозрідження і  $w_{\text{и}}$  – початок інверсії визначалися візуально, аналізом кривої псевдозрідження  $\Delta p = f(w_{\text{г}}, q_{\text{ж}})$ . При  $w_{\text{г}} = w^*_0$  утворюються нестійкі псевдостационарні стани, що характеризуються періодичним рухом окремих елементів (перебудова шару із зміною його порозності). Змінюється структура шару і коливається затримка рідини в ньому, тобто значення  $w^*_0$  характеризується деяким діапазоном існування. Ширина цього діапазону залежить від ступеня первинної ущільненості шару. Переважним для реалізації процесів тепломасообміну в шарі РНт-к є діапазон значень ефективної щільності насадкових елементів  $\rho_{\text{эн}} = 300 - 600 \text{ кг/м}^3$ , що відрізняються широкою робочою ділянкою по  $w_{\text{г}}$ , які прийнятними значеннями унесення рідини і порівняльно невеликою динамічною висотою шару. Тут спочатку псевдозрідження передує часткове захлинання стаціонарного шару, а характер переходу системи у рухомість визначає усю її наступну поведінку. Характерні особливості: значно більше значення затримки рідини у шарі  $H_{\text{р}}$  і деяке збільшення динамічної висоти шару  $H_{\text{д}}$  у зіставних умовах. Швидкість початку «верхнього» захлинання апарату  $w_3$  (шару РН, притиснутого повітряним потоком до краплеуловлювача) достатньо велика ( $\approx 6 - 7 \text{ м/с}$ ); унесення рідини  $\Delta G_{\text{ж}}$  із робочої зони невелике практично до значень  $w_3$ . Кращим для організації роботи ТМА є режим розвинутого псевдозрідження у діапазоні швидкостей руху повітряного потоку  $w_{\text{г}}$  від 2,5 (3,0) до 5,9-6,3 м/с. (в залежності від величини  $\rho_{\text{эн}}$ ). Тут увесь шар насадки рухомий і система «г-р-т.т» однорідна (гомогенна); підтримується стан початкового захлинання, який, однак, із зростанням  $w_{\text{г}}$  не розвивається далі у розвинуте захлинання, завдяки компенсуючому механізму розширення шару. Така своєрідна ситуація початкового захлинання, що підтримується у широкому діапазоні  $w_{\text{г}}$ , забезпечує можливість сталої експлуатації апаратів з РНт-к в цьому режимі високих навантажень (рис. 5А). Було вивчено вплив параметрів опорно-розподільної

решітки (живого перетину і висоти ОРР) на поведінку РНт-к шару, як оптимального і для РН шару, рекомендовані значення  $f_{орр} = 75\%$  і  $h_{орр} = 0,1\text{м}$ . Вплив висоти стаціонарної насадки  $H_{ст}$  (0,1 і 0,16м) було досліджено при значеннях  $\rho_{эн} = 300$  і  $600 \text{ кг/м}^3$ . Аналогічний цикл досліджень було виконано в колоні із розміщеними у ній вертикальними теплообмінними елементами [варіант I з одиничним теплообмінним елементом, розташованим по центральній осі колони (мідна трубка із зовнішнім діаметром  $d_{тр} = 18/16 \text{ мм}$ ); II – з трьома вертикально розташованими теплообмінними елементами, розміщеними у формі «рівносторонній трикутник»; III – з чотирма вертикально розташованими теплообмінними елементами, розміщеними у формі «ромб»]. Основною задачею було вивчення впливу теплообмінних елементів, розміщених безпосередньо у шарі п/з насадки (РНт-к) на характер і параметри режимів псевдозрідження. Якісно картина п/з шару РН залишається незмінною, при деякому зсуненню величин критичних швидкостей перехідних процесів у системи РНт-к:  $w_0^*$ ,  $w_1$  і  $w_{и}$ . Виконано вивчення характеру режиму «захливання» РН на високих навантаженнях по газовому потоку і побудовані відповідні інверсійні криві, що забезпечує можливість конкретизації робочого діапазону навантажень (результат одержаний для достатньо високих значень щільностей зрошування  $q_{ж} = 15\text{м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ). Виділені області початкового (А) і розвинутого п/з насадки і області граничних навантажень по газу, – інверсійні криві для усіх варіантів розміщення теплообмінних елементів в об'ємі п/з шару насадки в робочому діапазоні  $\rho_{эн} = 300 \dots 600 \text{ кг/м}^3$ . Слід відмітити, що роботу ТМА треба передбачати з визначним відступом від значень критичних швидкостей  $w_{и}$  (початок інверсії РН шару). Зростання величини  $\rho_{эн} = 300 \dots 600 \text{ кг/м}^3$  призводить до збільшення інверсійної швидкості і до подальшого розвитку «верхнього» захливання насадки апарата. Величина затримки рідини  $H_{ж}$  для шару РНт-к має визначне значення. Зниження витрати рідини (величина щільності зрошування  $q_{ж}$ ) нижче деякого значення призводить до різкого падіння величини затримки рідини у шарі, що для рухомої насадки рівноцінно падінню величини поверхні тепломасообміну між контактуючими потоками газу і рідини. Особливе значення мають результати в області навантажень, де величина затримки рідини в шарі РНт-к різко падає ( $q_{ж} < 8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ), що веде до різкого зниження поверхні тепломасопереносу між контактуючими потоками газу і рідини і різкому падінню ефективності процесів випарного охолодження як у НВОг, так і в НВОр (рис. 5Б). Ці дані одержані вперше і без них неможливий розрахунок і проектування ТМА на основі РН і РНт-к. Виконано дослідження РНт-к\* (шар РН із розміщеними у ньому горизонтально розташованими секціями теплообмінника, які грають роль ОРР і сепаратора крапельної вологи КУ). Це рішення було прийнято, як основне і для ТМА осушувального контуру сонячної системи (ДБР, АБР). Вплив живого перетину вбудованого теплообмінника як ОРРт-к і КУт-к (ПНт-к\*) вивчалось в діапазоні живого перетину т-ка:  $f_{т-о} = 35\%$ ,  $45\%$  і  $55\%$ . Величина  $f_{т-о} = 45\%$  була прийнята як основна при подальшій розробці НВОр.

Загальні висновки відносно особливостей псевдозрідження насадки у варіантах РН і РНт-к організації шару ТМА: – Із зростанням величини  $\rho_{эн} =$

300 ... 600 кг/м<sup>3</sup> зростають значення швидкостей початкового п/з шару РН ( $w_0^*$ ) і розвинутого п/з шару РН ( $w_1$ ); для РНт-к відмічається деяке зниження величин  $w_0^*$  і  $w_1$  відносно шару РН для кожного із значень  $\rho_{\text{эн}}$ ; гранична величина робочої швидкості  $w_{\text{и}}$  зростає як для РН, так і для РНт-к шару (наприклад, перехід від  $\rho_{\text{эн}} = 300$  к 600 кг/м<sup>3</sup> призводить до зростання інверсійної швидкості  $w_{\text{и}}$  від 5,95 до 6,3 м/с); перехід від одиничної трубки (теплообмінника) до варіантів з трьома і чотирма трубками також призводить до деякого зростання  $w_{\text{и}}$ ; початок «верхнього захлинання» п/з шару насадки ( $w_3$ ) варіює, зростаючи із зростанням  $\rho_{\text{эн}}$  від 6,15 до 7,0 м/с, це трансформація стану РН, притиснутої до верхньої обмежувальної решітки; зростання числа труб теплообмінника, розміщеного в об'ємі п/з шару, також призводить до деякого зростання  $w_3$ ; в цьому режимі має місце різке зростання краплеунесення із ТМА; зростання  $\rho_{\text{эн}}$  призводить до деякого звуження робочого діапазону швидкостей газу  $\Delta w_{\text{г}} = (w_{\text{и}} - w_1)$ ; перехід до РНт-к (позиції I – III) незначно відбиваються на величині  $\Delta w$ ; – робочий діапазон щільностей зрошування  $q_{\text{ж}}$  складає в середньому  $q_{\text{ж}} = 8 - 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ; зниження витрат рідини нижче величини  $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$  призводить до різкого падіння величини затримки рідини в шарі, що для рухомої насадки рівноцінно падінню величини поверхні тепломасообміну між контактуючими потоками газу і рідини; залежність величини крапельного унесення із апарата від  $w_{\text{г}}$ , вперше одержана для РНт-к, вона інтенсивно зростає, починаючи з  $w_{\text{г}} \approx 6,0 \text{ м/с}$ .

**Четвертий розділ** присвячений вивченню процесів тепломасообміну у ТМА з РНт-к (випарного охолодження у НВОр і НВОг, і осушування повітря в АБРт-к). Визначення дійсної поверхні обміну стосовно до апаратів з РН є задачею надзвичайно складною. Це призвело до розвитку емпіричних методів, оснований на використанні коефіцієнтів ефективності процесу. Як природну межу охолодження прийнято розглядати температуру повітря по мокрому термометру на вході в апарат  $t_{\text{м}}^1$ . На виході із апарата, як граничного, розглядають стан насиченого повітря, що має температуру води  $t_{\text{р}}^1$ , яка надходить на охолодження (повітря з ентальпією  $h_{\text{г}}^{2*}$ ). Ефективність охолодження води в градирні і ступінь використання повітря в апараті можна характеризувати величинами:

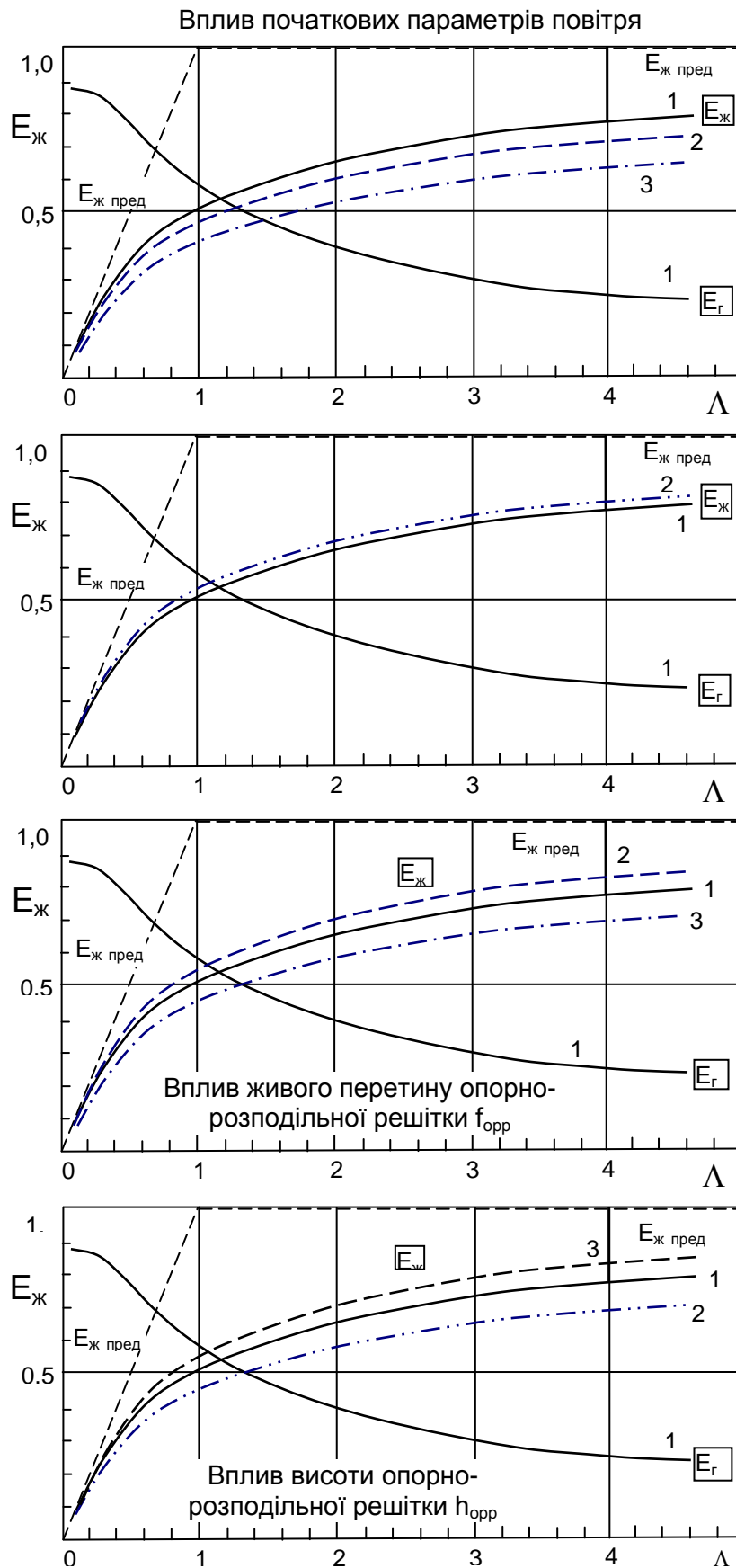
$$E_{\text{р}} = (t_{\text{р}}^1 - t_{\text{р}}^2)/(t_{\text{р}}^1 - t_{\text{м}}^1), \quad E_{\text{г}} = (h_{\text{г}}^2 - h_{\text{г}}^1)/(h_{\text{г}}^{2*} - h_{\text{г}}^1),$$

де  $E_{\text{р}} = f(l = G_{\text{г}}/G_{\text{р}}, t_{\text{р}}^1, t_{\text{м}}^1)$ ,  $E_{\text{г}} = f(l = G_{\text{оп}}/G_{\text{дп}}, t_{\text{р}}^1, t_{\text{м}}^1)$

Реальні значення ефективності визначаються, крім  $t_{\text{м}}^1$  і  $t_{\text{р}}^1$ , співвідношенням потоків  $l = G_{\text{г}}/G_{\text{р}}$  (НВОр) і  $l = G_{\text{оп}}/G_{\text{дп}}$  (НВОг) Умови експлуатації градирні характеризуються *характеристичним числом*  $\Lambda = l/l_{\text{ид}}$ . Граничні значення ступеню охолодження води і використання повітря:

$$E_{\text{г пред}} = \lim_{F \rightarrow \infty} E_{\text{г}} = 1.0, \text{ при } \Lambda \leq 1.0; \quad E_{\text{г пред}} = \lim_{F \rightarrow \infty} E_{\text{г}} \cong 1/\Lambda, \text{ при } \Lambda \geq 1.0$$

$$E_{\text{р пред}} = \lim_{F \rightarrow \infty} E_{\text{р}} \cong \Lambda, \text{ при } \Lambda \leq 1.0; \quad E_{\text{р пред}} = \lim_{F \rightarrow \infty} E_{\text{р}} = 1.0, \text{ при } \Lambda \geq 1.0$$



**А и Б:** Експериментальні криві одержані для НВОр на основі РНТ-к при:  $\rho_{эн} = 400 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_a = 0,037\text{м}$ ;  $H_{рз} = 0,95\text{м}$ ;  $h_{орр} = 0,05\text{м}$ ,  $f_{орр} = 0,75$ ;  $H_{ст} = 0,1\text{м}$

**А**

Вплив вологовмісту повітря на вході у НВОр. Умови проведення експерименту:  $t_{ж}^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $t_r^1 = 35^\circ\text{C}$ , при: 1 –  $x_r = 10 \text{ г/кг}$ , 2 –  $x_r = 15 \text{ г/кг}$ , 3 –  $x_r = 20 \text{ г/кг}$

**Б**

Вплив температури повітря на вході у НВОр. Умови проведення експерименту:  $t_{ж}^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $x_r = 10 \text{ г/кг}$ , при 1 –  $t_r^1 = 35^\circ\text{C}$ , 2 –  $t_r^1 = 25^\circ\text{C}$

**В і Г:** Експериментальні криві одержані для НВОр на основі РНТ-к при:  $\rho_{эн} = 400 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_a = 0,037\text{м}$ ;  $H_{рз} = 0,95\text{м}$ ;  $H_{ст} = 0,1\text{м}$

**В**

Вплив  $f_{орр}$  для НВОр с ПНТ-к. Умови проведення експерименту:  $h_{орр} = 0,05\text{м}$ ;  $t_{ж}^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $t_r^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $x_r = 10 \text{ г/кг}$ , при різних значеннях  $f_{орр}$ : 1 – 0,75; 2 – 0,65, 3 – 0,85

**Г**

Вплив  $h_{орр}$  для НВОр з РНТ-к. Умови проведення експерименту:  $f_{орр} = 0,75$ ;  $t_{ж}^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $t_r^1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $x_r = 10 \text{ г/кг}$ , при різних значеннях  $h_{орр}$ : 1 – 0,1м; 2 – 0,05м, 3 – 0,15м

**Рис. 6.** Ефективність процесу охолодження води і використання повітря у випарному водоохолоджувачі непрямого типу НВОр, як функції характеристичного числа  $\Lambda$ .

Для розрахунку величин ефективності процесів запропоновані емпіричні формули зручні у практичному використанні:

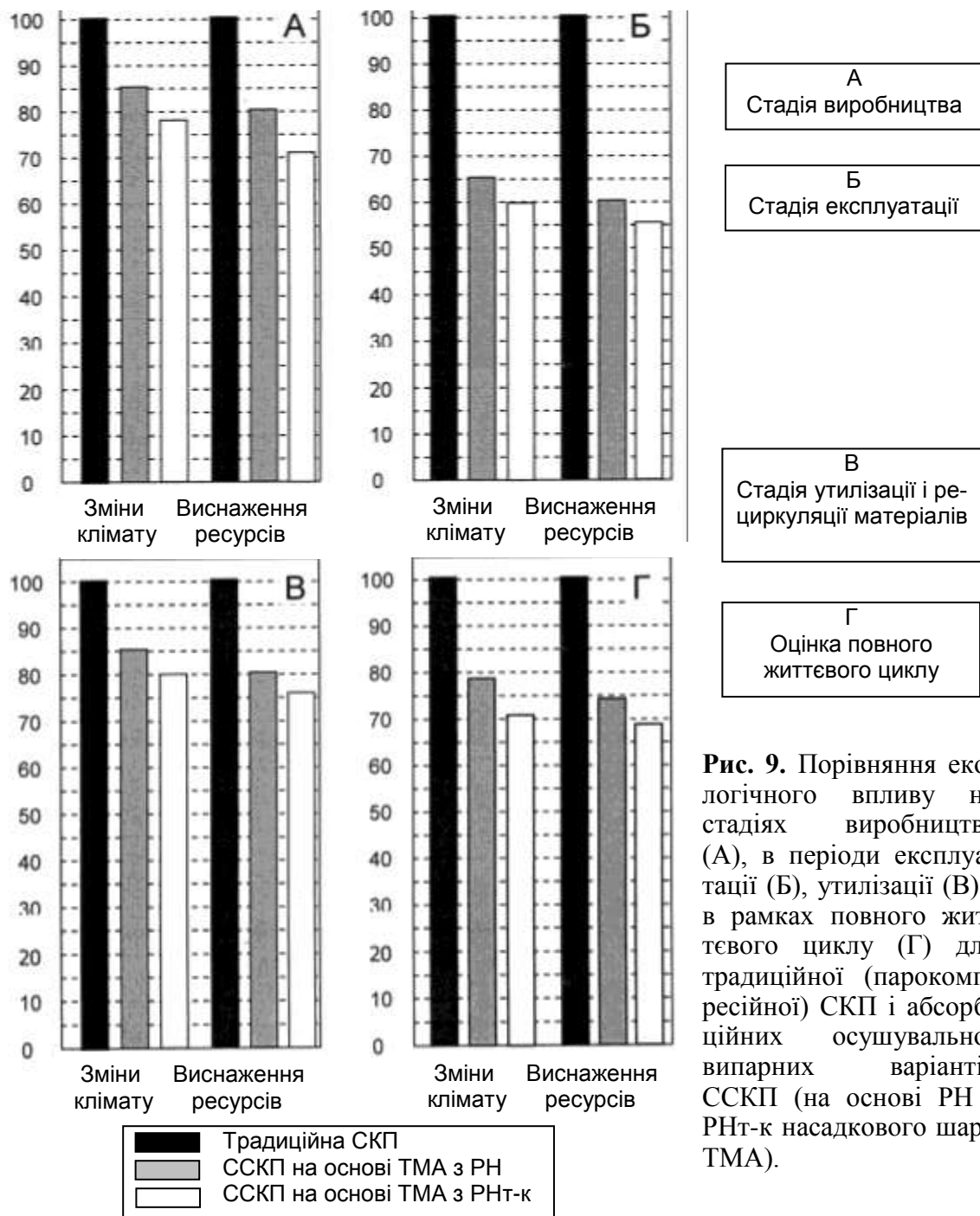
$$E_p = c (1 - e^{-1.1 \Lambda}), E_r = c (1 - e^{-1.1 \Lambda}) \Lambda^{-1}$$

Експериментальне дослідження процесу випарного охолодження води в ГРД (РН) і НВОр (РНт-к) дозволило виявити вплив  $l = G_r/G_{ж}$  на ступінь наближення до природної межі охолодження. Зростання величини  $l$  забезпечує більше наближення до межі, при меншому ступеню використання повітря  $E_r$ ; одночасно зростає і загроза реконденсації вологи із потоку повітря, який викидається у середовище. Лінія зміни стану повітряного потоку у НВОр має більш виражену кривизну. Ступінь використання допоміжного повітряного потоку у НВОг зі зниженням величини  $l = G_{оп}/G_{дп}$  знижується і при цьому зростає загроза реконденсації вологи із допоміжного повітряного потоку, що викидається. Досліджено характер зміни параметрів повітряних потоків (основного «О» і допоміжного «Д») у НВОг: температура води залишається незмінною у циклі і на декілька градусів вище температури повітряного потоку на вході у НВО по мокрому термометру; температури основного і допоміжного повітряних потоків знижуються; вологовміст основного повітряного потоку залишається незмінним; досліджено також вплив співвідношення контактуючих потоків  $l = G_{оп}/G_{дп}$  у НВОг на результат охолодження основного «О» повітряного потоку. Ефективність процесів у випарних водоохолоджувачах непрямого типу вивчалась на основі водоохолоджувачів НВОр із РНт-к і показана на рис. 6 у вигляді залежностей  $E_{ж} = (t_p^1 - t_p^2)/(t_p^1 - t_m^1) = f(\Lambda)$  і  $E_r = (h_r^2 - h_r^1)/(h_r^{2*} - h_r^1) = f(\Lambda)$ . Показано вплив початкових параметрів повітряного потоку, що надходить у випарний охолоджувач ( $A$  – вплив початкового вологовмісту;  $B$  – вплив температури зовнішнього повітря). Вплив висоти стаціонарної насадки на ефективність процесу представлено для  $H_{ст} \approx 0,1\text{м}$  і  $H_{ст} \approx 0,16\text{м}$ . Зменшення живого перетину ОРР  $f_{орр}$  призводить до зростання ефективності процесу, як і зростання висоти опорно-роздільної решітки  $h_{орр}$  (рис. 6В і Г). Для величини  $l^* = G_p/G_r = 1$  одержано саме високе значення ступеня охолодження води  $E_{ж} \approx 60\%$ .

**П'ятий розділ** присвячений розробці і аналізу принципів можливостей СХС і ССКП. В рамках роботи був створений типорозмірний ряд вентиляторних двоконтурних градирен з рухомою псевдозрідженою насадкою ГРНдв (НВОр), який включає повністю автономні секції продуктивністю 25, 50 і 100 куб. м/г. по охолодженій воді і вирішеній на основі принципу багатоеlementного масштабування, що істотно знижує вплив проблеми нерівномірностей в роздачі контактуючих потоків по перетину апарата. Такі градирні можуть автономно використовуватись у традиційних енергосистемах (холодильних, криогенних, у хімічних виробництвах та інш.) і у складі розроблених СХС. На рис. 7 представлено аналіз можливостей ССКП (на Н-Х діаграмі вологого повітря), включаючи вплив температури зовнішнього повітря (до  $40^{\circ}\text{C}$ ) і вологовміст (до  $x^1_B 20\text{г/кг}$ ). Такі високі значення початкових параметрів були обрані для демонстрації можливостей розроблених сонячних систем. ССКП забезпечує одержання комфортних







**Рис. 9.** Порівняння екологічного впливу на стадіях виробництва (А), в період експлуатації (Б), утилізації (В) і в рамках повного життєвого циклу (Г) для традиційної (парокомпресійної) СКП і абсорбційних осушувально-випарних варіантів ССКП (на основі РН і РНт-к насадкового шару ТМА).

параметрів повітря у будь-яких, самих тяжких кліматичних умовах планети. Розроблена сонячна холодильна система СХС (формула ДБР ↔ АБР → НВОр та інш.) може забезпечити охолодження води на рівні  $t_p^2 = 6-10^0\text{C}$  (рис. 8) і, таким чином, значно поширити можливість практичного використання методів випарного охолодження середовищ, включаючи використання традиційних холодильних систем у низці харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії. Особливо відмітимо можливості СХС, побудованих на охолодженні АБР частиною охолодженої у НВОр води (рис.

8Б). В середньому розроблені ССКП і СХС забезпечують зниження енерговитрат до 35% порівняно з традиційною парокompресійною технікою.

Був виконаний (рис. 9) порівняльний екологічний аналіз нових рішень для сонячних систем (при порівнянні СКП традиційного типу – парокompресійної СКП і двох альтернативних варіантів ССКП (на основі ТМА з РН і РНт-к) на основі методології і бази даних «Повний життєвий цикл» (ПЖЦ, міжнародні стандарти ISO (ISO 14040, 14041, 14042 і 14043, «ECO-INDICATOR 99», база даних програми «SIMAPRO-6»). Результати виконаного аналізу переконливо свідчать про істотні переваги розроблених ССКП (СХС) на основі рухомої насадки РНт-к по всіх основних екологічних показниках.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Показано, що для створення нового покоління сонячних холодильних систем СХС і ССКП перспективне використання абсорбційного тепловикористовуючого циклу відкритого типу з непрямою регенерацією абсорбенту, який полягає у попередньому осушуванні повітря і наступному його використанні для випарного охолодження води;

2. Розроблено схемні рішення для сонячних систем кондиціонування повітря ССКП по формулі ДБР ↔ АБР → НВОг (→ НВО-Рг); в абсорбері може осушуватися тільки частина "допоміжного" повітряного потоку, що надходить у НВОг, який у контакті з водою рециркуляційного контуру забезпечує охолодження як «допоміжного», так і «основного» повітряних потоків; розроблено варіант ССКП, коли в «основні» канали НВОг надходить суміш зовнішнього повітря (ЗП) і осушеного в абсорбері;

3. Розроблені схемні рішення для сонячних холодильних систем СХС по формулі ДБР ↔ АБР → НВОр, а також варіант СХС з охолодженням абсорбера АБР частиною охолодженої води із «продуктового контуру» НВОр, що дозволяє виключити із схеми осушувального контуру градирню технологічного призначення ГРДт, яка обслуговує абсорбер і знизити температурний рівень процесу абсорбції водяних парів, що веде до підвищення ефективності цього процесу в цілому; вперше розроблені варіанти СХС і ССКП на основі абсорбера із внутрішнім випарним охолодженням (АБРво), що забезпечує зростання ефективності процесу осушування повітря; рівня наступного випарного охолодження;

4. Розроблені принципи конструювання ТМА для осушувального та охолоджувального контурів СХС і ССКП з використанням насадки ПНт-к, що забезпечує сталу експлуатацію в екстремальних умовах;

5. На основі циклу теоретичних і експериментальних досліджень показано, що оптимальний діапазон  $\rho_{\text{ен}}$  для реалізації процесів тепломасообміну в шарі РНт-к складає  $\rho_{\text{ен}} = 300\text{-}600 \text{ кг/м}^3$ , і рекомендовані значення навантажень: для випарних охолоджувачів (НВОг і НВОр)  $w_{\text{г}} \cong 2,5\text{-}6,0 \text{ м/с}$ ; оптимальне значення співвідношення потоків складає для НВОр  $l = G_{\text{г}}/G_{\text{р}} = 1,1\text{-}1,2$ ; для НВОг  $l = G_{\text{оп}}/G_{\text{дп}} = 1,1\text{-}1,2$ ;

6. Робочий діапазон щільностей зрошування  $q_{\text{ж}}$  складає у середньому  $q_{\text{ж}} = 8 - 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ; зниження витрати рідини нижче величини  $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$  при-

зводить до різкого падіння величини затримки рідини у шарі, що для рухомої насадки рівноцінно падінню величини поверхні тепломасообміну між контактуючими потоками газу і рідини; одержані вирази, що описують значення критичних швидкостей ( $w'_0$ ,  $w_1$ ), динамічної висоти, втрат напору і ефективності процесів тепломасообміну у шарі РНт-к; виконано вивчення режиму «захливання» РНт-к на високих навантаженнях по газовому потоку і побудована інверсійна крива, що забезпечує можливість конкретизації робочого діапазону навантажень;

7. Розроблена сонячна система ССКП (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НВОг та інш др.) здатна забезпечити одержання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі; у порівнянні з традиційними парокомпресійними СКП альтернативна ССКП забезпечує значне зниження енерговитрат; розроблена сонячна холодильна система СХС (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НІОж та інш.) може забезпечити охолодження води на рівні  $t_{\text{ж}}^2 = 6-10^0\text{C}$  і, таким чином, значно поширити можливість практичного використання методів випарного охолодження середовищ, виключаючи використання традиційних холодильних систем у низці харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії;

8. Виконано порівняльний екологічний аналіз нових рішень для сонячних систем (при порівнянні СКП традиційного типу – парокомпресійної СКП і двох альтернативних варіантів ССКП (на основі ТМА з РН і РНт-к) на основі методології і бази даних «Повний життєвий цикл»; результати виконаного аналізу дозволяють зробити висновок про суттєву перевагу розроблених ССКП (СХС) на основі рухомої насадки ПНт-к по всіх основних екологічних показниках; вибір типу ССКП (СХС) по двох аналізуємих критеріях впливу на виснаження природних ресурсів і внесок у глобальне потепління – зміна клімату планети) буде сприяти реалізації закону України про енергозбереження і Кіотського протоколу, спрямованого на зниження емісії парникових газів; показано, що ССКП (СХС) осушувально-випарного типу призводить до меншого виснаження природних ресурсів, ніж традиційна СКП і вносить менший внесок у глобальну зміну клімату.

### **ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Гончаренко В. А. Разработка многофункциональных солнечных систем на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла и тепломасообменных аппаратов с подвижной насадкой [Текст] / А. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко. // «Холодильна техніка та технологія». Енергетика та Енергозбереження. Одеса, – 51 (1), – 2015, – стр. 35-46.

*Особистий внесок здобувача: розробка принципів схемних рішень і тепломасообмінної апаратури для сонячних систем*

2. Гончаренко В. А. Испарительные охладители газов и жидкостей непрямого типа со сниженным пределом охлаждения [Текст] / А. В. Дорошенко, В. Х. Кириллов, К. В. Людницкий, В. А. Гончаренко // PROBLEMELE

ENERGETICII REGIONALE. TERMOENERGETICĂ – 3 (29) 2015. – стр. 74-85.

*Особистий внесок здобувача: розробка випарних охолоджувачів газів і рідин непрямого типу*

3. Гончаренко В. А. Экспериментальное изучение рабочих характеристик тепломасообменных аппаратов на основе подвижного насадочного слоя [Текст] / В. А. Гончаренко. // XV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Збірник наукових праць. ОНАХТ. 2015. – стр. 45-48

*Особистий внесок здобувача: проведення циклу експериментальних досліджень*

4. Гончаренко В. А. Экспериментальные исследования гидроаэродинамики и тепломасообмена в аппаратах с подвижной насадкой [Текст] / А. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко, А. Н. Цапушел, Ю. И. Демьяненко. // «Холодильна техніка та технологія». Енергетика та Енергозбереження. Одеса, – 52 (1), – 2016, – стр. 23-34.

*Особистий внесок здобувача: проведення циклу експериментальних досліджень і обробка отриманих результатів*

5. Гончаренко В. А. Система тепло-холодо-электроснабжения для предприятия птицеводства [Текст] / М. Л. Шит, А. А. Журавлев, А. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко // Academy of sciences of Moldova. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. TERMOENERGETICĂ – 1 (30) 2016. – С. 89–99.

*Особистий внесок здобувача: розробка випарних низькотемпературних охолоджувачів для систем тепло-холодопостачання.*

6. Гончаренко В. А. Разработка многофункциональных абсорбционных солнечных систем на основе тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой [Текст] / А. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко, И. Ю. Младенов. А. Н. Цапушел. // «Холодильна техніка та технологія». Енергетика та Енергозбереження. Одеса, – 52 (2), – 2016, – стр. 46-61

*Особистий внесок здобувача: Аналіз отриманих результатів.*

7. Vladimir Goncharenko. Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects [Текст] / Alexander Doroshenko, Kostyantyn Shestopalov, Ivan Mladionov, Vladimir Goncharenko, Paul Koltun. Refrigeration Engineering and Technology. Odessa, – 52 (3), – 2016, – стр. 16-24.

*Особистий внесок здобувача: Розробка сонячних систем і сонячних полімерних колекторів. Аналіз отриманих результатів.*

## АННОТАЦИЯ

**Гончаренко В.А. Интенсификация процессов в тепломасообменных аппаратах с подвижной насадкой для многофункциональных солнечных холодильных систем.** – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05 05 14 – «холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская

национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2017 г.

Диссертация посвящена развитию научных и инженерных основ создания многофункциональных солнечных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха с использованием методов испарительного охлаждения сред. Показано, что для основных вариантов солнечных систем СХС и ССКВ на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла наиболее перспективно включение испарительных охладителей непрямого типа НИОг и НИОж. Разработаны схемные решения солнечных холодильных (СХС) и кондиционирующих систем (ССКВ), что позволяет создать многофункциональную систему жизнеобеспечения. В качестве абсорбента рекомендован раствор  $\text{LiBr} + (\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3)$ , предпочтительный с точки зрения достигаемой степени осушения воздуха и требуемой температуры регенерации абсорбента, а также надежности эксплуатации. Разработаны принципы конструирования ТМА (абсорбера-осушителя АПН и десорбера-регенератора ДПН, испарительных охладителей воздуха НИОг (НИО-Рг) и жидкости НИОж непрямого типа) с использованием насадки ПНт-к, обеспечивающей устойчивую эксплуатацию в экстремальных условиях. На основе цикла теоретических и экспериментальных исследований показано, что оптимальный диапазон  $\rho_{\text{эн}}$  для реализации процессов тепломассообмена в слое ПНт-к составляет  $\rho_{\text{эн}} = 300\text{-}600 \text{ кг/м}^3$ , и рекомендованы значения нагрузок: для испарительных охладителей (НИОг и НИОж)  $w_r \cong 2,5\text{-}6,0 \text{ м/с}$ ; оптимальное значение соотношения потоков составляет для НИОж  $l = G_r/G_{\text{ж}} = 1,1\text{-}1,2$ ; для НИОг  $l = G_o/G_{\text{в}} = 1,1\text{-}1,2$ . Рабочий диапазон плотностей орошения  $q_{\text{ж}}$  (рециркуляционный контур ТМА непрямого типа НИО) составляет в среднем  $q_{\text{ж}} = 8 - 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ ; снижение расхода жидкости ниже величины  $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  приводит к резкому падению величины задержки жидкости в слое, что для подвижного насадки равносильно падению величины поверхности тепломассообмена между контактирующими потоками газа и жидкости. Получены выражения, описывающие значения критических скоростей ( $w'_0$ ,  $w_1$ ), динамической высоты, потерь напора и эффективности процессов тепломассообмена в слое ПНт-к; выполнено изучение режима «захлебывания» ПНт-к на высоких нагрузках по газовому потоку и выстроена инверсионная кривая, что обеспечивает возможность конкретизации рабочего диапазона нагрузок. Разработанная ССКВ (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НИОг и др.) способна обеспечить получение комфортных параметров воздуха для любых климатических условий земного шара (до  $x_r = 20 \text{ г/кг}$ , при  $t$  до  $40^\circ\text{C}$ ); в сравнении с традиционными пароконденсационными СКВ альтернативная ССКВ обеспечивает значительное снижение энергозатрат. Разработанная солнечная холодильная система СХС (формула ДБР  $\leftrightarrow$  АБР  $\rightarrow$  НИОж и др.) может обеспечить охлаждение воды на уровне  $t_{\text{ж}}^2 = 6\text{-}10^\circ\text{C}$  и, таким образом, значительно расширить возможность практического использования методов испарительного охлаждения сред в ряде пищевых, химических и других технологий с существенной экономией энергии. Выполнен сравнительный экологи-

ческий анализ новых решений для солнечных систем (при сравнении СКВ традиционного типа – пароконденсационной СКВ и двух альтернативных вариантов ССКВ (на основе ТМА с ПН и ПНТ-к) на основе методологии и базы данных «Полный жизненный цикл»; результаты анализа позволяют сделать вывод о существенном преимуществе разработанных ССКВ (СХС) на основе подвижной насадки ПНТ-к по всем основным экологическим показателям.

**Ключевые слова:** солнечная система, абсорбция-десорбция, испарительное охлаждение, кондиционирование воздуха, подвижная насадка, гидроаэродинамика, тепломассообмен, воздухоохладитель, градирня, экологическое влияние.

## АНОТАЦІЯ

**Гончаренко В.А. Інтенсифікація процесів у тепломасообмінних апаратах з рухомою насадкою для багатofункціональних сонячних холодильних систем.** – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05 05 14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування – Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2017 р.

Дисертація присвячена розробці багатofункціональних сонячних холодильних систем тепло-холодopостачання і кондиціонування повітря з використанням методів випарного охолодження середовищ. Розроблені схемні рішення сонячних холодильних (СХС) і кондиціонуючих систем (ССКП), що дозволяє створити багатofункціональну систему життєзабезпечення. Як абсорбент рекомендований розчин  $\text{LiBr} + (\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3)$ , переважливий з точки зору ступеня осушування повітря, якого необхідно досягти, і необхідної температури регенерації абсорбенту. Розроблено принципи конструювання ТМА для СХС і ССКП з використанням рухомої насадки РНТ-к, що забезпечує сталу експлуатацію в екстремальних умовах. На основі циклу теоретичних та експериментальних досліджень показано, що оптимальний діапазон  $\rho_{\text{эн}}$  для реалізації процесів тепломасообміну в шарі РНТ-к складає  $\rho_{\text{эн}} = 300\text{-}600 \text{ кг/м}^3$ , і рекомендовані значення навантажень: для випарних охолоджувачів (НВОг і НВОж)  $w_{\text{г}} \cong 2,5\text{-}6,0 \text{ м/с}$ ; робочий діапазон щільностей зрошування  $q_{\text{ж}}$  складає у середньому  $q_{\text{ж}} = 8 - 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$ ; зниження витрати рідини нижче  $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{г})$  призводить до різкого падіння величини затримки рідини в шарі, що для рухомої насадки рівноцінно падінню величини поверхні тепломасообміну. Одержані вирази, що описують значення критичних швидкостей ( $w'_0, w_1$ ), динамічної висоти і ефективності процесів тепломасообміну в шарі РНТ-к; виконано вивчення режиму «захливання» РНТ-к на високих навантаженнях по газовому потоку і побудована інверсійна крива, що забезпечує можливість конкретизації робочого діапазону навантажень. Розроблена ССКП здатна забезпечити одержання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі (до  $x_{\text{г}} = 20 \text{ г/кг}$ , при  $t$  до  $40^\circ\text{C}$ ); сонячна холодильна система СХС може забез-

печити охолодження води на рівні  $t_{\text{ж}}^2 = 6 \cdot 10^0 \text{C}$  і, таким чином, значно поширити можливість практичного використання методів випарного охолодження середовищ у низці харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії. Виконано порівняльний екологічний аналіз нових рішень для сонячних систем (при порівнянні СКП традиційного типу – парокompресійної СКП і двох альтернативних варіантів ССКП (на основі ТМА з РН і РНт-к) на основі методології і бази даних «Повний життєвий цикл»); результати аналізу дозволяють зробити висновок про суттєву перевагу розроблених ССКП (СХС) на основі рухомої насадки РНт-к по всіх основних екологічних показниках.

**Ключові слова:** сонячна система, абсорбція-десорбція, випарне охолодження кондиціонування повітря, рухома насадка, гідро-аеродинаміка, тепломасообмін, повітроохолоджувач, градирня, екологічний вплив.

## ABSTRACT

**Goncharenko V.A. Intensification of processes in heat-mass-transfer apparatus with of fluidized bed for the multifunction solar refrigeration systems. – The manuscript.**

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, Specialty 05.05.14 – Refrigeration, Vacuum and Compression Engineering, Air Conditioning Systems. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2017.

Dissertation is sanctified to development of scientific and engineering bases of creation of the solar systems of refrigeration and air-conditioning with the use of methods of the evaporated cooling. The basic variants of the solar systems are based on an open absorbing cycle. The schematics of the solar refrigeration and air-conditioning systems are worked out. As an absorbent solution of LiBr, preferable from the point of view of the arrived at degree of drainage of air and required temperature of regeneration of absorbent, is recommended. Principles of constructing of apparatus (absorber, desorber-regenerator, evaporated coolers of air and water of indirect type) are worked out with the use of fluidized bed providing steady exploitation in extreme terms. On the basis of cycle of theoretical and experimental researches the optimal structural and regime parameters of work of heat-mass-transfer apparatus are certain. Worked out air-conditioning systems (the formula of  $\text{DBR} \leftrightarrow \text{ABR} \rightarrow \text{IECg}$  and other) is able to provide the receipt of comfort parameters of air for any climatic terms of earth. The worked out solar refrigeration system ( $\text{ДБР} \leftrightarrow \text{АБР} \rightarrow \text{IECw}$  and other) considerably extends possibility of the practical use of methods of the evaporated cooling in a number of food, chemical and other technologies with the substantial economy of energy. The comparative ecological analysis of new decisions is executed.

**Keywords:** solar system, absorption, desorption, evaporated cooling, air-conditioning, heat-mass-transfer