

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЛЮДНИЦЬКИЙ КОСТЯНТИН ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 536.248.2: 532.529.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ СОНЯЧНИХ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ
ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧОГО ЦИКЛУ**

Спеціальність

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціювання

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 МОН України.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор **Нікульшин Володимир Русланович**, завідувач кафедрою теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики Одеського національного політехнічного університету МОН України.

доктор фізико-математичних наук, професор **Калінчак Валерій Володимирович**, завідувач кафедрою теплофізики фізичного факультету Одеського національного університету імені І.І Мечникова МОН України.

Захист дисертації відбудеться « 24 » квітня 2017 р. о 12⁰⁰ г., в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Автореферат розісланий «24» березня 2017 р.

Вченій секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.03,
доктор технічних наук, професор



В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Взаємопов'язані проблеми енергетики і екології диктують нові вимоги до сучасних холодильних систем, в першу чергу, зниження енерговитрат і антропогенного впливу на навколишнє середовище. Аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень і інженерних розробок останніх років показав зростання інтересу до можливостей випарних методів охолодження середовищ і до створення осушувально-випарних холодильних систем (СХС) і систем кондиціонування повітря (ССКП) на основі відкритого тепловикористовуючого абсорбційного циклу і випарних повітря– і водо–охолоджувачів непрямого типу, що дозволяє зняти кліматичні обмеження застосування випарних методів і поліпшити їх енергетичні та екологічні показники.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з 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). Виконання роботи входило в плани НДР ОНАХТ.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення багатофункціональних сонячних систем: осушування повітря, тепло – холодопостачання та кондиціонування повітря на основі осушувально-випарних методів і сонячної енергії для підтримки безперервності циклу. Вирішувалися наступні завдання: – розробка схемних рішень для одно - і багатоступеневих сонячних холодильних і кондиціонуючих систем з непрямою регенерацією абсорбенту на основі розроблених універсальних блоків тепломасообмінної апаратури ТМА [(ДБР ↔ АБР → НВОг)] і [(ДБР ↔ АБР → НВОр)]; – створення уніфікованої ТМА плівкового типу (абсорбера-осушувача АБР, десорбера – регенератора ДБР, випарних охолоджувачів непрямого типу НВОг, НВОр і градирень ГРД); – моделювання процесів тепломасообміну в основних ТМА з урахуванням особливостей плівкових течій в ТМА осушувального і охолоджувального контурів і проведення експериментального дослідження випарних охолоджувачів середовищ; – отримання залежностей і рекомендацій, що забезпечують розрахунок і конструювання сонячних систем та їх основних елементів; виконання порівняльного еко-енергетичного аналізу традиційних і альтернативних рішень холодильних систем.

Об'єктом дослідження даної роботи є багатофункціональні абсорбційні системи тепло – холодопостачання та кондиціонування повітря з використанням сонячної енергії для регенерації абсорбенту.

Предмет дослідження – процеси аерогідродинаміки та тепломасообміну в основних елементах осушувального і охолоджувального контуру сонячних систем і аналіз принципів можливостей сонячних абсорбційних систем.

Методи дослідження – теоретичне вивчення та експериментальні дослідження на натурних зразках тепломасообмінних апаратів плівкового ТМА

типу, – випарних охолоджувачів середовищ непрямого типу, абсорберів і десорберів.

Наукова новизна роботи визначається наступними результатами:

1. Показано, що для створення СХС і ССКП перспективно використання тепловикористовуючого абсорбційного циклу в одно– і багатоступеневих варіантах і розроблені схемні рішення сонячних систем, що забезпечують істотне розширення області практичного використання методів випарного охолодження середовищ;

2. Вперше розроблено багатоступеневе оформлення сонячних систем на основі базових осушувально-охолоджувальних блоків [(ДБР ↔ АБР → НВОг)] і [(ДБР ↔ АБР → НВОр)] з використанням багатоступеневого десорбера – регенератора, в якому кожна ступінь регенерації абсорбенту замкнута на відповідний ступінь осушування повітря, з послідовним зростанням концентрації міцного розчину від ступеня до ступеня, що забезпечує зниження рівня охолодження в СХС і зняття кліматичних обмежень на використання ССКП на основі відкритого абсорбційного циклу;

3. Вперше в схемах ССКП і СХС використана двоступенева технологічна градирня, що обслуговує відповідні ступені абсорбції АБР1 і АБР2, при цьому ГРДт1 працює на зовнішньому повітрі, а ГРДт2 на частині осушеного в АБР1 зовнішнього і охолодженого у НВОг основного повітряних потоків; розроблено варіант сонячної системи СХС з охолодженням абсорбера частиною охолодженої води з продуктового контуру НВОр, що забезпечує усунення технологічної градирні із схеми і зниження температурного рівня подальшого випарного охолодження;

4. Розроблено абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням АБРво; рішення ССКП за формулою [ЗП → (АБР1 → НВОг1) → АБРво-Рг → «повітря, що пройшло термовологісну обробку»] і СХС [ЗП → (АБР1 → НВОг1) → АБРво – Рр → «охолоджена вода»] дозволяють підвищити ефективність процесу абсорбції, знизити температурний рівень подальшого випарного охолодження і усунути із схеми окремий випарний охолоджувач другого ступеня (НВОг або ГРД), знизивши тим самим габарити, вагу і вартість системи в цілому;

5. Виконано моделювання процесів тепломасообміну у випарних повітря – охолоджувачів непрямого типу НВОг і НВО-Р; показано, що використання НВОг зі зниженою межею охолодження середовищ, як і побудова на їх основі абсорбційних осушувально-випарних сонячних систем, вимагає рішення проблеми реконденсації, пов'язаної з небезпекою повного насичення повітряного потоку в межах насадкової частини апаратів; виконано аналіз умов такої небезпеки та вироблені рекомендації щодо її запобігання;

6. Розроблена двохступенева ССКП здатна забезпечити одержання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі при значному зниженні енерговитрат; СХС може забезпечити охолодження води на рівні $t_p^2 = 6-10^0\text{C}$ і таким чином значно поширити можливість практичного використання методів випарного охолодження середовищ у низці харчових, хімічних і інших технологій з суттєвою економією енергії.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів підтверджується результатами експериментально-розрахункових досліджень і добрим якісним і кількісним узгодженням отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці рекомендацій щодо розрахунку та конструювання сонячних систем СХС і ССКП і їх основних елементів; матеріали дисертації передані ТОВ «Вент – Сервіс» для промислової реалізації та використовуються у навчальному процесі на кафедрах ОНАХТ в курсах лекцій і практичних занять з нетрадиційної енергетики в 2014 – 2016 роках.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблені схемні рішення сонячних багатоступневих систем СХС і ССКП, випарних повітря – і водоохолоджувачів (НВОг і ГРД) та ТМА осушувального контуру; проведено цикл експериментально – розрахункових досліджень; виконано аналіз і узагальнення отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації здійснювалася: на науково-технічних конференціях «Енергія. Бізнес. Комфорт», Сонячні абсорбційні системи тепло – холодопостачання на основі багатоступневих тепломасообмінних апаратів. – 2014. – С. 9 – 12; на XV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і студентів «Еколого-Енергетичні проблеми сучасності» (ОНАХТ. 2015р.);

Публікації. Основні наукові і прикладні результати автора представлені в 11 публікаціях у науково-технічних журналах (в тому числі чотири публікації в журналі Молдавської академії наук «Problemele energeticii regionale»), і були представлені у 3 доповідях на міжнародних і науково – практичних конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел; містить 169 сторінок тексту, 151 сторінок з рисунками і таблицями, та списку літератури із 143 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі та першому розділі роботи відображено актуальність проблеми, виконано аналітичний огляд, що характеризує стан досліджень у світі в розглянутій області, як перспективного напрямку розвитку сонячної енергетики, виділені багатофункціональні сонячні системи осушувально-випарного типу з непрямої регенерації абсорбенту, сформульовано мету і завдання дослідження; виявлені і сформульовані наукова новизна та основні результати роботи і визначена її практична цінність.

Другий розділ присвячений розробці схемних рішень сонячних багатофункціональних систем тепло – холодопостачання та кондиціювання повітря (ССГВ, СХС і ССКП) осушувально-випарного типу з непрямою регенерацією абсорбенту; розробці ТМА для сонячних систем, а також вибору робочого тіла для осушувального контуру системи. Аналітичний огляд дозволив виділити в якості перспективного напрямку розробок наступні принципи: сонячні тепловикористовуючі абсорбційні системи відкритого типу з непрямою регенерацією абсорбенту; сонячні полімерні колектори СКж; широке використання ТМА плівкового типу з насадкою багатоканальної структури із полімерних матеріалів в охолоджувальному і осушувальному контурах сонячних систем.

Сонячна система (рис. 1) включає два контури: (осушувальний) для осушування повітряного потоку і охолоджувальний, в якому охолоджується вода (СХС), або відбувається термовологісна обробка повітря (ССКП). Осушувальний контур складається з поєднаних в роботі абсорбера-осушувача зовнішнього

повітря (АБР, 1 і 3) і десорбера – регенератора (ДБР, 5 і 6), причому абсорбер потребує охолодження, оскільки в процесі поглинання водяної пари виділяється тепло, а десорбер у підводі тепла для регенерації абсорбенту. Завдання охолодження вирішує випарний водоохолоджувач (технологічна градирня) ГРД (7, 7*), а завдання генерування теплової енергії сонячна система ССГВ, що складається з набору полімерних сонячних колекторів СКж (8) і бака – теплоаккумулятора. Охолоджувальний контур включає випарний водоохолоджувач ГРД (14), – або повітроохолоджувач непрямого типу НВОг (2, 4), що забезпечує подачу повітря в приміщення, 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 ГРД або повітря в НВОг. Плоский сонячний колектор СКж включає теплоприймач – абсорбер, прозоре покриття з повітряним зазором між ПП і теплоприймачем (ПЗ), і теплоізоляцію дна (ІЗ). Раніше в ОНАХТ був розроблений полімерний СКж і підтвержені його високі характеристики, а також показана доцільність усунення повітряного зазору між прозорим покриттям (ПП) і абсорбером, без істотного зниження ефективності СК. В якості абсорбентів використовуються водні розчини бромистого літію, з добавками, що знижують корозійну активність і збільшують розчинність: розчини LiBr ($H_2O+LiBr$) і $LiBr^+$ ($H_2O+LiBr+LiNO_3$). Таким чином, основна формула збірки (одноступенева система) являє собою варіанти: в режимі ССКП: [(ДБР ↔ АБР) – НВОг], в режимі СХС: [(ДБР ↔ АБР) – ГРД]. Сонячна система забезпечує реалізацію процесу відновлення слабого розчину абсорбенту, який залишає абсорбер-осушувач навколишнього повітря, причому на лінії гарячого – міцного і холодного – слабого розчинів абсорбенту встановлено теплообмінник (11).

Холодні допоміжні повітряні потоки, покидаючи НВОг і ГРД, можуть використовуватися для рішення різних задач охолодження в схемі, наприклад для попереднього охолодження зовнішнього повітря, що надходить в абсорбер (т/к 9* і 10*), або для охолодження міцного розчину абсорбенту, що надходить в абсорбер (т/к 9 і 10). Бак – теплоаккумулятор БТА, або безпосередньо десорбер ДБР, можуть включати додатковий нагрівач традиційного типу для компенсації коливань сонячної активності в місці установки сонячної системи. В абсорбері ССКП може осушуватися тільки частина «допоміжного повітряного потоку, що поступає у НВОг, який в контакт з водою рециркуляційного контуру забезпечує охолодження як «допоміжного», так і «основного» повітряних потоків в НВОг. Розроблений і варіант ССКП, коли в «основні» канали НВОг надходить суміш зовнішнього повітря (ЗП) і осушеного в абсорбері. З точки зору ССКП доцільна спільна подача в приміщення як повітряного потоку, що пройшов термовологісну обробку в НВОг, так і охолодженої в НВОг води за формулою: [ДБР ↔ АБР → ↓ НВОг / НВОг].

Вперше розроблені принципово нові варіанти СХС з охолодженням абсорбера частиною охолодженої води із «продуктового контуру» ГРДпр (рис. 1В), що забезпечує підвищення ефективності процесу абсорбції та зниження температурного рівня подальшого випарного охолодження. Для одноступеневих охолоджувачів межею охолодження є температура точки роси зовнішнього (що надходить на охолодження) повітря, що істотно розширює можливості практичного використання випарних охолоджувачів в цілому.

Використання багатоступеневого осушування повітря (рис. 1А – ССКП і 1Б – СХС) забезпечує послідовне зростання ефективності процесу абсорбції і суттєве зниження меж випарного охолодження середовищ; використання багатоступеневої регенерації абсорбенту в десорберах забезпечує послідовне зростання концентрації абсорбенту, який надходить у сполучені з ними абсорбери, що підвищує глибину охолодження в СХС і забезпечує досягнення параметрів комфортності повітря при будь – яких, самих важких зовнішніх умовах (температурі і вологовмісту зовнішнього повітря) в ССКП.

Особливий інтерес представляє вперше розроблений абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням (АБРво) і сонячні системи на його основі (рис. 2). Конструкція його насадкової частини аналогічна НВО, тобто має канали, які чергуються, причому у сусідніх каналах одночасно реалізуються процеси: осушування повітря («ЗП – ОП», у безпосередньому контакті з плівкою абсорбенту, «М – N», де М – міцний розчин, а N – слабкий розчин абсорбенту) і випарного охолодження рециркулюючої води, так що охолоджена вода через стінку каналу відводить тепло від плівки абсорбенту, що стікає з іншого боку стінки (рис. 2В). Абсорбер АБРво дозволяє усунути із схеми сонячної системи технологічну градирню ГРДг, зменшити масу і габарити ТМА і знизити загальний рівень енерговитрат. Розподіл повітряного потоку, що надходить в АБРво, може відбуватися на вході в апарат і на виході з апарату (рис. 2А і Б); в останньому випадку (АБРво-Р) в «охолоджувальні» канали абсорбера надходить попередньо охолоджений повітряний потік, що має значно більший потенціал випарного охолодження. Для двохступеневого варіанта сонячних систем розроблені: формула ССКП: [ЗП → (АБР1 → НВО1) → АБРво-Рг → «ох. повітря»], рис. 2А; і формула СХС: [ЗП → (АБР1 → НВО1) → АБРво-Рр → «ох. вода»], рис. 2Б.

Третій розділ присвячений розробці тепломасообмінного обладнання сонячних систем. Всі ТМА осушувального і охолоджувального контурів побудовані за єдиним універсальним принципом: – в організації насадкового шару використовуються багатоканальні впорядковані структури з єдиним типом каналів для АБР, ДБР та ГРД, або з декількома типами каналів, які чергуються у НВО і АБРво; – використовується складна конфігурація основного профілю каналу для вирішення проблеми змочуваності поверхні його стінок і значної затримки рідини в об'ємі ТМА; насадка ТМА формується з трьох основних базових елементів з полімерних матеріалів, що забезпечує створення ТМА як прямої, так і непрямої взаємодії газу і рідини; – використовуються полімерні матеріали (ПМ) для виготовлення насадки НВО, оскільки термічний опір тонкої міжканальної стінки цілком порівняно з термічним опором стікаючої по одній з поверхонь стінки рідинної плівки. Матеріал полімера був обраний єдиним для створення всіх варіантів ТМА (СПК Polygal Termogal); це полікарбонат, що випускається у вигляді багатоканальних плит (плита стільникового полікарбонату являє собою два паралельних листа з поперечними перегородками цільної єдиної структури). Температурний діапазон експлуатації становить від -40 до +120⁰С, що дозволяє використовувати його у «відкритих» системах, до яких відносяться випарні охолоджувачі, абсорбери і десорбери. Розроблено варіанти випарних повітроохолоджувачів НВОг і НВО-Рг (рис.4В). У варіанті НВО-Рг, подано перспективне рішення з поділом повного повітряного потоку на вході в апарат (як у НВОг), а на виході з «сухої» частини охолоджувача (на основний «О» і допоміжний «Д» повітряні потоки; тут розділяється вже охолоджений при

незмінному вологовмісті повний повітряний потік). Для НВО-Rг межею охолодження є температура точки роси, повітряного потоку – t_p , який поступає в апарат, що істотно розширює можливості ССКП.

Четвертий розділ присвячений теоретичному та експериментальному вивченню процесів тепломасообміну у ВО. Для опису процесів тепломасообміну в НВОг за умови матеріальної однорідності потоків виділимо елемент насадки протяжністю $0 \leq x \leq H$, $-a \leq y \leq b$, $0 \leq z \leq L$ (рис. 3Д). Основний потік повітря охолоджується через розподільну стінку за рахунок випарного охолодження води, що стікає у вигляді плівки. При цьому допоміжний повітряний потік знаходиться в безпосередньому контакті з рідиною. Рівняння сумісного тепломасообміну в НВОг і відповідні умови сполучення у формі рівнянь пограничного шару: – для рідини ($0 \leq x \leq H$, $0 \leq y \leq h$ (h – товщина шару рідини), $0 \leq z \leq l$), температура $t_p = t_p(x, y, z)$ визначається із рівняння:

$$W_a(y) \frac{\partial t_a}{\partial x} = a_a \frac{\partial^2 t_a}{\partial y^2}, \quad (1)$$

умова на вході, при $x = 0$, має вигляд: $t_{жс}(0, y, z) = t_a^0$; – для допоміжного потоку газу «В» ($0 \leq x \leq H$, $h \leq y \leq b$, $0 \leq z \leq l$), температура $t_{II} = t_{II}(x, y, z)$ та парціальний тиск пари $p_n = p_n(x, y, z)$ визначаються рівнянням:

$$W_B(y) \frac{\partial t_{II}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[(a_2 + a_2^r) \frac{\partial t_{II}}{\partial y} \right], \quad (2)$$

$$W_B(y) \frac{\partial p_i}{\partial x} = R_i \dot{O}_A \frac{\partial}{\partial y} \left[(D_{\bar{a}} + D_{\bar{a}}^{\dot{O}}) \frac{\partial p_i}{\partial y} \right], \quad (3)$$

при $x = 0$: $t_n = t_{II}^0$, $p_n = p_n^0$; при $y = b$: $\frac{\partial t_{II}}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial p_n}{\partial y} = 0$. – для основного повітряного потоку «О» ($0 \leq x \leq H$, $-a \leq y \leq 0$, $0 \leq z \leq L$) температура $t_O = t_O(x, y, z)$ визначається із рівняння:

$$W_i(y) \frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[(a_{\bar{a}} + \dot{a}_{\bar{a}}^{\dot{O}}) \frac{\partial t_i}{\partial y} \right] \quad (4), \text{ при } z = 0: t_O = t_O^0; \text{ при } y = -a: \frac{\partial t_i}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

– умови сполучення: на стінці при $y = 0$, $q_0 = k_{\alpha}(t_{II} - t_{жс})$, де q_0 – тепловий потік, k – коефіцієнт теплопередачі через стінку товщ. $\delta_{\bar{n}\dot{O}}$ и теплопровідністю $\lambda_{\bar{n}\dot{O}}$:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_{\bar{n}\dot{O}}}{\lambda_{\bar{n}\dot{O}}} + \frac{1}{\alpha_{\hat{A}}}};$$

На поверхні розділу, коли $y = h$, $p_n = p''$, $q = q_{\alpha} + q_{\beta}$. У результаті осереднення, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_p}{\partial x} = a_1(t_n - t_p) + b_1(p - p'') + c_1(t_O - t_p) \\ \frac{\partial t_n}{\partial x} = a_2(t_p - t_n), \quad \frac{\partial p}{\partial x} = b_2(p'' - p) \\ \frac{\partial t_O}{\partial z} = c_2(t_p - t_O) \end{cases} \quad (6)$$

Граничні умови: при $x = 0$ $t_{\alpha} = t_{\alpha}^0$, $t_{\hat{A}} = t_{\hat{A}}^0$, $p = p_0$; при $z = 0$ $t_f = t_f^0$. Коефіцієнти $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ визначаються співвідношеннями:

$$a_1 = \frac{\alpha}{c_{ж} g_{ж}}, b_1 = \frac{r_D \beta_p}{c_{ж} g_{ж}}, c_1 = \frac{k}{c_{\alpha} g_{\alpha}}, a_2 = \frac{\alpha}{c_2 g_B}, b_2 = 1,61 \frac{p_B \beta_p}{g_B}, c_2 = \frac{k}{c_{\alpha} g_O}.$$

Розглядається лінійна теорія випарних охолоджувачів, коли коефіцієнти $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ є постійними величинами, а для парціального тиску насиченої пари p'' передбачається нелінійна залежність:

$$p''(t) = 690,5 \exp(0,0608 t). \quad (7)$$

Представимо рівняння (6) у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_p}{\partial x} + c_0 t_{ж} = a_1 \theta_B + b_1 (p - p'') + c_1 t_O, & c_0 = a_1 + c_1 \\ \frac{\partial t_{II}}{\partial x} + a_2 t_{II} = a_2 t_p, & \frac{\partial p}{\partial x} + b_2 p = b_2 p'' \\ \frac{\partial t_O}{\partial z} + c_2 t_O = c_2 t_p \end{cases} \quad (8)$$

Розглянемо чисельне рішення задачі і як алгоритм застосуємо явну різницеву схему (метод Ейлера):

$$\begin{aligned} t_{p_j}^{i+1} &= (1 - c_0 \Delta x) t_{p_j}^i + [a_1 t_{II_j}^i + b_1 (p_j^i - p_j'') + c_1 t_{O_j}^i] \Delta x \\ t_{B_j}^{i+1} &= (1 - a_2 \Delta x) t_{B_j}^i + a_2 t_{p_j}^i \Delta x, \\ p_j^{i+1} &= (1 - b_2 \Delta x) p_j^i + b_2 \Delta x p_j'' \\ t_{O_{j+1}}^i &= (1 - c_2 \Delta z) t_{O_j}^i + c_2 \Delta z t_{p_j}^i \end{aligned} \quad (9),$$

де i, j визначають відповідні вузлові точки x і z , а Δx і Δz – це кроки різницевої сітки. Для граничних вузлових точок, відповідно з граничними умовами, одержимо:

$$t_{\alpha_j}^0 = t_{\alpha}^0, t_{II_j}^0 = t_{II}^0, p_j^0 = p_0, j = 1, 2, n, t_{O_0}^i = t_O^0, i = 1, 2, m \quad (10)$$

На рис. 3А і Б представлені характерні профілі зміни основних параметрів основного «О» (температура охолоджуваного при незмінному вологовмісті) потоку і допоміжного «Д» (температура і вологовміст) повітряних потоків у НВОг по довжині і висоті розрахункового модуля (результати наведені для початкових параметрів повітря), що надходить у модуль НВОг: П (ЗВ): $t_r^1/t_m^1/t_p^1 = 35/21/14^0\text{C}$; $x_r^1 = 11\text{г/кг}$ і співвідношення контактуючих повітряних потоків $l = G_O/G_{II} = 0,5; 1,0; 1,5$).

Принципова схема стенду наведена на рис. 4. (Позначення: 1А – електронагрівач; 1Б – паровий зволожувач повітря; 2 – вентилятор; 3 – робоча камера; 4 – розподільник рідини; 5 – краплеуловлювач; 6 – витратомір; 7 – рециркуляційна лінія; 8, 9 – регулятори витрати повітряного потоку; 10 – водяні ротаметри; 11 – секційний вимірювач витрати рідини; 12 – водяний бак; 13 – насос; 14 – фільтр; 15 – водонагрівач; 16 – регулятор температури рідини; 17, 18 – ртутний термометр і термометр опору (пари датчиків «сухий-мокрый»); 19 – відбір тиску; 20 – додаткова ємність для вимірювання затримки рідини; 21 – вимірювальна лінійка; 22 – вимірювальний комплекс). Стенд забезпечував можливість вивчення робочих процесів: в градирні ГРД і охолоджувачі повітря

НВОг. Габарити камери: 460×400×180 мм (ширина), пропускна здатність по повному повітряному потоку до 3500 м³/год по газу. Експериментальний стенд забезпечує можливість дослідження розроблених ВО з насадкою регулярної структури. Величина еквівалентного діаметра робочих каналів становила 20 мм; робочий діапазон швидкостей руху повітря у каналах насадки змінювався в діапазоні $w_{\Gamma} = 1,0 - 7,0$ м/с; щільність зрошення варіювала в діапазоні $q_{ж} = 2-18$ м³/м²год, (для НВОг не вище 8 м³/м²год, що обумовлено достатнім розвитком величини змоченої поверхні); в дослідях з ГРД величина співвідношення витрат газу і рідини $l = G_{\Gamma}/G_p \approx 1,0$, при $q_{ж} = 5-18$ м³/м²ч.; похибка вимірювання основних величин, обумовлена точністю вимірювань, обчислювалася при обробці даних для кожного експерименту (точність зведення теплового балансу – до 10-12%).

Експериментальні результати. Для НВОг співвідношення витрат основного і допоміжного повітряних потоків становило $l \approx G_O/G_{\Pi} = 1,0$; збільшення витрати рідини в діапазоні G_p від «сухого» режиму до значення щільності зрошення $q_{ж} = 8-12$ м³/ м²год не призводить до відчутного зростання втрати тиску. Для протитокової схеми контакту газу та рідини у каналах ГРД і в «мокрих» каналах НВОг існує критичне значення швидкості повітряного потоку, w_{Γ}^* , коли розвивається явище захливання насадки апарату, що характеризується оберненням протитокової схеми контакту у обернений прямотік і винесення повітряним потоком рідини з насадкового шару; у нашому випадку величина w_{Γ}^* складає значення $w_{\Gamma}^* \approx 6$ м/с. Явище поздовжнього знесення рідини в насадці ГРД, при поперечнотокової схемі контактування, що призводить до несприятливого її перерозподілу в обсязі насадки і винесення із шару, також практично відсутня; встановлено, що традиційне явище «захливання» (винесення рідини з насадки апарату газовим потоком і зниження до нуля пропускної здатності апарату) для прийнятої нами поперечнотокової схеми контактування потоків газу і рідини (ГРД) відсутня повністю, аж до значень $w_{\Gamma} > 8-10$ м/с. Перехід до поперечнотокової схеми забезпечує зниження рівня Δp , а отже, і зниження питомих енерговитрат, і можливість значного підвищення навантажень. Ефективність охолодження води в градирні E_p і ступінь використання повітря E_{Γ} (дорівнює відношенню тепла, винесеного з апарату потоком повітря до граничної її кількості, що визначається рівністю $h_{\Gamma}^2 = h_{\Gamma}^{2*}$), характеризуються:

$$E_{ж} = \frac{(t_p^1 - t_p^2)}{(t_p^1 - t_m^1)}; E_{\Gamma} = \frac{(h_{\Gamma}^2 - h_{\Gamma}^1)}{(h_{\Gamma}^{2*} - h_{\Gamma}^1)} \quad (11)$$

$$E_p = f(l = G_{\Gamma}/G_p, t_p^1, t_m^1) \text{ и } E_{\Gamma} = f(l = G_{\Gamma}/G_p, t_p^1, t_m^1) \quad (12)$$

$$E_p = c(1 - e^{-1.1 \Lambda}), E_{\Gamma} = c(1 - e^{-1.1 \Lambda}) \Lambda^{-1} \quad (13)$$

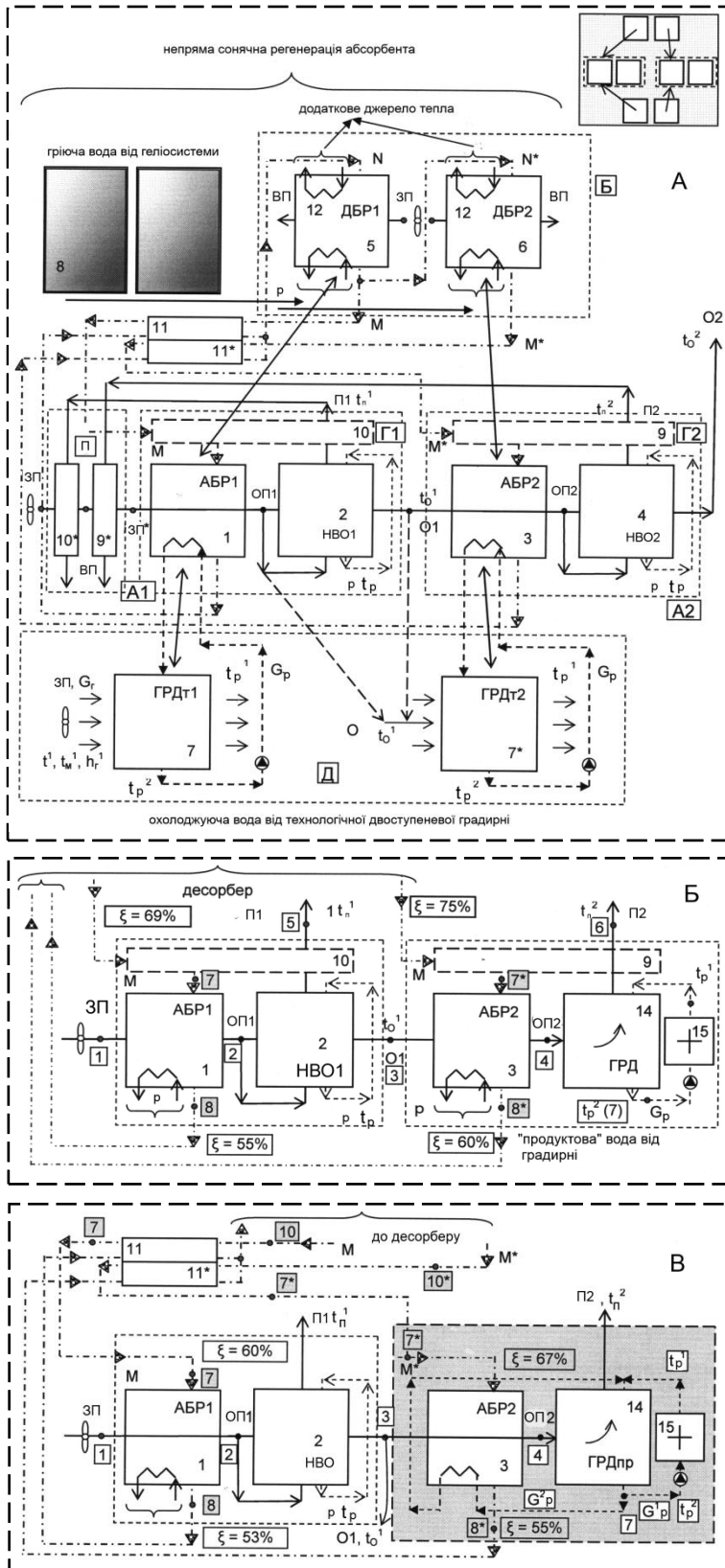
Результати отримані на насадці з полімерних матеріалів зі складно профільованим каналом (поперечний струм; $d_e = 15$ мм, $H_{PH} = 500$ мм). Оптимальне значення співвідношення потоків газу і рідини $l = G_{\Gamma}/G_p \approx 1,0$, при цьому ефективність охолодження води E_p становить у середньому, в залежності від величини Λ (характеристичне число), діапазон значень 0,5-0,88. У виразах для величини E_p (12) величина для досліджених типів насадок становить $c \approx$

0.88-0.9 (раніше було отримано: для насадки із алюмінієвої гофрованої фольги ($d_e = 12\text{мм}$; $H_{PH} = 400\text{мм}$) $c \approx 0.82-0.84$; для насадки з міпласта (капілярно-пористої структури) $c \approx 0.86-0.87$; для насадки із багатоканальних полікарбонатних плит (поперечний струм; канали з регулярною шорсткістю поверхні; $d_e = 15\text{мм}$, $H_{PH} = 500\text{мм}$.) $c \approx 0.85$; для насадки із багатоканальних багатощарових полікарбонатних плит (протитечія; $d_e = 15\text{мм}$, $H_{PH} = 400\text{мм}$.) величина $c \approx 0.86-0.87$. Стосовно до процесу в НВОг (рис. 5) в якості природних меж охолодження можна розглядати температуру повітряного потоку по мокрому термометру t_m^1 , збільшену на кілька градусів, в залежності від співвідношення $l = G_o/G_n$: $t^0 = t_m^1 + \Delta t$, що пов'язано з процесом переносу тепла в «явному» вигляді від основного до допоміжного потоку через розділяючі канали апарата стінку і стікає по поверхні «мокрого» каналу рідинну плівку, і відповідним підвищенням температури рециркулюючої через «мокру» частину апарату рідини, яка залишається в циклі постійною. Термічна ефективність НВОг «О» і «Д»:

$$E_o = (t_o^1 - t_o^2)/(t_o^1 - t^0); E_n = (t_n^1 - t_n^2)/(t_n^1 - t^0) \quad (14)$$

Термічна ефективність НВОг по «Д» потоку в середньому на 10 – 15% вище, ніж по «О» потоку, що говорить про можливість збільшення робочого діапазону величини $l = G_o/G_n$ при розрахунку і проектуванні НВОг. Отримано (рис. 5) відповідно реальним значенням меж охолодження t^0 : $l = G_o/G_n = 1,5$, $E_o = 0,45$; $l = G_o/G_n = 1,0$, $E_o = 0,65$; $l = G_o/G_n = 0,5$, $E_o = 0,89$. Був приведений порівняльний аналіз роботи випарних повітроохолоджувачів НВОг і НВОг-Рг (для умови: $l = G_o/G_n = 1.0$ для обох схем). Досягнуто зниження температури основного повітряного потоку від $t_o = 26,5^0\text{C}$ для НВОг ($t_n = 25,5^0\text{C}$; $\varphi_n = 95\%$) до $t_o = 21,0^0\text{C}$ для НВОг/Р. Слід звернути особливу увагу на вихідні параметри допоміжного повітряного потоку, що залишає НВОг-Рг (рис. 5). На відміну від НВОг, зміна стану потоку «Д» НВОг-Рг протікає вздовж лінії $\varphi_v = 100\%$, що може призводити до реконденсації і зниженню ефективності охолодження. Ця обставина, вкрай важлива для розвитку техніки випарного охолодження, практично не враховується у публікаціях останніх років, що може призводити до спотворення отриманих результатів.

П'ятий розділ присвячений аналізу принципів можливостей СХС і ССКП. Аналіз був виконаний на прикладі двохступневих ССКП з одним (єдиним для двох ступенів) десорбером, за формулою: [(ДБР1 ↔ АБР1) – НВО1 – (ДБР1 ↔ АБР2) – НВО2 → «О»] (рис. 6А і Б) і ССКП с двома десорберами, по формулі: [(ДБР1 ↔ АБР1) – НВО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НВО2 → «О»] (рис.6В, таблиця 1). Початкові умови для зовнішнього повітря були прийняті в самому складному варіанті, як за його температурою ($t^1 40^0\text{C}$), так і за вологовмістом ($x^1 20 \text{ г/кг}$), щоб наочно виявити граничні можливості ССКП, що розробляються. Всі результати отримані на основі теоретичного і експериментального досліджень, спираючись на залежності ефективності процесів від визначальних параметрів (витрати газу і рідини в ТМА осушувального і охолоджувального контурів і початкові температури і вологовміст контактуючих потоків, а також концентрацію розчину абсорбенту).



Формула ССКП: (ДБР1 ↔ АБР1) – НВО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НВО2 → «О»

Варіанти схемних рішень ССКП: А і Б – використання двохступеневого десорбера-регенератора, у якому кожна ступінь регенерації абсорбенту замкнута на відповідну ступінь абсорбера-осушувача повітря, з послідовним зростанням концентрації міцного розчину від АБР1 к АБР2; Д – використання двохступеневої технологічної градирні, обслуговуючої відповідні ступені абсорбції АБР1 і АБР2, при цьому ГРДт1 працює на зовнішньому повітрі, а ГРДт2 на частини осушеного в АБР1 зовнішнього повітряного потоку і охолодженого в НВО1 основного повітряного потоку.

Формула СХС: ЗП → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВОг – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охолоджена вода» (підвищення концентрації абсорбенту до 69 - 75%)

Формула СХС: ЗП → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВОг – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охолоджена вода»

Рис. 1. Принципові схеми розроблених ССКП (А, формула АБР1-НВО1-АБР2-НВО2) і СХС (Б) у варіанті використання двохступеневої технологічної градирні, обслуговуючої відповідні ступені абсорбції АБР1 і АБР2; СХС (В) з використанням частини охолодженої «продуктової» води для охолодження абсорбера другого ступеню (формула АБР1 – НВО1 – АБР2 – ГРД).

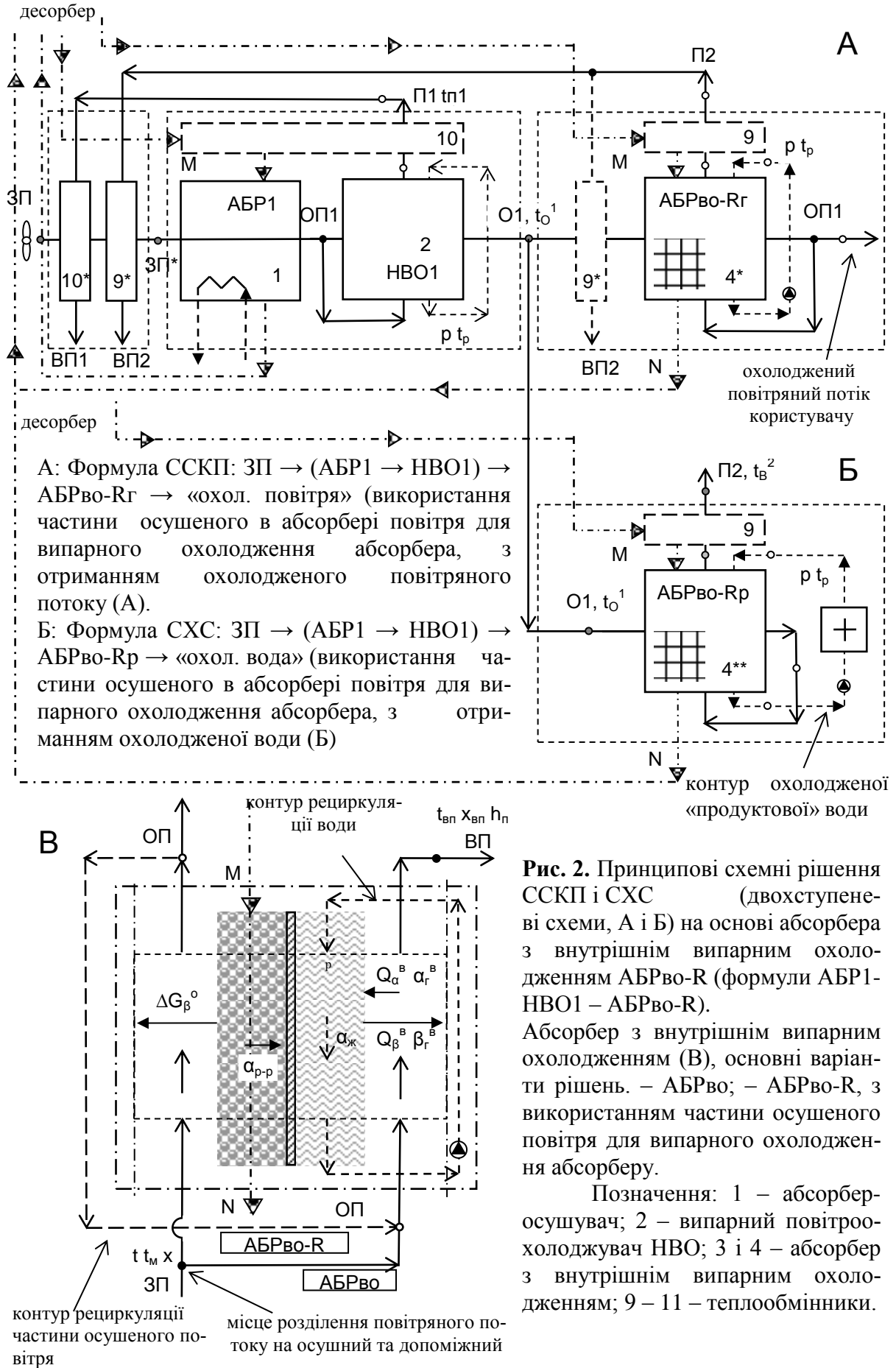
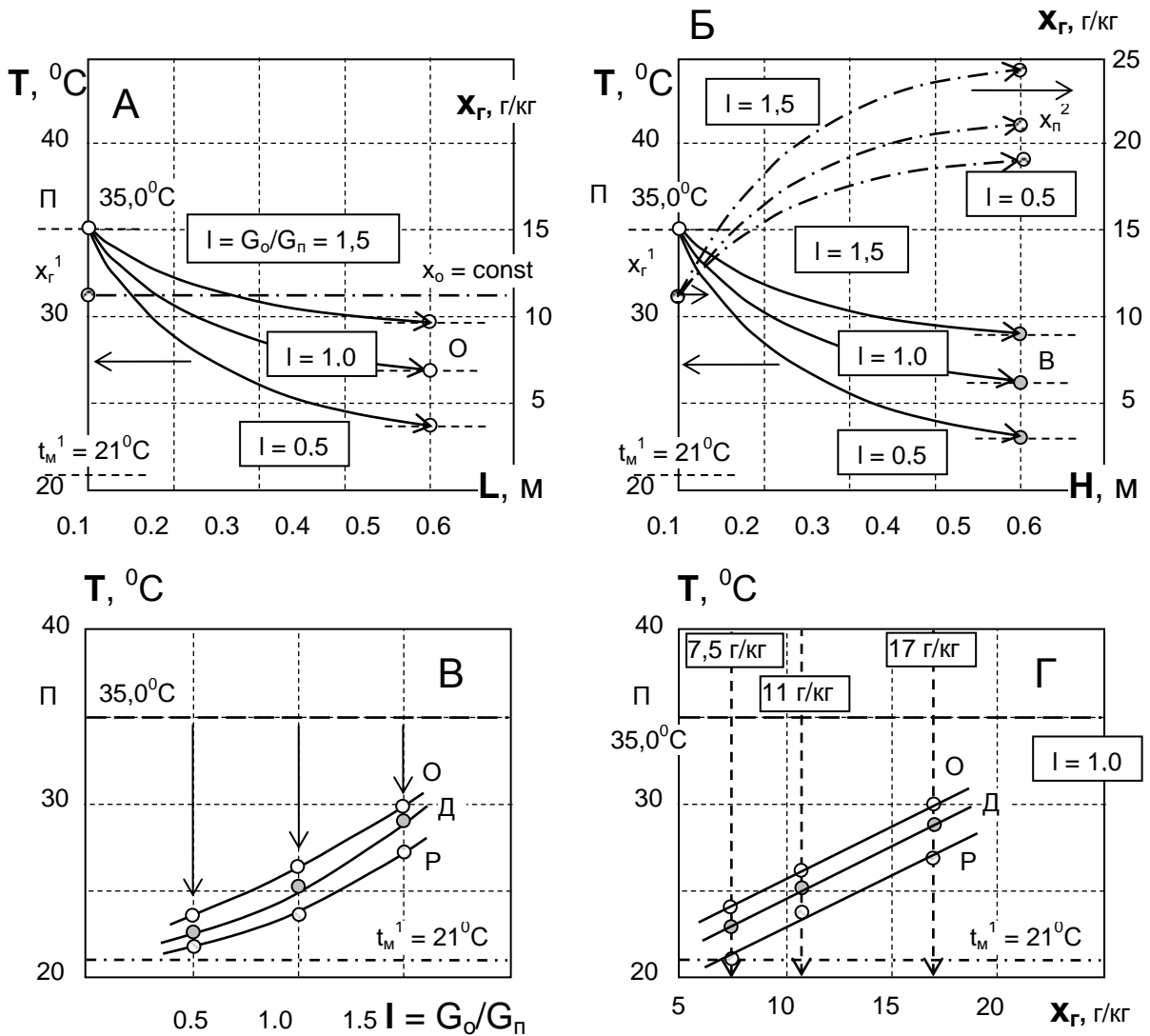


Рис. 2. Принципові схемні рішення ССКП і СХС (двохступеневі схеми, А і Б) на основі абсорбера з внутрішнім випарним охолодженням АБРво-Р (формули АБР1-НВО1 – АБРво-Р).

Абсорбер з внутрішнім випарним охолодженням (В), основні варіанти рішень. – АБРво; – АБРво-Р, з використанням частини осушеного повітря для випарного охолодження абсорберу.

Позначення: 1 – абсорбер-осушувач; 2 – випарний повітроохолоджувач НВО; 3 і 4 – абсорбер з внутрішнім випарним охолодженням; 9 – 11 – теплообмінники.

П (ЗП): $t_r^1/t_m^1/t_p^1 = 35/21/14^0\text{C}$; $x_r^1 = 11\text{г/кг}$; $l = G_o/G_n = 0,5; 1,0; 1,5$



1. П (ЗП): $t_r^1/t_m^1/t_p^1 = 35/18,2/9,0^0\text{C}$; $x_r^1 = 7,5 \text{ г/кг}$;
2. П (ЗП): $t_r^1/t_m^1/t_p^1 = 35/21/14^0\text{C}$; $x_r^1 = 11,0 \text{ г/кг}$;
3. П (ЗП): $t_r^1/t_m^1/t_p^1 = 35/25,0/21^0\text{C}$; $x_r^1 = 17,0 \text{ г/кг}$

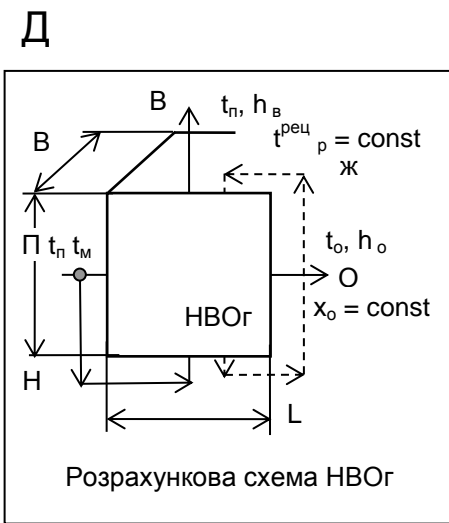


Рис. 3. Результати розрахунків: А і В – змінення температури та вологовмісту основного «О» і допоміжного «Д» повітряних потоків по довжині (L) і висоті (H) модуля НВОГ ($l = G_o/G_n$: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5), а також при різних: В – співвідношень основного і допоміжного повітряних потоків; Р – вологовміст зовнішнього повітря. Д – розрахункова схема.

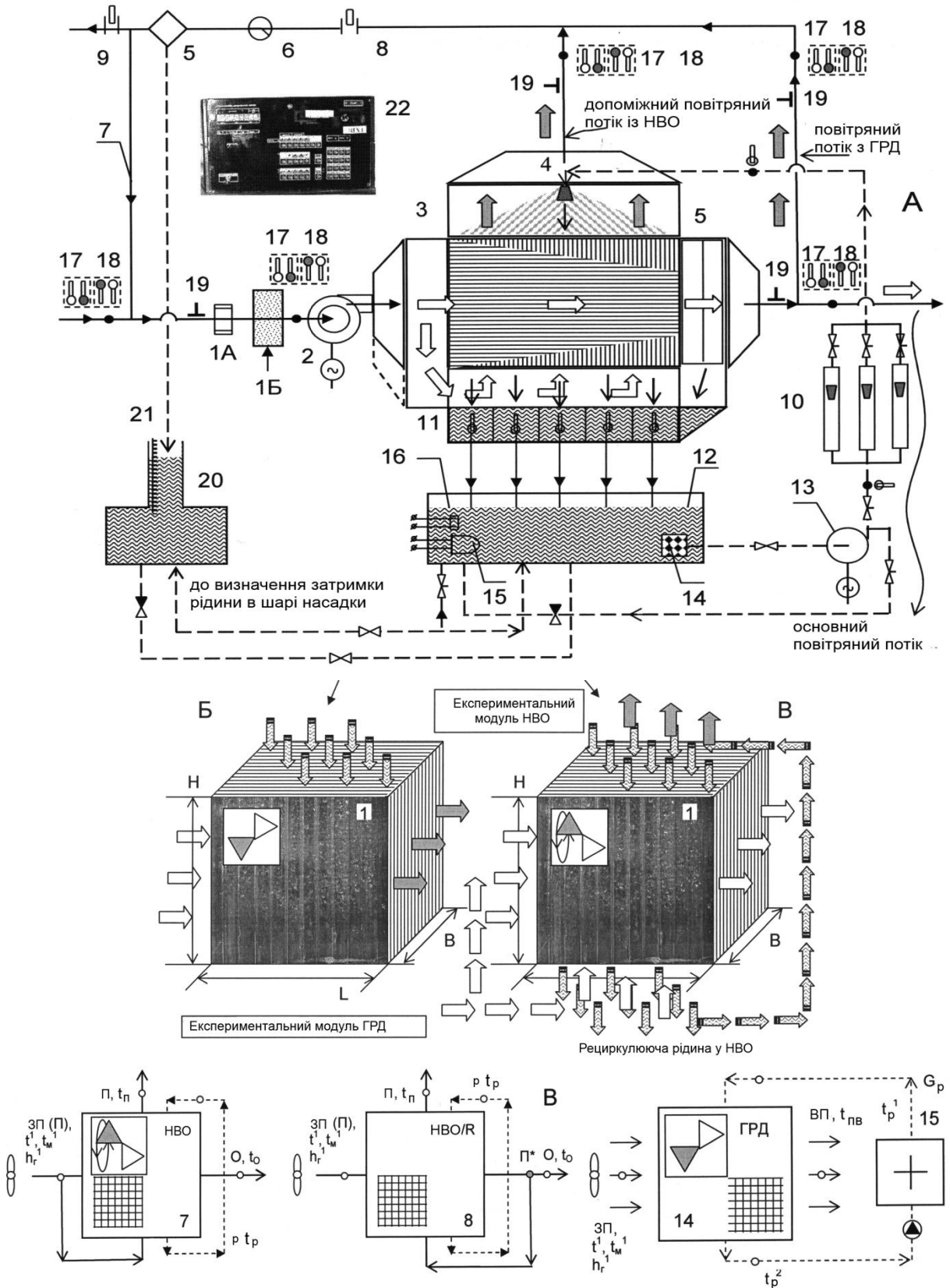


Рис. 4. Принципова схема експериментального стенду (А) для дослідження поперечноточних тепломасообмінних апаратів при випарному охолодженні води (ГРД) і повітря (НВОг); Б і В – експериментальні модулі ГРД і НВОг, відповідно.

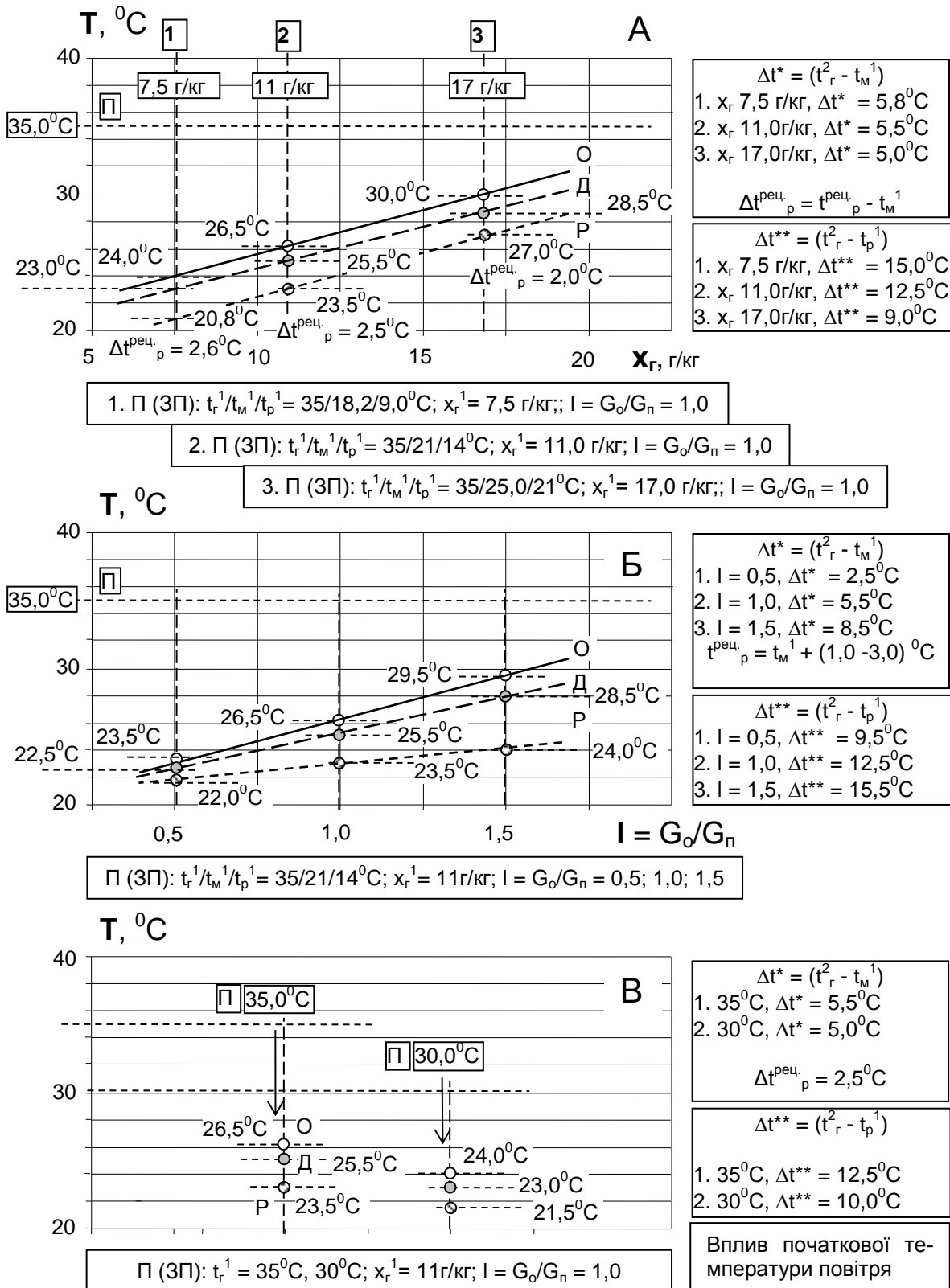


Рис. 5. Експериментальні результати, отримані для випарного повітроохолоджувача НДВ (ІЕС) при різних: А і В – вологовмісту і температурах зовнішнього повітря; Б – співвідношеннях основного і допоміжного повітряних потоків $l = G_o/G_n$: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5;

Таблиця 1

ССКП формула: [(ДБР1↔АБР1) – НВО1 – (ДБР1↔АБР2) – НВО2→«О»]	1: ЗП: $t^1 40^{\circ}\text{C}$, $t^1_{\text{М}} 28^{\circ}\text{C}$, $t^1_{\text{Р}} 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20 \text{ г/кг}$; 2: АБР1: ($\xi^1 60\%-51\%$), $t^2 41^{\circ}\text{C}$, $x^2 13 \text{ г/кг}$; 4: НВО1 (основний потік повітря): $t^4 31^{\circ}\text{C}$; $x^2 13 \text{ г/кг}$; 5: НВО1 (допоміжний потік повітря) : $t^5 29,5^{\circ}\text{C}$, $\phi 86\%$; 2*: АБР2: ($\xi^1 60\%-51\%$), $t^{2*} 32^{\circ}\text{C}$, $x^{2*} 8 \text{ г/кг}$; 4*: НВО2 (основний потік повітря): $t^4 23,5^{\circ}\text{C}$; $x^{2*} 8 \text{ г/кг}$; 5*: НВО2 (допоміжний потік повітря): $t^5 21-22,5^{\circ}\text{C}$, $\phi 100\%$
формула: [(ДБР1↔АБР1) – НВО1 – (ДБР2↔АБР2) – НВО2→«О»]	1: НВ: $t^1 40^{\circ}\text{C}$, $t^1_{\text{М}} 28^{\circ}\text{C}$, $t^1_{\text{Р}} 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20 \text{ г/кг}$; 2: АБР1: ($\xi^1 60\%-53\%$), $t^2 41^{\circ}\text{C}$, $x^2 13 \text{ г/кг}$; 4: НВО1 (основний потік повітря): $t^4 30^{\circ}\text{C}$; $x^2 13 \text{ г/кг}$; 5: НВО1 (допоміжний потік повітря) : $t^5 28,5^{\circ}\text{C}$, $\phi 86\%$; 2*: АБР2: ($\xi^1 67\%-55\%$), $t^{2*} 32^{\circ}\text{C}$, $x^{2*} 6,5 \text{ г/кг}$; 4*: НВО2 (основний потік повітря): $t^4 21,0^{\circ}\text{C}$; $x^{2*} 6,5 \text{ г/кг}$; 5*: НВО2 (допоміжний потік повітря): $t^5 20,0^{\circ}\text{C}$, $\phi 100\%$

Температура допоміжного потоку повітря трохи нижче, ніж у основного, але його відносна вологість, особливо зі зниженням загального температурного рівня при переході до другого ступеня охолодження, практично дорівнює 100% (лінія процесу 2* – 6 – 6*). Тут існує небезпека повного насичення повітряного потоку ще до його виходу з насадки ТМА і різкого зниження ефективності охолодження. Рішення задачі лежить в перерозподілі співвідношення витрат $l = G_o/G_p$. Для першого ступеня охолодження (НВО1) може бути прийняте значення $l = 1,0$, для подальшої (НВО2) витрату G_p слід збільшувати. Досягнутий рівень охолодження $t_o = 23,5^{\circ}\text{C}$ виявляється нижче природної межі охолодження зовнішнього повітря ($t^1_{\text{М}} 28^{\circ}\text{C}$) і навіть нижче точки роси ($t^1_{\text{Р}} 25^{\circ}\text{C}$). Результати аналізу наведено також на суміщеній діаграмі р-Т для розчину (LiBr + вологе повітря), рис. 6Б. Тут показані процеси зміни стану розчину абсорбенту в абсорберах по ступенях охолоджувача (7-8, АБР1) і (7-8*, АБР2), теплообміннику (8-9, 8*-9 і 10-7) і десорбері-регенераторі (9-10, ДБР). Потоки слабого розчину абсорбенту по ступенях АБР1 і АБР2 мають різну температуру (насправді і концентрація абсорбенту у них трохи різні) і змішуються перед теплообмінником. В двохступеневій ССКП з двома десорберами (рис. 6В) кожний ступінь забезпечує подальше зростання концентрації абсорбенту і пов'язана в роботі з відповідним ступенем абсорбера. Досягнутий більш глибокий рівень охолодження, ніж у випадку схеми з одним десорбером, $t_o = 21,0^{\circ}\text{C}$. Видно, що для дуже складних параметрів зовнішнього повітря розроблена ССКП однозначно забезпечує отримання необхідних комфортних параметрів повітряного середовища в обслуговуваному приміщенні. Число необхідних ступенів охолодження визначається ступенем важкості задачі, і для умов України і Європи можна обійтися одноступеневим варіантом ССКП. Аналіз можливостей СХС розглянуто на прикладі двохступеневих СХС з одним десорбером (рис. 7А і Б) і СХС з двома десорберами (рис. 7В). Отримано:

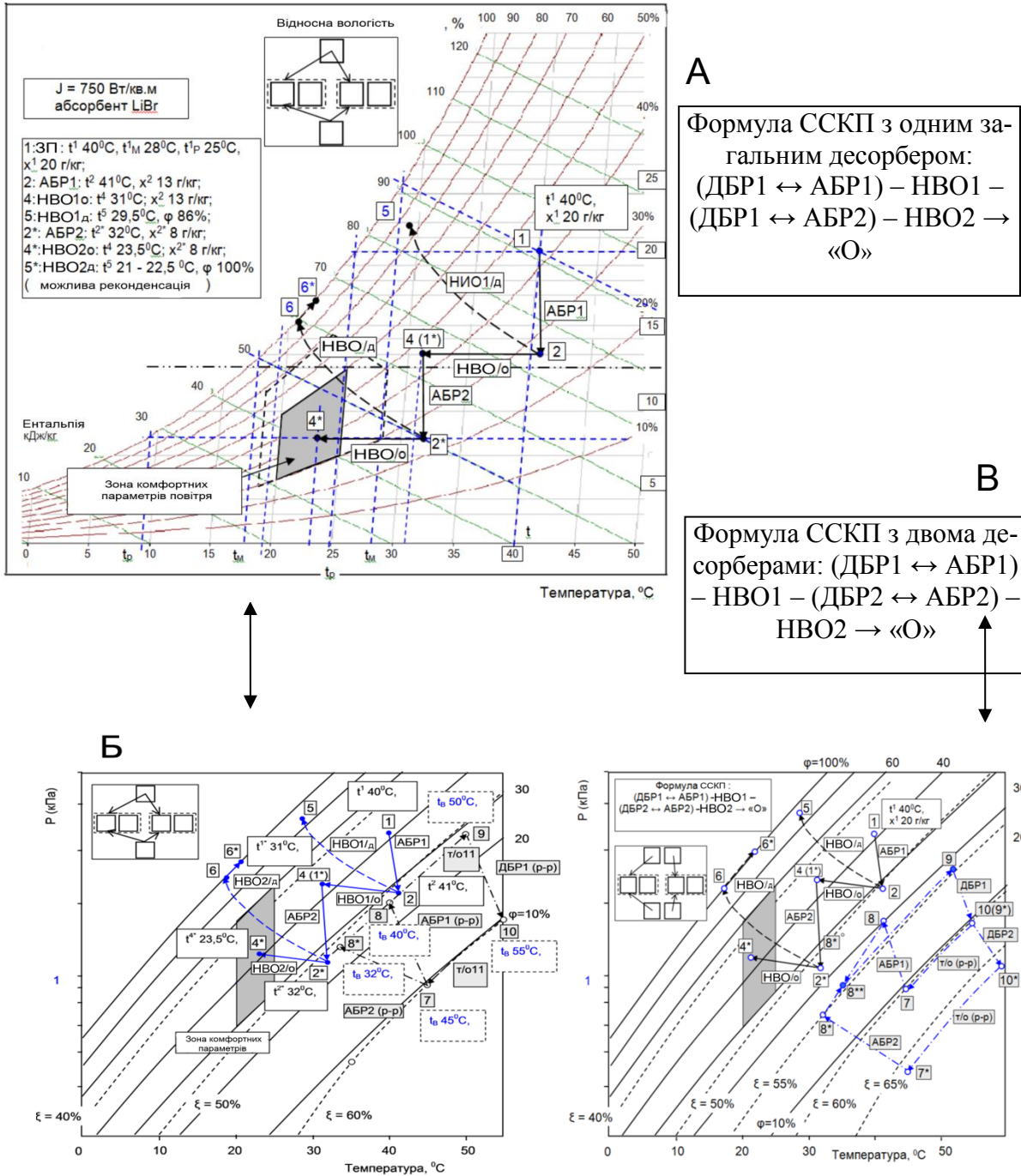


Рис. 6. Зображення процесів ССКП на Н-Т діаграмі вологого повітря (А) і сумісної діаграми р-Т для розчину LiBr+ - вол. повітря (Б) формула [(ДБР1 ↔ АБР1) – НВО1 – (ДБР1 ↔ АБР2) – НВО2]. Показані: 1-2 і 1*-2* - процеси осушування повітря у АБР1 і АБР2; 2-4(1*) (основний повітряний потік) і 2-5 (доп. повітряний потік) – НВО1; 2*-4* і 2*-6-6* – НВО2; 7-8(8*)-9-10 – зміни стану розчину абсорбенту у абсорбери (7-8, АБР1) і (7-8*, АБР2), теплообміннику (8-9, 8*-9 і 10-7) і десорберу (9-10);

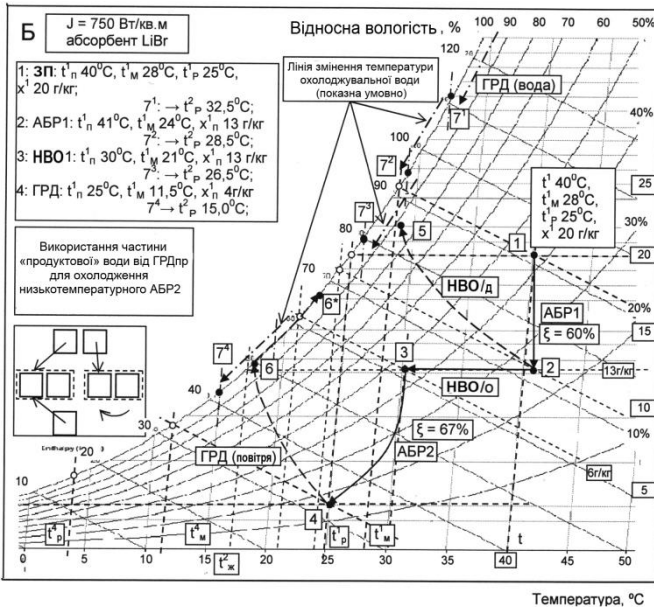
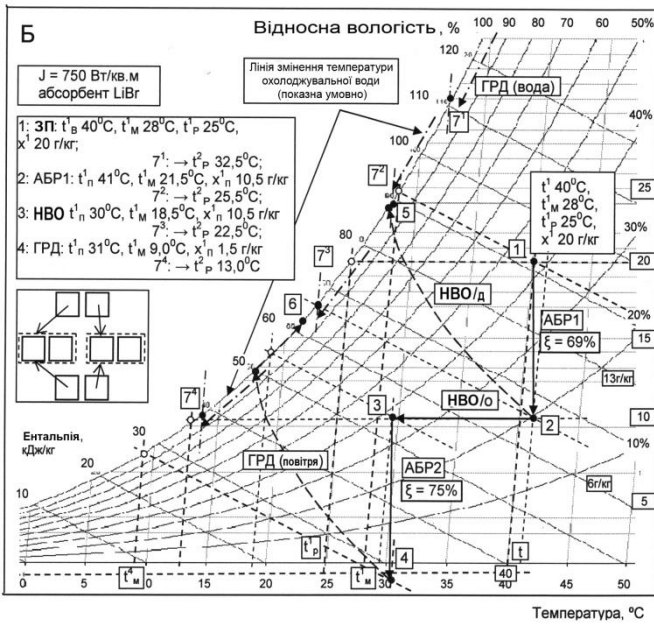
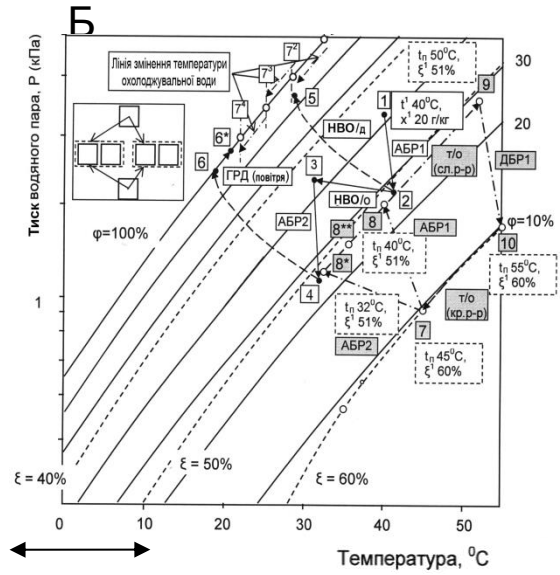
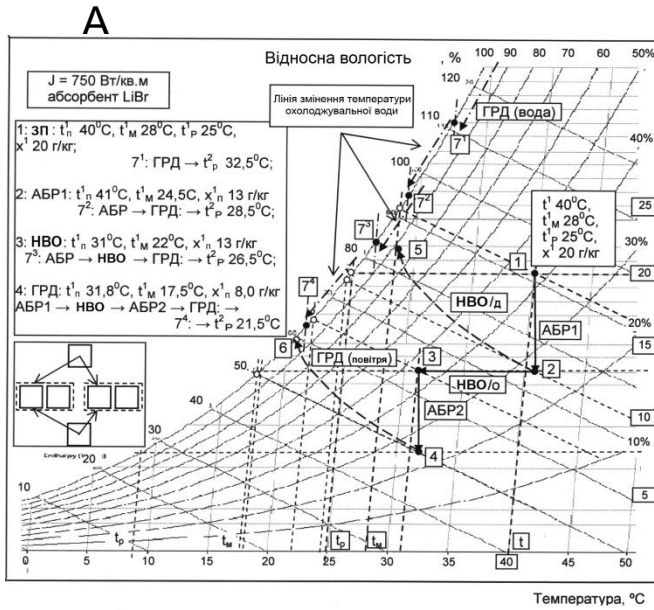
В – Процеси в ССКП по формулі [(ДБР1 ↔ АБР1) – НВО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НВО2]. Показані: 1-2 і (4)1*-2* – осушення повітря у АБР1 і АБР2; 2-4(1*) (осн. пов. потік) і 2-5 (доп. пов. потік) – процеси в НВО1; 2*-4* і 2*-6-6* – процеси у НВО2. Розчин абсорбенту: 8**-(7-8, 7*8*)-9-10-10* – процеси в абсорберах: (7-8-8**, АБР1) і (7*-8*-8**, АБР2), теплообміннику (8**-9 і 10*-7*) і десорбері (9-10-10*).

Досягнутий рівень охолодження води $t_p^2 = 21,5^{\circ}\text{C}$ виявляється нижче природної межі охолодження зовнішнього повітря ($t_M^1 28^{\circ}\text{C}$) і нижче точки роси ($t_p^1 25^{\circ}\text{C}$).

Таблиця 2

<p>СХС формула: [(ДБР1↔АБР1) – НВО1 – (ДБР1↔АБР2) – ГРД → «охолоджена вода»]</p>	<p>1: ЗП: $t_{п}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{РОСИ}}^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг; ГРД → $t_p^2 32,5^{\circ}\text{C}$; 2: АБР1: $t_{п}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 24,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг АБР → ГРД: → $t_p^2 28,5^{\circ}\text{C}$; 3: НВОГ: $t_{п}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 22^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг АБР → НВОГ → ГРД: → $t_p^2 26,5^{\circ}\text{C}$; 4: ГРД: $t_{п}^1 31,8^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 17,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 8,0$ г/кг АБР1 → НВОГ → АБР2 → ГРД: → $t_p^2 21,5^{\circ}\text{C}$</p>
<p>формула: [(ДБР1↔АБР1) – НВО1 – (ДБР2↔АБР2) – ГРД → «охолоджена вода»]</p>	<p>– ($\xi^1 60\%$ і 67% на вході в ступені охолодження): 1: ЗП: $t_{п}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_p^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг; → $t_p^2 32,5^{\circ}\text{C}$; 2: АБР1: $t_{п}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 24^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг, → $t_p^2 28,5^{\circ}\text{C}$; 3: НВОГ: $t_{п}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 21^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг, → $t_p^2 26,5^{\circ}\text{C}$; 4: ГРД: $t_{п}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 15,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 6$ г/кг, → $t_p^2 19,0^{\circ}\text{C}$ – ($\xi^1 69\%$ і 75% на вході в ступені охолодження, мал. 10А): 1: ЗП: $t_{п}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_p^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг; → $t_p^2 32,5^{\circ}\text{C}$; 2: АБР1: $t_{п}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 21,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 10,5$ г/кг, → $t_p^2 25,5,0^{\circ}\text{C}$; 3: НВОГ $t_{п}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 18,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 10,5$ г/кг, → $t_p^2 22,5^{\circ}\text{C}$; 4: ГРД: $t_{п}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 9,0^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 1,5$ г/кг, → $t_p^2 13,0^{\circ}\text{C}$</p>
<p>СХС з використанням частини води від ГРДпр для охолодження АБР2</p>	<p>1: ЗП: $t_{п}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_p^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг, → $t_p^2 32,5^{\circ}\text{C}$; 2: АБР1: $t_{п}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 24^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг, → $t_p^2 28,5^{\circ}\text{C}$; 3: НВОГ1: $t_{п}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 21^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 13$ г/кг, → $t_p^2 26,5^{\circ}\text{C}$; 4: ГРД: $t_{п}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_M^1 15,5^{\circ}\text{C}$, $x_{п}^1 4$ г/кг, → $t_p^2 15,0^{\circ}\text{C}$;</p>

На рис. 7Б показано зміну стану розчину абсорбенту в абсорберах по ступенях охолоджувача (7 – 8, АБР1) і (7 – 8*, АБР2), у теплообміннику (8**) – 9 та 10 – 7) і десорбері-регенераторі (9 – 10, ДБР). Аналіз СХС з двома десорберами (рис. 7В) виконано для двох рівнів концентрації абсорбенту (граничний рівень концентрацій для LiBr++ складає 70 – 75%). Видно, як зростання концентрації знижує досягнутий рівень вологовмісту, і відповідно, загальний рівень охолодження середовища. Аналіз двохступеневої СХС з двома десорберами і використанням частини «продуктової» води від ГРДпр для низькотемпературного охолодження абсорбера АБР2 представлений на рис. 7Г. Можлива ступінь осушування повітряного потоку при різних конфігураціях сонячних систем ілюструється графіками залежності досягнутого ступеня осушування повітря Δx_v від визначальних параметрів зовнішнього повітря: вологовмісту, температури і концентрації абсорбенту (рис. 8). Результати аналізу, наведені на рис. 9 для десяти варіантів розроблених СХС ілюструють їх порівняльні можливості з точки зору досягнутого рівня охолодження. Найглибший рівень забезпечують двохступеневі охолоджувачі, причому рівень охолодження визначається зростанням концентрації абсорбенту від ступеня до



В

Рис. 7. Принципові можливості розроблених сонячних холодильних систем СХС.

Параметри ЗП: t^1 40°C, x^1 20 г/кг.

А і Б – формула СХС з одним десорбером: ЗП → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВОг – (ДБР1 ↔ АБР2) – ГРД → «охолоджена вода».

В – формула СХС з двома десорберами: ЗП → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВОг – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охолоджена вода» (підвищення концентрації абсорбенту до 69 - 75%)

Г – формула СХС: ЗП → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВОг – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охолоджена вода» (використання частини «продуктової» води для охолодження абсорбера).

Позначення: 1-2, 3-4 – процес осушення повітря в абсорбери; 2-3, 2-5 – основний и допоміжний повітряні потоки в НВО; 7¹, 7², 7³, 7⁴ – охолоджена в ГРД вода tr^2 (ГРД, АБР-ГРД, АБР-НВОг-ГРД, АБР1-НВОг-АБР2-ГРД)

Г

ступеня охолодження. Безсумнівний інтерес представляє варіант СХС з використанням частини охолодженої води від «продуктової» градирні ГРДпр

для низькотемпературного охолодження абсорбера АБР2. Для європейських умов сонячні абсорбційні СХС забезпечують отримання охолодженої води на рівні 8-10⁰С, що дозволяє обслуговувати низку харчових технологій, не вдаючись до парокомпресійних охолоджувачів. Подальше зниження температурного рівня охолодження пов'язано з переходом до триступневих СХС, що пов'язано зі збільшенням енерговитрат і небезпекою кристалізації поблизу критичної лінії для абсорбенту. Розроблені СХС можуть знайти успішне застосування і у вирішенні завдань традиційної енергетики, холодильної та криогенної техніки, а також у системах кондиціонування повітря комфортного і технологічного призначення. Виконано загальний екологічний аналіз нових рішень СХС і ССКП з використанням методології та бази даних «Повний життєвий цикл» (ПЖЦ, міжнародні стандарти ISO (ISO 14040, 14041, 14042 і 14043, «ECO-INDICATOR 99», база даних програми «SIMAPRO-6»); робота виконувалась спільно з Австралійським дослідницьким центром (Commonwealth Science and Industrial Research Organization, 3072, Australia). Показано, що альтернативна система ССКП призводить до меншого виснаження природних ресурсів (в тому числі, енергоресурсів), ніж традиційна СКП, заснована на парокомпресійному принципі, що говорить про її більшу енергетичну ефективність; вона вносить менший внесок у глобальну зміну клімату; найбільший вплив на навколишнє середовище проводиться під час експлуатації системи, причому найбільший вплив у цей період пов'язаний з енергоспоживанням СКП.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблена концепція створення нового покоління багатофункціональних сонячних систем, що заснована на тепло-використовуючому абсорбційному циклі відкритого типу і складається з осушувальної і охолоджувальної частин; підтримання безперервності циклу забезпечує сонячна система; основним елементом сонячних багатофункціональних систем є комплекс взаємопов'язаних ТМА у вигляді автономного блока [(ДБР ↔ АБР) – ГРД] для створення СХС і [(ДБР ↔ АБР) – НВО] для створення ССКП;

2. Використання багатоступеневої регенерації абсорбенту в десорберах забезпечує послідовне зростання концентрації абсорбенту, який надходить у сполучені з ними абсорбери, що підвищує глибину охолодження у СХС і забезпечує досягнення параметрів комфортності повітря в ССКП;

3. Для одноступневих охолоджувачів межею охолодження є температура точки роси зовнішнього повітря, що істотно розширює можливості практичного використання випарних охолоджувачів в цілому; двохступенева ССКП з одним (єдиним для двох ступенів охолодження) десорбером, або з декількома десорберами, кожен з яких обслуговує відповідний ступінь абсорбції, забезпечує одержання комфортних параметрів повітря незалежно від рівня температури і вологовмісту зовнішнього повітря; відповідно двохступенева СХС забезпечує глибоке охолодження води і принципово нові можливості техніки випарного охолодження;

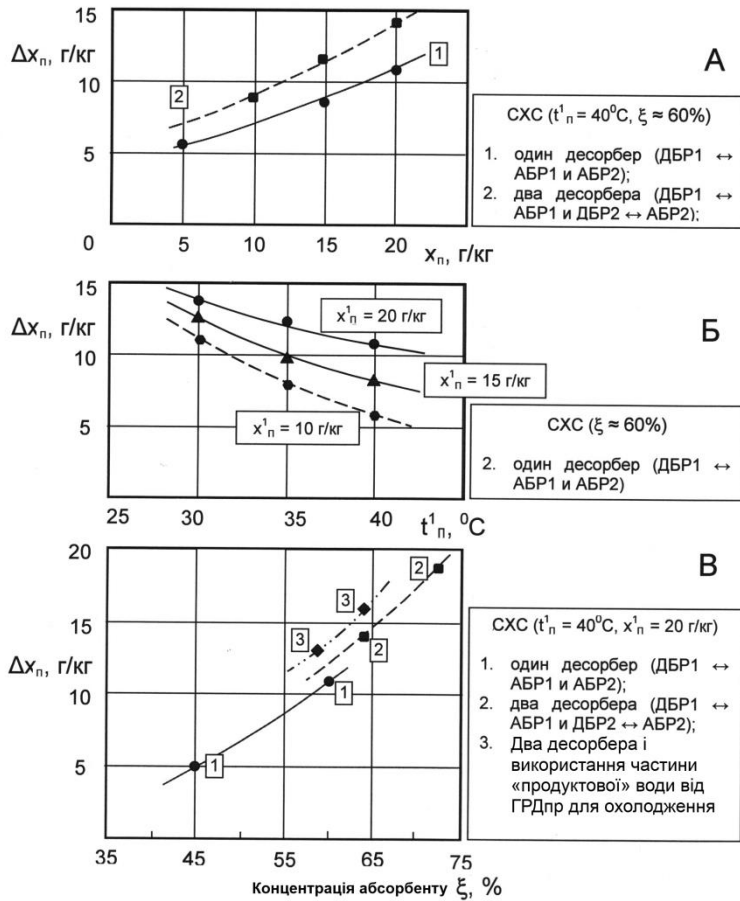
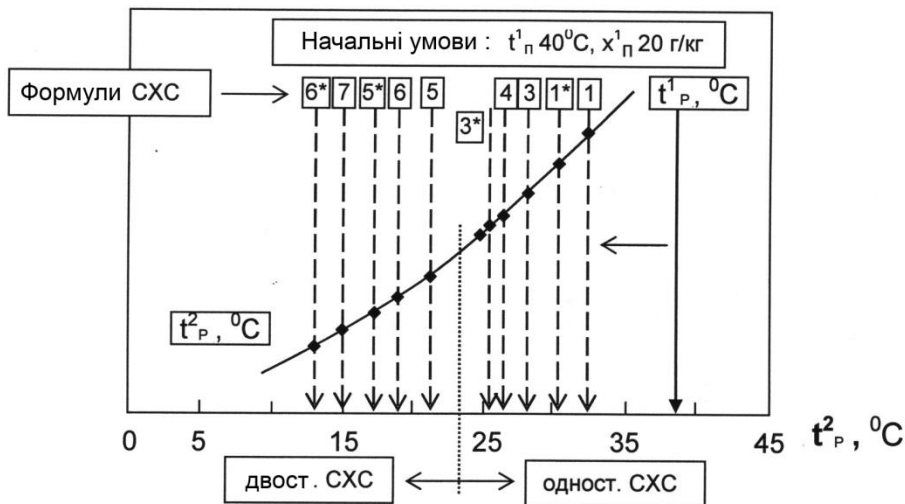


Рис. 8. Принципові можливості розроблених сонячних холодильних систем на основі відкритого абсорбційного циклу з точки зору досяжного рівня осушення повітря. Вплив основних параметрів роботи системи, початкових параметрів повітря і концентрації абсорбенту

- Формули розроблених СХС**
- Одноступеневі варіанти СХС :
- ЗВ → ГРД
 - ЗВ → т/к ↔ ГРД
 - ЗВ → НВО → ГРД
 - ЗВ → АБР → ГРД; (3* ЗВ → АБР ↔ ГРД)
 - ЗВ → АБР → НВО → ГРД
- Двоступеневі варіанти СХС :
- ЗВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВО – (ДБР1 ↔ АБР2) – ГРД
 - ЗВ → АБР1 → НВО1 → АБР/ВО-Rp
 - ЗВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД ($\xi = 60 - 67\%$)
 - ЗВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД ($\xi = 69 - 75\%$)
 - ЗВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НВО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД

Рис. 9. Принципові можливості (рівень охолодження) розроблених сонячних холодильних систем СХС на основі відкритого абсорбційного циклу, заснованих на різних формулах сонячної холодильної системи



4. Перспективним рішенням є використання розробленого абсорбера з внутрішнім випарним охолодженням АБРво, що дозволяє усунути із схеми окремих випарний охолоджувач другого ступеня, знизивши, тим самим, габарити, вагу і вартість системи в цілому;

5. Виконано моделювання процесів тепломасообміну у випарних повітроохолоджувачів непрямого типу; показано, що використання НВО зі зниженою межею охолодження середовищ, як і побудова на їх основі абсорбційних осушувально-випарних сонячних систем, вимагає рішення проблеми «рекон-денсації», пов'язаної з небезпекою повного насичення повітряного потоку в межах насадкової частини апаратів; виконано аналіз умов такої небезпеки та вироблені рекомендації щодо її запобігання;

6. Експериментальне дослідження дозволило конкретизувати робочі навантаження на ТМА плівкового типу осушувального і охолоджувального контурів сонячних систем з урахуванням критичних явищ «захливання» в насадковій частині апаратів; визначено ефективність процесів осушування повітря в абсорбері і випарного охолодження середовищ в апаратах охолоджувального контуру в залежності від початкових параметрів зовнішнього повітря і концентрації розчину абсорбенту, що надходить в абсорбер;

7. Виконаний аналіз принципів можливостей ССКП показав, що навіть для дуже важких параметрів зовнішнього повітря, розроблена ССКП однозначно забезпечує отримання необхідних комфортних параметрів повітряного середовища в обслуговуваному приміщенні без залучення традиційної парокомпресійної техніки; число необхідних ступенів охолодження в ССКП визначається ступенем складності задачі, і для умов України і Європи в цілому, можна обійтися одно - або двохступеневими варіантами ССКП;

8. Порівняльний аналіз принципів можливостей розроблених СХС показав, що найглибший рівень охолодження забезпечують двохступеневі охолоджувачі, причому рівень охолодження визначається зростанням концентрації абсорбенту від ступеня до ступеня охолодження; безсумнівний інтерес представляє двохступеневий варіант СХС з використанням частини охолодженої води від градирні ГРДпр для низькотемпературного охолодження низькотемпературного абсорбера, що забезпечує глибоке охолодження середовища і підвищує ефективність процесу осушування повітряного потоку в абсорбері;

9. Загальний екологічний аналіз нових рішень в області СХС і ССКП з використанням методології та бази даних «Повний життєвий цикл» показав, що сонячна система призводить до меншого виснаження природних ресурсів (в тому числі, енергоресурсів), ніж традиційна, заснована на парокомпресійному принципі, що говорить про її більшу енергетичну ефективність; вона вносить менший внесок у глобальні зміни клімату.

ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Людницький К.В. Холодильные системы на основе многоступенчатых тепломассообменных аппаратов [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко //

Problemele energeticii regionale. – 2014. – №2. – С. 59-72. *Особистий внесок: розробка схемних рішень для сонячних систем тепло - холодопостачання.*

2. Людницький К.В. Процессы общего теплообмена в аппаратах солнечных абсорбционных холодильных систем [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко // Problemele energeticii regionale. – 2014. – №3. – С. 29-41. *Особистий внесок: попередній аналіз можливостей багатофункціональних сонячних систем та концепція створення нового покоління таких систем.*

3. Людницький К.В. Солнечные абсорбционные системы теплохладоснабжения на основе многоступенчатых теплообменных аппаратов [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – №6 (152). – С. 32-42. *Особистий внесок: розробка схемних рішень для альтернативних холодильних систем на основі використання каскадного принципу побудови всіх ТМА із зростанням концентрації абсорбенту по ступенях.*

4. Людницький К.В. Солнечные многоступенчатые абсорбционные холодильные системы на основе теплообменных аппаратов пленочного типа [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – №2 (том 51). – С. 25-31.

Особистий внесок: аналіз можливостей багатофункціональних сонячних холодильних систем.

5. Людницький К.В. Солнечные холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – №3 (том 51). – С. 42-52.

Особистий внесок: концепція створення сонячних багатофункціональних систем на основі абсорбера з внутрішнім випарним охолодженням.

6. Людницький К.В. Солнечные многоступенчатые холодильные системы. Новые решения и анализ возможностей [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, В.Х. Кирилов // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – №5 (том 51). – С. 35-46. *Особистий внесок: теоретично розглянуто особливості плівкових течій у тепломасообмінних апаратах осушувального і охолоджувального контурів сонячних систем.*

7. Людницький К.В. Солнечные многоступенчатые холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, В.Х. Кирилов, А.Р. Антонова // Problemele energeticii regionale. – 2015. – №2 (28). – С. 77-88.

Особистий внесок: аналіз можливостей сонячної холодильної системи на основі абсорберу з внутрішнім випарним охолодженням.

8. Людницький К.В. Испарительные охладители газов и жидкостей непрямого типа со сниженным переделом охлаждения [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, В.А. Гончаренко, В.Х. Кирилов // Problemele energeticii regionale. – 2015. – №3 (29). – С. 74-85. *Особистий внесок: аналіз можливостей випарних охолоджувачів непрямого типу.*

9. Людницький К.В. Солнечные абсорбционные холодильные системы. Принцип построения и анализ возможностей [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, М.А. Глауберман, В.Х. Кирилов, А.Р. Антонова // Фізика аеродисперсних систем. – 2015. – №52. – С. 34-46.

Особистий внесок: принципи побудови систем.

10. Людницький К.В. Солнечные абсорбционные холодильные системы многоступенчатого типа [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, М.І. Гоголь,

Ю.І. Демьяненко // ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Національного університету кораблебудування. – 2015. – №5 (461). – С. 68-74.

Особистий внесок: аналіз ефективності процесу випарного охолодження.

11. Людницький К.В. Испарительные охладители газов и жидкостей прямого и непрямого типов со сниженным пределом охлаждения [Текст] / К.В. Людницький, А.В. Дорошенко, В.Х. Кирилов, А.Р. Антонова, В. Мелехин // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – №4 (том 52). – С. 35-46.

Особистий внесок: принципи побудови апаратів.

АНОТАЦІЯ

Людницький Костянтин Володимирович. Удосконалення сонячних багатофункціональних систем життєзабезпечення на основі тепловикористовуючого абсорбційного циклу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 –холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2016 р.

Дисертація присвячена розвитку наукових та інженерних основ створення багатофункціональних сонячних систем тепло - холодопостачання і кондиціонування повітря з використанням методів випарного охолодження середовищ. Показано, що для створення сонячних систем перспективно використання тепловикористовуючого абсорбційного циклу в одно - і багатоступеневих варіантах. Розроблено багатоступеневе оформлення сонячних систем на основі базових осушувально-охолоджувальних блоків з використанням десорбера-регенератора, у якому кожний ступінь регенерації абсорбенту замкнений на відповідну ступінь осушування повітря, з послідовним зростанням концентрації міцного розчину від ступеня до ступеню, що забезпечує зниження рівня охолодження у СХС і зняття кліматичних обмежень на використання ССКП. Розроблено абсорбер із внутрішнім випарним охолодженням, що дозволяє підвищити ефективність процесу абсорбції, знизити температурний рівень наступного випарного охолодження і вилучити із схеми окремих випарних охолоджувач другого ступеня. Виконано моделювання процесів тепломасообміну у випарних повітроохолоджувачах непрямого типу в показано, що використання НВО зі зниженою межею охолодження середовищ вимагає рішення проблеми реконденсації, пов'язаною з небезпекою повного насичення повітряного потоку у межах насадкової частини апаратів; виконано аналіз умов такої небезпеки і розроблено рекомендації по її запобіганню. Розроблена двохступенева ССКП здатна забезпечити одержання комфортних параметрів повітря для самих тяжких кліматичних умов Європи при значному зниженні енерговитрат; СХС 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 у низці харчових, хімічних та інших технологій з істотною економією енергії. Виконано загальний екологічний аналіз нових рішень з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл»

(база даних програми «SIMAPRO-6») і показано, що сонячна система призводить до меншого виснаження природних ресурсів і вносить менший внесок у глобальну зміну клімату.

Ключові слова: сонячна система, абсорбція-десорбція, випарне охолодження, кондиціонування повітря, гідро-аеродинаміка, тепломасообмін, екологічний вплив.

АННОТАЦІЯ

Людницький Константин Владимирович. Усовершенствование солнечных многофункциональных систем жизнеобеспечения на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла. – 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 создания солнечных холодильных (СХС) и кондиционирующих (ССКВ) систем перспективно использование теплоиспользующего абсорбционного цикла в одно- и многоступенчатых вариантах. Впервые разработано многоступенчатое оформление солнечных систем на основе базовых осушительно-охладительных блоков с использованием многоступенчатого десорбера-регенератора, в котором каждая ступень регенерации абсорбента замкнута на соответствующую ступень осушения воздуха, с последовательным ростом концентрации крепкого раствора от ступени к ступени, что обеспечивает снижение уровня охлаждения в СХС и снятие климатических ограничений на использование ССКВ. Разработан абсорбер с внутренним испарительным охлаждением АБРио, что позволяет повысить эффективности процесса абсорбции, снизить температурный уровень последующего испарительного охлаждения и устранить из схемы отдельный испарительный охладитель второй ступени. Выполнено моделирование процессов тепломассообмена в испарительных воздухоохладителях непрямого типа и показано, что использование НИО со сниженным пределом охлаждения сред требует решения проблемы реконденсации, связанной с опасностью полного насыщения воздушного потока в пределах насадочной части аппаратов; выполнен анализ условий такой опасности и выработаны рекомендации по ее предотвращению. Разработанная двухступенчатая ССКВ способна обеспечить получение комфортных параметров воздуха для самых тяжелых климатических условий Европы при значительном снижении энергозатрат; СХС может обеспечить охлаждение воды на уровне $t_{\text{ж}}^2 = 6-10^{\circ}\text{C}$ и, таким образом, значительно расширить возможность практического использования методов испарительного охлаждения сред в ряде пищевых, химических и других технологий с

существенной экономией энергии. Выполнен общий экологический анализ новых решений с использованием методологии и базы данных «Полный жизненный цикл» (база данных программы «SIMAPRO-6») и показано, что солнечная система приводит к меньшему истощению природных ресурсов и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата.

Ключевые слова: солнечная система, абсорбция-десорбция, испарительное охлаждение, кондиционирование воздуха, гидро-аэродинамика, теплообмен, экологическое влияние.

ABSTRACT

Liudnytskyi K.V. Improvement of the solar multifunction systems of life-support on the basis of absorbing open-cycle. - 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 devoted scientific and engineering's bases of creation of the multifunction solar refrigeration systems and systems of climatization with the use of methods of the evaporated cooling of environments. For creation of the solar systems the use of absorbing cycle is perspective in single-stage- and multi-stage variants. Registration of the solar systems is developed on the basis of desorbera in which every stage of regeneration of absorbent is reserved on the proper stage of drainage of air, with successive growth of concentration of strong solution from the stage to the stage, that provides the decline of cooling level. An absorber is developed with the internal evaporated cooling, that allows to promote efficiency of process of absorption, to reduce the temperature level of the subsequent evaporated cooling and remove the separate evaporated cooler of the second stage from a chart. The design of processes of heat-mass-transfer is executed in the evaporated coolers of air of indirect type and it is rotined that the use of IEC with the mionectic limit of cooling requires the decision of problem, related to the danger of complete satiation of current of air within the limits of attachment part of vehicles; the analysis of terms of such danger is executed and recommendations are mine-out on its prevention. The developed two-stage system of air-conditioning is able to provide the receipt of comfort parameters of air at the considerable decline of energy; the solar refrigeration system can provide cooling of water at level 6-100C and, thus, considerably to extend possibility of the practical use of methods of the evaporated cooling of environments in a number of food, chemical and other technologies with the substantial economy of energy. The global ecological analysis of new decisions is executed with the use of methodology and database the «Life Cycle Assessment (LCA)» (database program «Simapro-6») and it is rotined that over the solary system brings to less exhaustion of natural resources and brings in a less contribution to the global change of climate.

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

Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. №13. Тираж 100 прим.

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