

Абторер  
А 72

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Антонова Альфія Раїсівна

УДК 536.421; 62-69

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ГАЗО-  
РІДИННИХ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРАХ-РЕГЕНЕРАТОРАХ АЛЬТЕРНАТИВНИХ  
ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ

Спеціальність

05.14.06 - «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2014



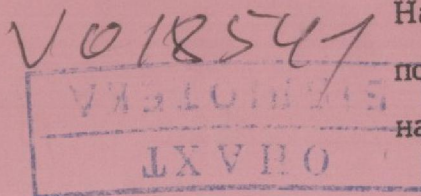
Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі технічної термодинаміки Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор **Дорошенко Олександр Вікторович**, професор кафедри технічної термодинаміки Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор **Денисова Алла Євсївна**, професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України

кандидат технічних наук, доцент **Новаківський Євген Валерійович**, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України, «Київського політехнічного інституту» (НТУУ «КПІ») Міністерства освіти і науки України



Захист дисертації відбудеться "29" вересня 2014 р. об 11-00 годині 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.

... в бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул.

ОНАХТ

Автореф

Теоретичне та експер



v018541

Мілованов В.І.



## ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до законодавчих актів: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 01.07.94 р. що затвердила "Закон України про енергозбереження", Постанови Кабінету Міністрів України №148 від 05.02.97 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 03.03.2006 р. № 85). Робота виконувалась за планом роботи аспірантів та тематикою, яка є складовою частиною наукової тематики ОДАХ, що відповідає енергетичній стратегії України.

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

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

**Методи дослідження:** теоретичне вивчення, математичне моделювання процесів, експериментальне дослідження на натурних зразках сонячних колекторів-регенераторів.



### Наукова новизна:

1. Вперше на підставі циклу теоретичних і експериментальних досліджень вивчено особливості плівкових течій по похилих поверхнях, включаючи проблему стійкості таких течій, стосовно до реальностей роботи газо-рідинних сонячних колекторів-регенераторів (СКг-ж) у складі сонячних енергетичних систем і при цьому:

- визначені товщини і хвильові характеристики течії плівки рідини по похилій поверхні в контакті з газовим потоком, включаючи проблему стійкості течій;

- вперше проведено порівняння характеристик руху по похилій і вертикальній поверхнях; проведено порівняння хвильових характеристик при русі рідинної плівки в каналі без газового потоку і при його наявності; встановлено, що при  $Re=20$ , і зміні кута нахилу  $20 \leq \beta \leq 90$  в протитоку з газовим потоком, хвильове число  $k_l$  змінюється з 0,25 до 0,34, товщина плівки  $h_0$  зменшується з 0,250 до 0,152 мм, відносна амплітуда хвилі  $\alpha$  збільшується з 0,087 до 0,100;

2. Проведено експериментальне вивчення середньої товщини рідинної плівки; теоретично і експериментально обґрунтовано перспективність профілювання поверхні «дна» теплоприймача СКг-ж, що дозволяє істотно знизити сумарні теплові втрати в СКг-ж, зумовлені механізмами конвекції і радіації; встановлено принцип профілювання і оптимальна геометрія профілю: - для продольнопрофільованого  $K=P/E=7-10$ , при  $E=10$  мм, - для поперечнопрофільованого  $k=p/e=50-60$ , при  $e=1$  мм;

3. Проведено узагальнення отриманих теоретичних і експериментальних результатів з виробленням практичних рекомендацій для конструювання розроблених модифікацій газо-рідинних СКг-ж і вибору оптимальних режимних параметрів їх роботи у складі сонячних енергетичних систем, рекомендовані:  $h_{pk}=125$  мм,  $w_r^*=6$  м/с (гранична швидкість повітряного потоку в робочому каналі СКг-ж),  $h_{пп}=20$  мм,  $\delta_{из}=28$  мм, встановлено межі стійкості течій, складові по швидкості газового потоку 2-6 м/с;

4. На підставі циклу теоретичних і експериментальних досліджень показана можливість створення високоефективних сонячних колекторів-регенераторів, в яких відбувається відновлення концентрації розчину абсорбенту ( $H_2O+LiBr+LiNO_3$ ), за рахунок перетворення сонячної енергії, що забезпечує десорбцію води і винесення її з робочої порожнини регенератора; показано, що забезпечення необхідного ступеня охолодження середовищ і забезпечення комфортних параметрів повітря (термовологісної обробка повітря в ССКП) може бути досягнуто тільки за рахунок сонячної енергії при збереженні високої ефективності перетворення сонячної енергії;

5. Виконана екологічна оцінка розроблених газо-рідинних СКг-ж і сонячних холодильних систем на їх основі; показано перевагу запропонованих модифікацій СК і сонячних систем на їх основі з екологічної точки зору.

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

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в розробці нових модифікацій газо-рідинних СКг-ж, створенні експериментальної бази для проведення теплових випробувань в стаціонарних умовах, визначенні найбільш ефективних шляхів використання сонячної енергії в системах теплохолодопостачання та кондиціонування повітря.

**Особистий внесок** здобувача полягає в розробці математичної моделі плівкової течії рідини по похилій поверхні в каналі з газовим потоком; аналізі стійкості рідинних течій по похилих поверхнях; аналізі роботи багатофункціональних сонячних систем з використанням запропонованих модифікацій газо-рідинних СКг-ж.



Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені на IV Всеукраїнський науково - технічний семінар «Удосконалення малої хладотеплотехніки і забезпечуваних нею технологічних процесів», м. Донецьк, 2009; VI міжнародна науково - технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса 2009; VI Всеукраїнський науково - технічний семінар «Удосконалення малої хладотеплотехніки і забезпечуваних нею технологічних процесів», м. Донецьк, 2012; VII міжнародна науково - технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса, 2011.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 робіт, з них 6 у науково-технічних журналах і 12 текстів доповідей на міжнародних та науково-практичних конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація викладена на 326 сторінках друкованого тексту, включаючи 65 рисунків, 8 таблиць і складається з вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел із 189 найменувань, 30 сторінок додатків.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

Другий розділ присвячений розробці принципів схемних рішень для сонячних багатофункціональних сонячних систем з використанням в охолодному контурі продуктивної градирні ГРД/п (рис. 1А), випарного охолоджувача прямого типу (рис. 1Б) і технологічної градирні для охолодження абсорбера (АБР) і схемних рішень для сонячного газо - рідинного колектора СКг-ж, що є найважливішою частиною системи регенерації (відновлення абсорбенту). СКг-ж в основі являє собою звичайний сонячний колектор - повітрянагрівач СКг, в якому рух повітряного потоку забезпечується сонячним розігрівом (різницею щільності повітря на вході і виході з СК), або спеціальним вентилятором. Такий СКг-ж включає теплоприймач (абсорбер), прозоре покриття (ПП) з повітряним зазором між ПП і тепло приймачем (каналом, по якому рухається повітряний потік), і теплоізоляцію дна. Теплоприймач розташовується на «дні» повітряного каналу, безпосередньо під ПП і повітряним зазором, і має різну конфігурацію поверхні. Поверхня теплоприймача, виконана з алюмінієвого листа з чорновим покриттям, складнопрофільована, щоб сприяти кращому розподілу плівки абсорбенту та перемішуванню повітря і підвищити величину теплостійому від теплоприймача. У роботі Turhan Koyuncu. (Renewable Energy 31 (2006) 1073-1088) було показано на основі аналізу СКг, що максимальним ККД володіє модель з нижнім розташуванням теплоприймача, у вигляді «дна» повітряного каналу; для цієї моделі температура теплоприймача була менше ( $58^{\circ}\text{C}$ ), а температура повітряного потоку на виході з колектора вище ( $41^{\circ}\text{C}$ ), ніж у моделей з розташуванням теплоприймача над робочим каналом і під ним. На підставі цього, а також результатів раніше виконаної в ОДАХ роботи Сіліча С.С., як вихідних принципів рішень для розробки газо-рідинного сонячного колектора-регенератора СКг-ж були прийняті (рис. 1 и 2): модель СКг-ж з нижнім розташуванням теплоприймача, у вигляді «дна» робочого каналу; теплоприймач виконується у вигляді U-подібного елемента з алюмінієвого листа з чорновим покриттям і складнопрофільованою

повітря в робочому каналі на основі сонячного розігріву повітряного потоку і з вимушеною циркуляцією повітря з використанням вентилятора діаметрального типу і зроблений висновок про



## Система прямой солнечной регенерации абсорбента ССРГ

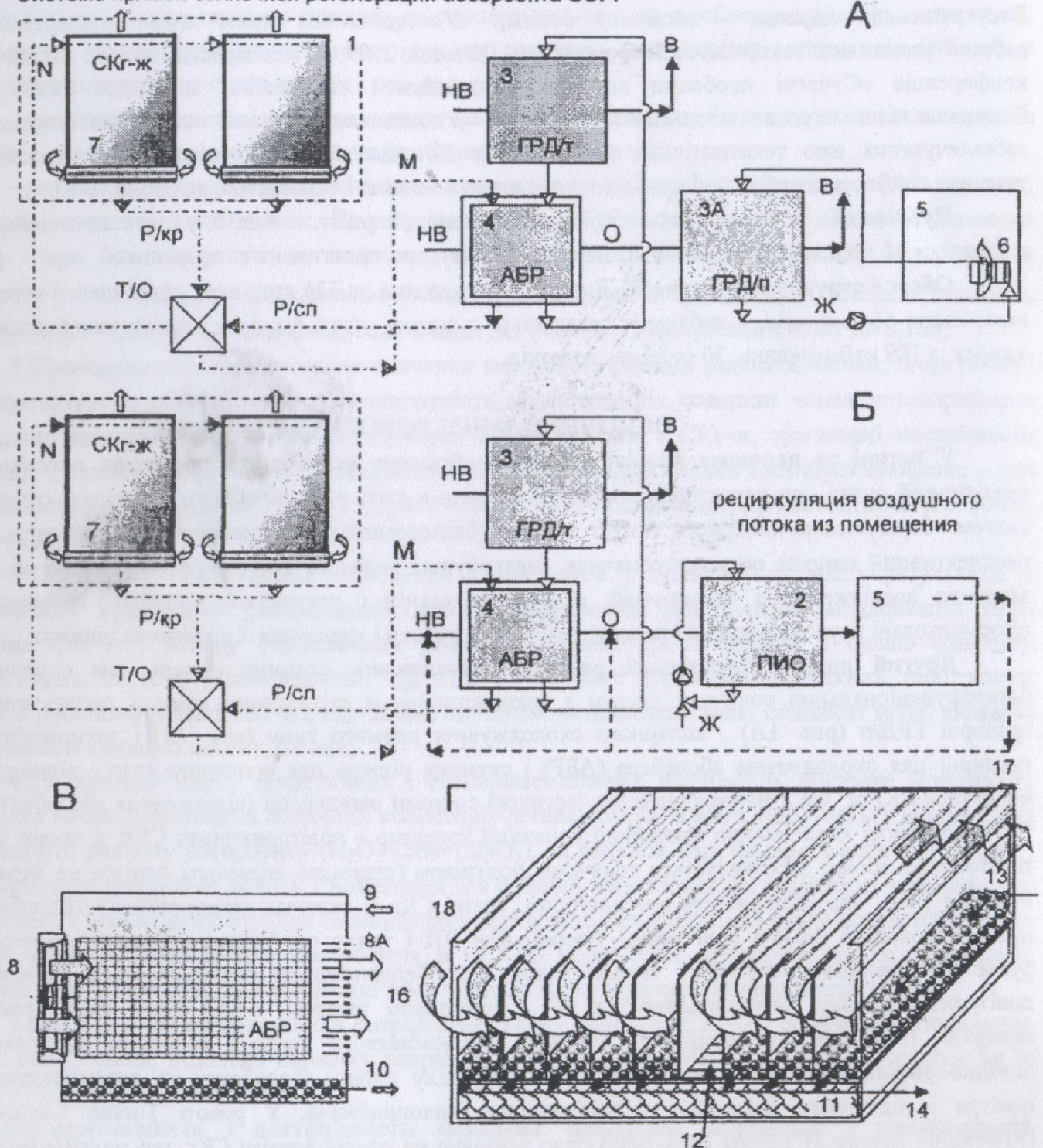


Рис. 1. Принцип побудови осушувальної-випарних багатофункціональних систем з використанням сонячної енергії для відновлення абсорбенту.

А і Б – варіанти з використанням ГРД/п і повітря охолоджувача (ПВО) в охолоджувальній частині системи; В і Г – принципова схема абсорбера (АБР) і сонячного колектора-регенератора (СКР/Р).

Позначення: 1 - сонячна система регенерації абсорбенту ССРГ; 2 - випарний охолоджувач повітря прямого типу; 3 - випарний охолоджувач води: ГРД - градирня технічна, 3А - градирня продуктова; 4 - абсорбер-осушувач АБР; 5 - приміщення; 6 - водо-повітряний теплообмінник; 7 - сонячний колектор-регенератор СКР-ж; 8, 8А - зовнішнє і осушене повітря; 9, 10 - слабкий і міцний розчини абсорбенту; 11 - теплоізоляція; 12 - профільована поверхня, по якій стікає рідинна плівка; 13, 14 - абсорбент; 16, 17 - повітряний потік; 18 - прозоре покриття; НВ - зовнішнє повітря; О - осушене повітря; В - викид; Ж - вода.



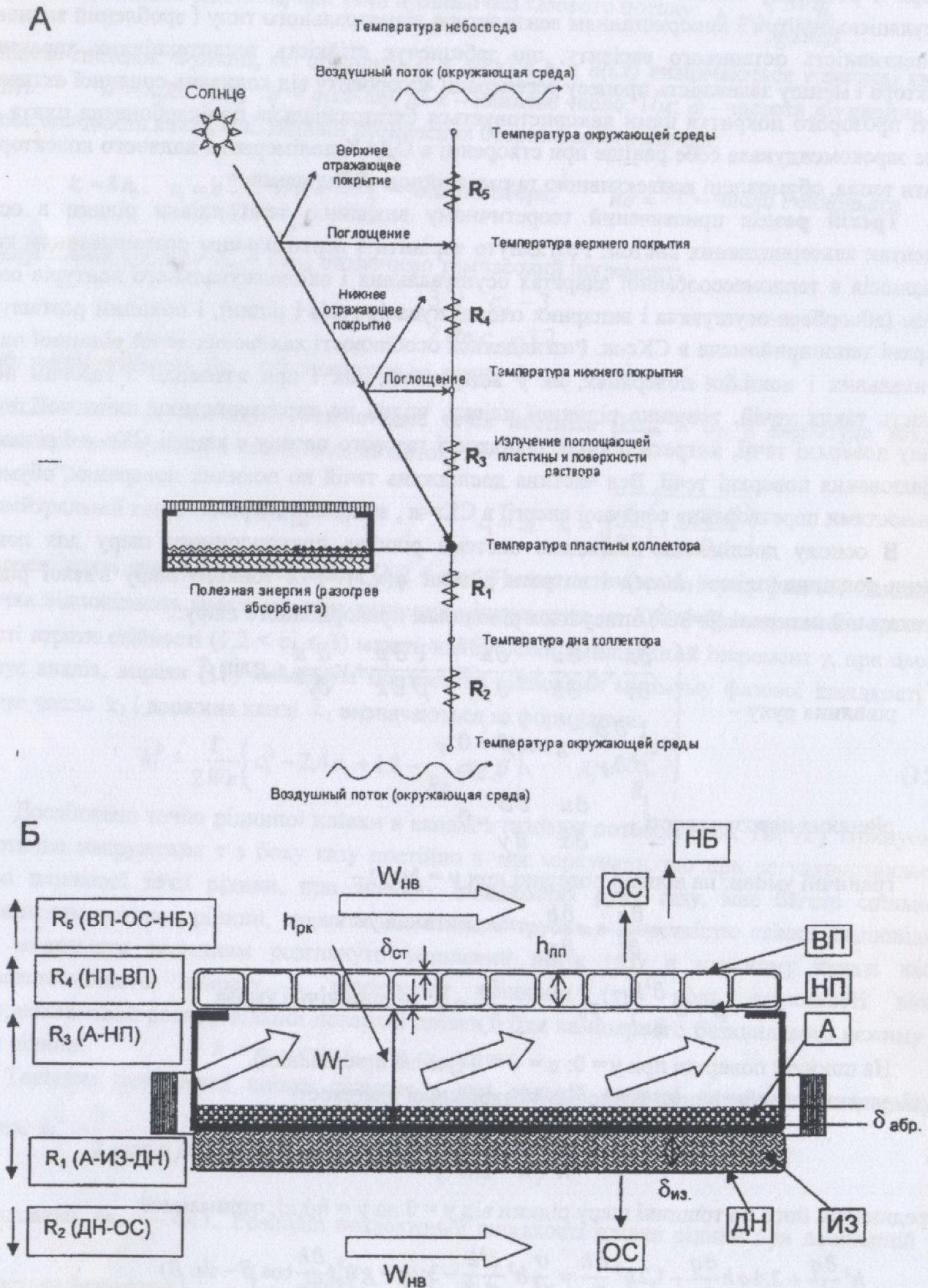


Рис. 2. До розрахунку теплових втрат в газо - рідинному сонячному колекторі з гравітаційним плінком півки абсорбенту.

А - характерна теплова послідовність СКГ-ж;

Б - компоновка СКГ-ж.



повітря в робочому каналі на основі сонячного розігріву повітряного потоку і з вимушеною циркуляцією повітря з використанням вентилятора діаметрального типу і зроблений висновок про перспективність останнього варіанту, що забезпечує стійкість теплотехнічних характеристик колектора і меншу залежність процесу регенерації абсорбенту від коливань сонячної активності. В якості прозорого покриття нами використовується багатоканальна полікарбонатна плита (1), що добре зарекомендувала себе раніше при створенні в ОДАХ полімерного водяного колектора СКЖ. Втрати тепла, обумовлені конвективною та радіаційною складовими.

**Третій розділ** присвячений теоретичному вивченню течії плівки рідини в основних елементах альтернативних систем. Розглянуто варіанти з вертикальним розташуванням поверхні плівконосія в тепломасообмінних апаратах осушувальних і охолоджувальних контурів сонячних систем (абсорбера-осушувача і випарних охолоджувачів газів і рідин), і похилим розташуванням поверхні теплоприймача в СКГ-ж. Розглядалися особливості хвильових течій рідинної плівки по вертикальних і похилих поверхнях, як у відсутності, так і при взаємодії з газовим потоком, стійкість таких течій, товщина рідинної плівки, вплив на характеристики плівкової течії кута нахилу поверхні течії, витрати рідини, швидкості газового потоку в каналі СКГ-ж і різного типу профілювання поверхні течії. Вся частина досліджень течій по похилих поверхнях, обумовлена реальностями перетворення сонячної енергії в СКГ-ж, виконана вперше.

В основу досліджень покладена система рівнянь прикордонного шару для локальних значень товщини плівки  $h(x, t)$  і витрати рідини  $q(x, t)$ . Рух тонкого шару в'язкої рідини по вертикальній поверхні ( $\beta = 90^\circ$ ) описується рівнянням прикордонного шару:

$$\text{рівняння руху} - \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \sin \beta \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g \cos \beta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{рівняння нерозривності} - \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

граничні умови: на вільній поверхні при  $y = h(t, x)$  -

$$v = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} - \text{кінематична умова;} \quad (3)$$

$$p + \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = p_0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 - \text{динамічна умова} \quad (4, 5),$$

$$\text{На похилій поверхні при } y = 0: u = v = 0 \text{ (умова прилипання).} \quad (6)$$

У припущенні параболічного розподілу поздовжньої швидкості

$$u(t, x, y) = \frac{3q}{h} \left( \frac{y}{h} - \frac{1}{2} \frac{y^2}{h^2} \right), \quad (7)$$

усереднюючи його по товщині шару рідини від  $y = 0$  до  $y = h(t, x)$ , отримаємо:

$$h^2 \frac{\partial q}{\partial t} + 2,4 q h \frac{\partial q}{\partial x} - 1,2 q^2 \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\sigma}{\rho} h^3 \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} - 3 \nu q - g h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial x} \cos \beta - \sin \beta \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\text{Для ламінарного безхвильового режиму течії: } h = h_0 - \text{const}, q = q_0 - \text{const}. \quad (10)$$



3 (8) товщина плівки рідини  $h_0$  при течії в каналі без газового потоку:  $h_0 = \sqrt[3]{\frac{3\nu q_0}{g \sin \beta}}$  (11)

Стійкість системи. Функції, які шукались  $q = q(t, x)$  и  $h = h(t, x)$  визначаються у вигляді хвилі, яка біжить:  $h = h(kx - \omega t)$ ,  $q = q(kx - \omega t)$ , де  $k$  – хвилеве число, 1/м;  $\omega$  – частота збудження, 1/с;  $c$  – фазова швидкість хвилі, м/с. Ввівши позначення безрозмірних величин:

$$k_1 = k h_0, \quad c_1 = c \frac{h_0}{q_0}, \quad We = \frac{\sigma h_0}{\rho q_0^2} - \text{число Вебера}, \quad Re = \frac{q_0}{\nu} - \text{число Рейнольдса}$$

і припустивши тут  $c_1 = c_{re} + i c_{im}$ , визначимо тимчасовий інкремент:

$$\gamma = k_1 c_{im} = -\frac{3}{2} \frac{1}{Re} \frac{c_{re} - 3}{c_{re} - 1,2} \quad (12)$$

Звідки умова стійкості  $k c_{im} < 0$  виконується, якщо  $0 < c_1 < 1,2$  и  $c_1 > 0,3$ . (13)

При  $1,2 < c_1 < 3$ , ламінарна безхвильова течія нестійка ( $k c_{im} > 0$ ), а амплітуда збудження експоненціально зростає з часом вниз по потоку.

Для нейтральної хвилі ( $\gamma = k_1 c_{im} = 0$ ):  $c_1 = 3, \quad k_1 = \sqrt{\frac{3}{We} \left(1 - \frac{\text{ctg } \beta}{Re}\right)}$  (14)

Дисперсні криві для зростаючих хвиль ( $1,2 < c_1 < 3$ ) мають точки мінімуму фазової швидкості  $c_1$ , ці точки відповідають максимальним значенням інкремента  $\gamma$ . Хвилі максимального зростання в області втрати стійкості ( $1,2 < c_1 < 3$ ) мають найбільший амплітудний інкремент  $\gamma$ , при цьому, як показує аналіз, вирази (12) максимум інкремента відповідає мінімуму фазової швидкості  $c_1$ , а хвилеве число  $k_1$  і довжина хвилі  $\lambda_1$  визначаються за формулами:

$$k_1^2 = \frac{1}{2We} \left( c_1^2 - 2,4 c_1 + 1,2 - \frac{3}{Re} \text{ctg } \beta \right), \quad \lambda_1 = \frac{2\pi}{k_1} \quad (15, 16)$$

Досліджено течію рідинної плівки в каналі з газовим потоком (рис. 1В, 1Г). Припускаємо, що дотичне напруження  $\tau$  з боку газу постійно з тих міркувань, що при регулярнотхвильовому режимі плівкової течії рідини, при значних швидкостях руху газу, має багато спільного з турбулентним потоком рідини, що не стискається, в трубах з шорсткістю стінки. Відповідно до цього модельним поданням розглянуто усталений потік газу в плоскому каналі насадки тепломасообмінного апарату з шорсткими стінками (тут роль шорсткості виконує регулярнотхвильовий рельєф вільної поверхні плівки). Для ламінарного безхвильового режиму течії плівки рідини:

$$h = h_0 - \text{const}, \quad q = q_0 - \text{const}. \quad (17)$$

Товщина незбуреної плівки рідини  $h_0$  при заданій витраті визначається з кубічного рівняння:  $h_0^3 - \frac{3}{2} \frac{\tau}{\rho g \sin \beta} h_0^2 - \frac{3\nu q_0}{g \sin \beta} = 0$ , (18)

тут враховано, що  $\frac{h_0}{r} \ll 1$ . Розподіл поздовжньої швидкості плівки рідини при ламінарній течії

визначається формулою:  $u_0(y) = \frac{3q_0 y}{h_0^2} \left(1 - \frac{y}{2h_0}\right) + \frac{\tau y}{2\mu} \left(1 - \frac{3y}{2h_0}\right)$  (19)

Отримана формула для визначення товщини плівки рідини  $h$  при заданій витраті в каналі з газовим потоком:  $h = (h_0 - \frac{\tau}{2\rho g \sin \beta})(1 + \frac{\tau_1}{3})$ . Враховуючи рішення рівняння (18) при зміні величини  $\tau$ , від 0 до 1, товщина плівки рідини  $h$  змінюються монотонно в межах  $1,07 \leq h \leq 1,8$ .



У результаті дослідження стійкості течії рідинної плівки при взаємодії з газовим потоком отримано співвідношення для тимчасового інкремента:  $\gamma = k_1 c_{im} = -\frac{3}{\text{Re}} \frac{(c_{re} - b_1)}{(2c_{re} - p_1)}$  (20)

Звідки умова стійкості  $\gamma = k c_{im} < 0$  виконується, якщо:

$$0 < c_{re} < C_- = 1,2 - \frac{\tau_1 h_1^2}{60} \text{ и } c_{re} > C_+ > 3 + \frac{2}{3} \tau_1 h_1^2 \quad (21)$$

В іншому випадку, коли  $C_- < c_{re} < C_+$ , ламінарна безхвильова течія нестійка ( $k c_{im} > 0$ ), амплітуда прогресивної хвилі обурення зростає з плином часу вниз за потоком. У результаті дослідження стійкості незбудженого руху рідини ( $h = h_0$ ) при двофазному протиточному перебігу

встановлено, що якщо швидкість газу  $w_r$  задовольняє нерівності:  $w_r > U_0 + \left( \frac{P+Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2}$ , то поверхня розділу фаз нестійка, і довгохвильові збудження експоненціально зростають з плином часу. В іншому випадку має місце стійкість. Для нейтральної кривої гранична швидкість газу, після якої починається нестійкість, визначається формулою:  $w_r = U_0 + \left( \frac{P+Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2}$ , (22)

У разі противоточного руху рідини і газу гранична швидкість газу задовольняє нерівності:

$$w^* > \left( \frac{P+Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2} - U_0. \quad (23)$$

У результаті кількісної оцінки граничної швидкості по співвідношенню (23) при різних кутах нахилу  $\beta$  робочої поверхні встановлено, що середня по витраті швидкість рідини дорівнює відношенню щільності  $q_0$  зрошення до товщини рідинного шару:

$$U_0 = \frac{q_0}{h_0}, \text{ при этом } h_0 = 3 \cdot \frac{3\nu q_0}{g \sin \beta}. \quad (24)$$

Розрахунок проводився при наступних значеннях величин, що входять у співвідношення (23) з урахуванням (24):  $\rho_1 = 995,7 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 1,165 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_1 = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\sigma = 712,2 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $\lambda = 0,01 \text{ м}$ ,  $k = 2\pi / \lambda = 628,32 \text{ 1/м}$ ,  $r_0 = 0,005 \text{ м}$ ,  $q_0 = 0,322 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ . Результати розрахунку представлені на рис. 3Е. Отримані дані свідчать про те, що кут нахилу робочої поверхні СКГ-ж слабо впливає на граничну швидкість газу.

Результати порівняння руху плівки рідини по похилій і вертикальній поверхнях в каналі з газовим потоком представлені на рис. 3Б-3Е. Встановлено, що:

- течія по похилих поверхнях призводить до незначного потовщення плівки рідини; максимальна товщина шару рідини  $h_0$  збільшується при швидкості газу в робочому каналі  $w_r$  до 6 м/с, експериментально підтверджена можливість використання отриманих розрахункових залежностей для товщини плівки і хвильових характеристик течії;

- профілювання «дна» теплоприймача забезпечує сприятливі умови протікання процесів переносу в рідинній плівці і покращує ситуацію з розподілом рідинної плівки по поверхні полімерного листа насадки.

В результаті можна для СКГ-ж рекомендувати оптимальне значення параметра профілювання складає діапазон значень  $k \approx 5-10$  для поперечного профілювання і  $K = 50-60$  для поздовжнього профілювання, що дозволяє підвищити питому змочену поверхню СК і забезпечує максимальну інтенсивність протікання процесів переносу в рідкій плівці.



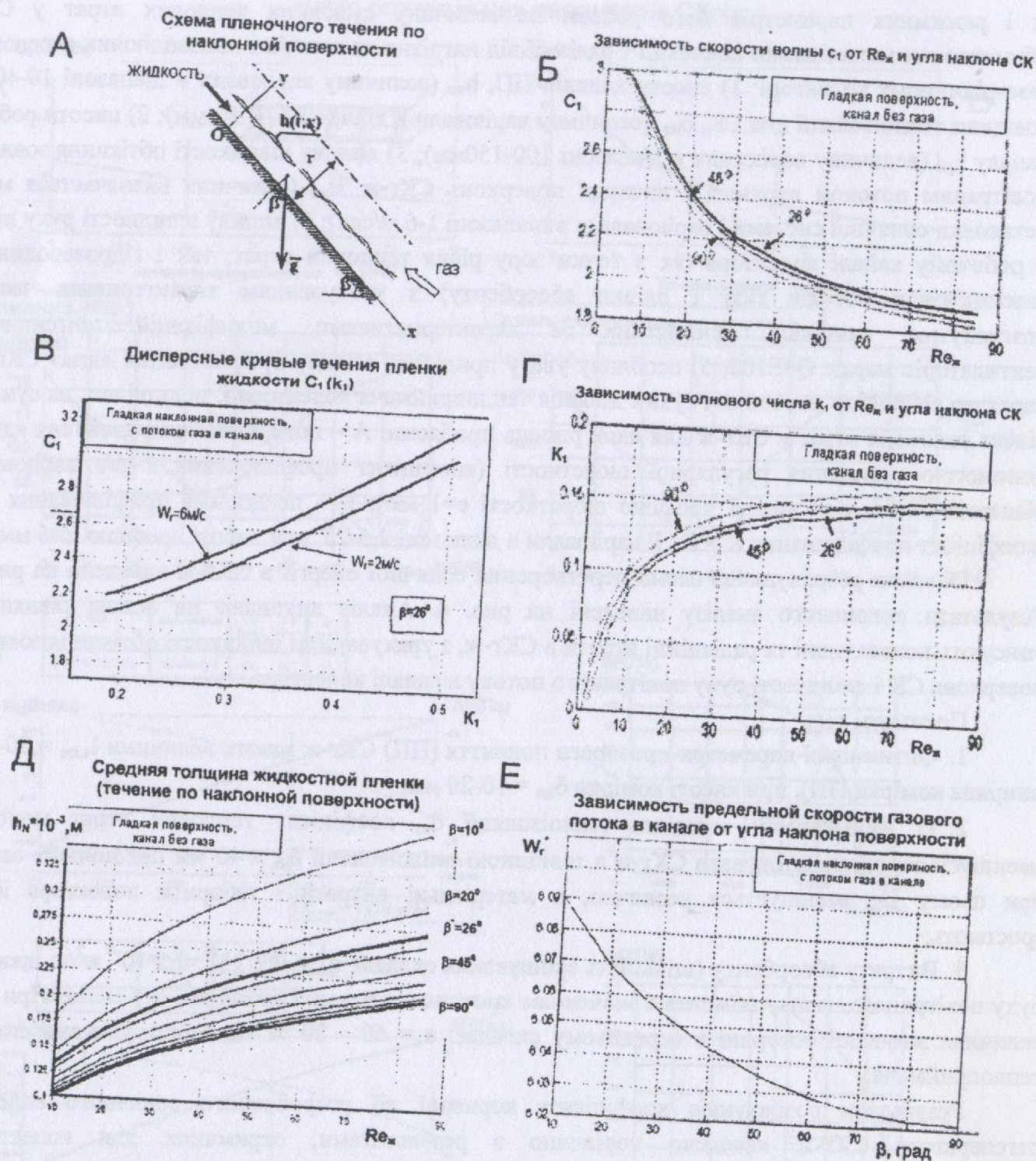


Рис. 3. Результаты теоретического дослідження течії плівки рідини по нахилій поверхні СКГ-ж.

А – схема течії плівки рідини по похилій поверхні СКГ-ж;

Б – залежність фазової швидкості хвилі від  $Re_{ж}$  і кута нахилу поверхні СКГ-ж;

В – дисперсні криві плівкової течії по похилій поверхні СКГ-ж (залежність фазової швидкості хвилі  $c_1$  від хвильового числа  $k_1$ ) для кута нахилу  $\beta = 26^\circ$ , коли число Рейольдса  $Re_{ж} = 50$ ;

Г – залежність хвильового числа від  $Re_{ж}$  і кута нахилу поверхні СКГ-ж;

Д – залежність середньої товщини плівки рідини від  $Re_{ж}$  і кута нахилу поверхні СКГ-ж;

Е – залежність граничної швидкості газу  $w_{г*}$  в каналі СКГ-ж від кута нахилу його поверхні.



**Четвертий розділ** присвячений аналізу впливу характеристик основних компонентів СКГ-ж і режимних параметрів його роботи на величину сумарних теплових втрат у СКГ-ж, обумовлених механізмами конвекції і радіації від нагрітих елементів і взаємодіючих середовищ в газо-рідинному колекторі: 1) висоти каналів ПП,  $h_{пп}$  (величину варіювали в діапазоні 10-40 мм); товщини теплоізоляції дна СК,  $\delta_{из}$  (величину варіювали в діапазоні 10-50 мм); 2) висоти робочого каналу  $h_{рк}$  (величину варіювали в діапазоні 100-150мм); 3) впливу швидкості обтікання зовнішнім повітряним потоком верхньої і нижньої поверхонь СКГ-ж  $w_{ив}$  (величина визначається місцем установки сонячної системи і варіювалася в діапазоні 1-6 м/сек); 4) впливу швидкості руху повітря в робочому каналі колектора (як з точки зору рівня теплових втрат, так і гідроаеродинаміки взаємодіючих потоків газу і плівки абсорбенту) з урахуванням характеристик чотирьох розглянутих, найбільш прийнятних за характеристиками, модифікацій тангенціальних вентиляторів марки Q4E100; 5) особливу увагу приділено впливу профілювання «дна» СКГ-ж на характер розподілу змочених і сухих ділянок теплоприймача колектора і, відповідно, на сумарний рівень теплових втрат у СКГ-ж для двох рішень проблеми: А – поперечне профілювання «дна» за допомогою нанесення регулярної шорсткості (коефіцієнт профілювання  $k=p/e$  варіювали в діапазоні 10-75, при висоті профілю шорсткості  $e=1$  мм); Б – поздовжнє профілювання «дна» (коефіцієнт профілювання  $K = P / E$  варіювали в діапазоні 2,5-25, при висоті профілю  $E=6$  мм).

Основна розрахункова схема перетворення сонячної енергії в СКГ-ж наведена на рис. 2А. Результати виконаного аналізу наведені на рис. 4. Аналіз виконано на основі рівнянь, що описують конвективні та радіаційні втрати в СКГ-ж, з урахуванням швидкості обтікання зовнішніх поверхонь СК і швидкості руху повітряного потоку в каналі колектора.

Показано, що:

1. Оптимальні параметри прозорого покриття (ПП) СКГ-ж мають величини  $l_{к.пп} = 20-30$  мм (ширина комірки ПП), при висоті комірки  $\delta_{пп} = 10-20$  мм;

2. Із збільшенням товщини теплоізоляції  $\delta_{из}$  коефіцієнт теплових втрат монотонно зменшується; використовувати СКГ-ж з товщиною теплоізоляції  $\delta_{из} > 40$  мм недоцільно, оскільки при цьому  $U_{\Sigma}$  зменшується незначно, а матеріальні витрати і габарити колектора істотно зростають;

3. Витрату абсорбенту (щільність зрошування складає  $q_{ж} = 0,2 \cdot 10^{-4} - 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ; швидкість руху повітряного потоку обмежена значенням критичного навантаження  $w_{г}^* = 5 \text{ м/сек}$ . При цьому величина змоченої поверхні в середньому складає:  $a = 60 - 80 \%$  від конструктивної поверхні теплоприймача;

Результати розрахунків коефіцієнта корисної дії розробленого сонячного колектора-регенератора СКГ-ж наведено порівняно з результатами, отриманих для колектора з теплоприймача плоского типу по роботі (Renewable Energy 31 (2006) 1073-1088). Профілювання "дна" теплоприймача колектора підвищує ефективність його роботи.

Виконаний цикл експериментальних досліджень, присвячених тепломасообміну при десорбції водяної пари з розчину абсорбенту в сонячному колекторі-регенераторі. Результати досліджень зміни вологості повітря в СКГ-ж від приведеної концентрації розчину і вологості зовнішнього повітря показано на рис. 5. Видно, що із зростанням початкового вологості ефективність десорбції знижується. Профілювання "дна" теплоприймача колектора підвищує ефективність його роботи, причому коефіцієнт корисної дії при поздовжньому профілюванні вище, ніж при поперечному профілюванні, що видно з даних, приведених на рис. 5Б, 5Г, 5Д.



## Вибір оптимальних параметрів СКг-ж

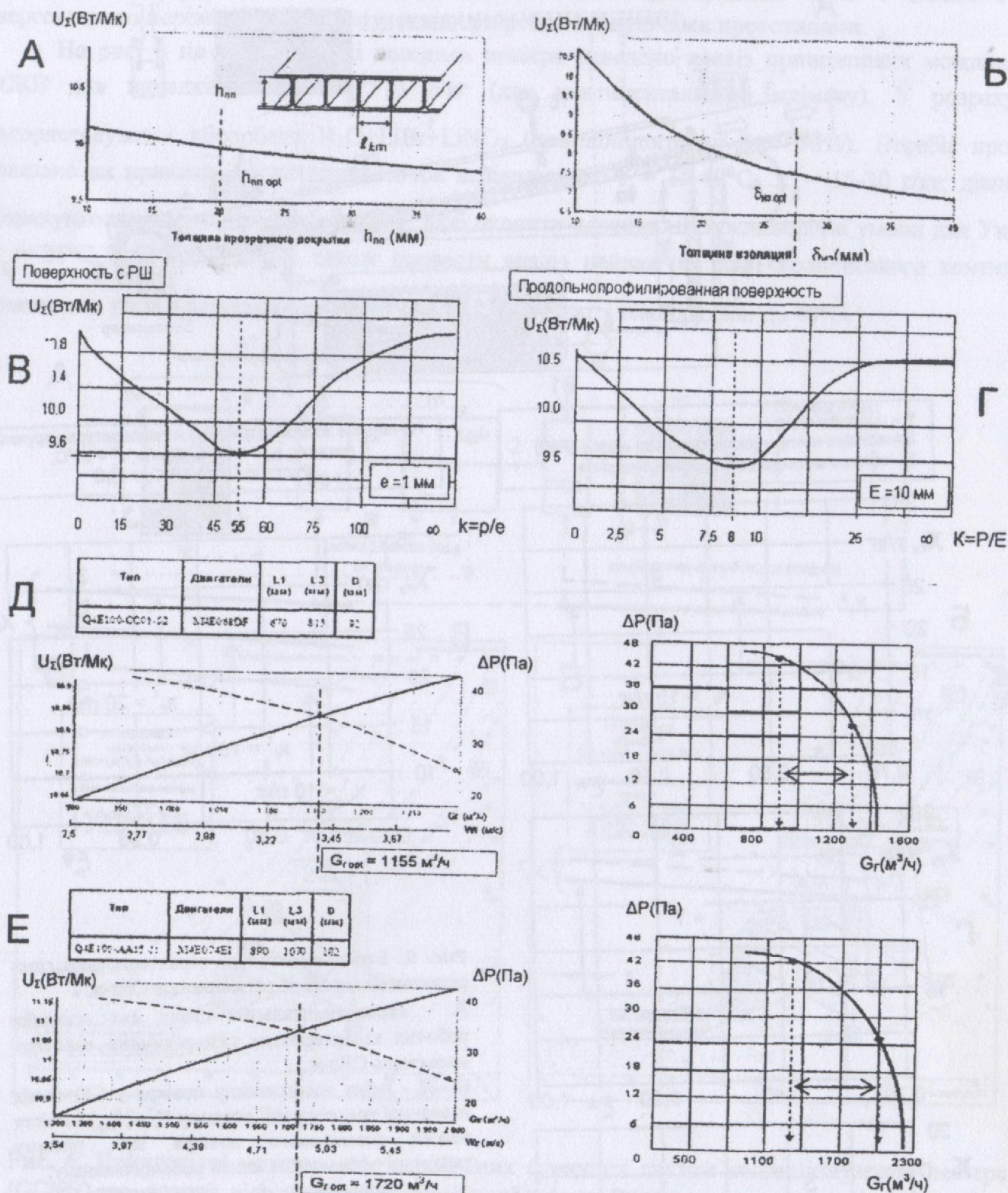
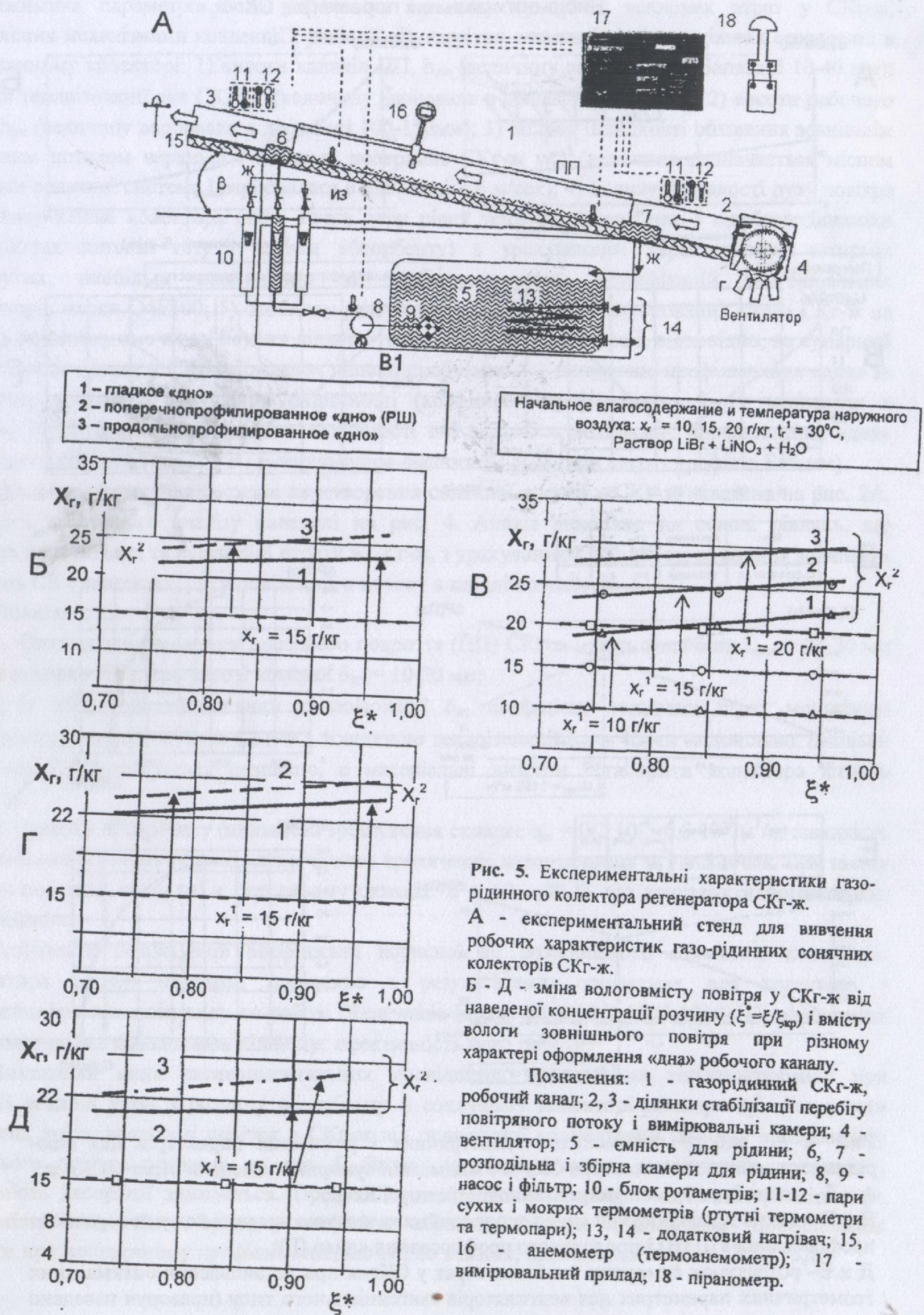


Рис. 4. До вибору оптимальних геометричних і режимних параметрів для газорідинного сонячного колектора СКг-ж з мінімізації сумарних теплових втрат у СКг-ж. А и Б – вплив  $h_{пп}$  і  $\delta_{из}$  на сумарні теплові втрати у СКг-ж; В и Г – вплив профілювання «дна» теплоприймача шляхом надання йому поперечного профілювання РШ (В) і продольного профілювання «дна» (Г); Д и Е – розрахунок сумарних теплових втрат у СКг-ж при встановлених оптимальних геометричних параметрах для вентиляторів тангенціального типу (праворуч наведено характеристики вентиляторів і виділений робочий діапазон навантажень).

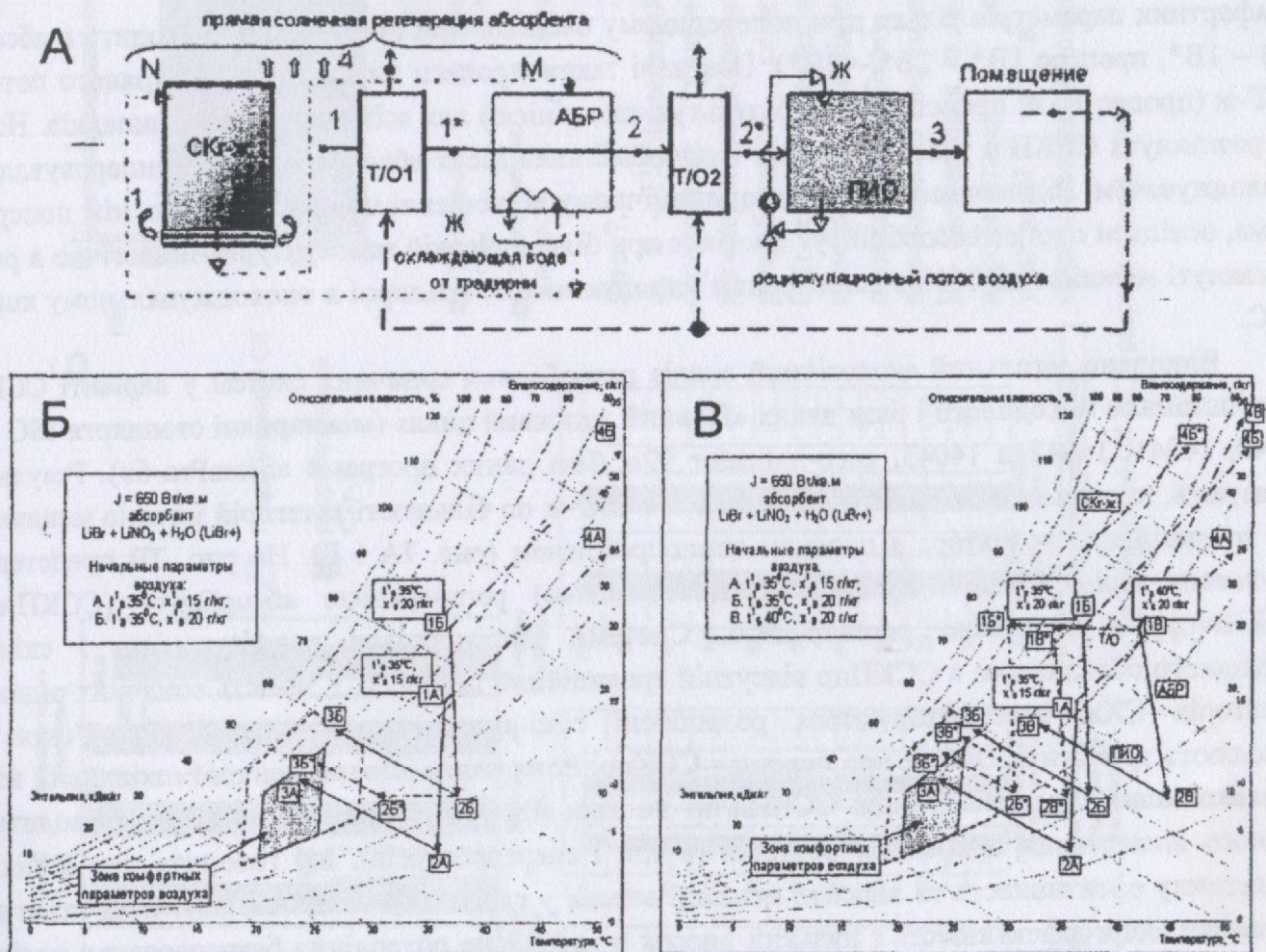






П'ятий розділ присвячений інженерним рішенням, розробці сонячних систем, включаючи апаратне оформлення, аналізу можливостей систем у варіантах СХС і ССКП і енергетичного порівняльного аналізу нових розробок з існуючими прототипами.

На рис. 6 на Н-Т діаграмі вологого повітря наведено аналіз принципів можливостей ССКВ для випадків, коли  $x_g^1 > 13$  г/кг (для континентального клімату). У розрахунках використовувався абсорбент  $H_2O + LiBr + LiNO_3$  (при концентрації  $\xi = 70\%$ ). Перебіг процесів показано на прикладі характерних точок в діапазонах:  $t_g = 35-40^\circ\text{C}$ ,  $x_g = 15-20$  г/кг; діапазони розрахункових параметрів вибрані так, щоб охопити характерні середньорічні умови для України ( $t_g = 35^\circ\text{C}$ ,  $x_g = 15$  г/кг), а також провести аналіз найважчих для європейського континенту початкових умов з варіюванням вмісту води до 20 г/кг і температури до  $40^\circ\text{C}$ .



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

А - розрахункова схема ССКП; Б, В - процеси на Н-Т діаграмі вологого повітря для варіантів з включенням теплообмінника Т/О1 і теплообмінника Т/О2 відповідно.

Позначення: 1-2 - процес осушення повітря в абсорбері; 2-3 - процес випарного охолодження повітря в випарівальному охолоджувачі прямого типу (ПМО); 1-1\* - процес охолодження зовнішнього повітря перед абсорбером в теплообміннику Т/О1; 1-4 - процес зміни стану повітря в СКг-ж; 2-2\* - процес охолодження осушеного повітря після абсорбера в теплообміннику Т/О2 рециркуляційним (з приміщення) повітряним потоком.



На діаграмі показані процеси: 1-2 протікає з деяким зростанням температури осушеного повітря, що обумовлено задачею мінімізації енерговитрат на привід вентилятора технологічної градирні, що забезпечує охолодження абсорбера. Видно, що нагрівання повітря в процесі осушення із зростанням  $t_g$  і  $x_g$  все в більшій мірі відхиляється від ізотермічного.

Використання ПВО для зазначених початкових умов (точки 1А, 1Б) не забезпечує отримання комфортних параметрів і тому потрібно попереднє осушення повітря. Для умови 1А ( $t_g = 35^\circ\text{C}$ ,  $x_g = 15$  г/кг) система цілком забезпечує отримання комфортних параметрів, не вдаючись до попереднього охолодження повітря – процес 1А – 2А – 3А; для 1Б ( $t_g = 35^\circ\text{C}$ ,  $x_g = 20$  г/кг) ССКВ забезпечує гранично можливі, допустимі комфортні параметри; попереднє охолодження повітря в Т/О (1Б – 1Б\*) цілком забезпечує (процес 1Б\* – 2Б\* – 3Б\*) отримання комфортних параметрів; для 1В ( $t_g = 40^\circ\text{C}$ ,  $x_g = 20$  г/кг) система може забезпечити отримання комфортних параметрів тільки при попередньому охолодженні повітря, що надходить в абсорбер (1В – 1В\*, процес 1В\* – 2В\* – 3В\*). Показані також процеси зміни стану повітряного потоку в СКГ-ж (процес 1 - 4, представлений результуючою лінією) для всіх розглянутих випадків. На рис. 7Б розглянута ССКП з розташуванням теплообмінника після абсорбера, перед випаровувальним охолоджувачем. Відзначимо, що в термодинамічному відношенні це менш вигідно, ніж попередня схема, оскільки процес абсорбції тут протікає при більш високій температурі. Аналогічно в роботі розглянуті можливості СХС з включенням «продуктивної» градирні в охолоджувальну контури СХС.

Виконано загальний екологічний аналіз розроблених сонячних систем у варіанті ССКП з використанням методології і бази даних «Повний життєвий цикл» (міжнародні стандарти ISO (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043, «eco-indicator 99», база даних програми «SimaPro-6»). Результати показують, що екологічний вплив розробленого СКГ-ж по більшості категорій істотно менше, ніж для традиційного колектора з плоским теплоприймачем (рис. 7А і Б). На рис. 7В представлені результати для ССКП з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту (ССКПпр) і (ССКПн/пр) з непрямою регенерацією. Системи відрізняються конфігурацією і складом необхідного обладнання: в ССКПпр відсутній традиційний десорбер, і, замість сонячних рідинних колекторів СКж використовуються розроблені газо-рідинні колектори СКГ-ж. Результати дозволяють зробити висновок про перевагу ССКпр. Вона надає істотно менший шкідливий вплив на навколишнє середовище, ніж ССКПн/пр по всіх порівнюваних категоріях і призводить до меншого виснаження природних ресурсів (в т.ч. і енергоресурсів), що говорить про її більшу енергетичну ефективність та вносить менший внесок у глобальну зміну клімату. Слід зазначити, що висока енергоефективність і низький внесок в глобальне потепління безпосередньо пов'язані один з одним, оскільки найбільший внесок у зміну клімату вносять викиди  $\text{CO}_2$  від споживаної електроенергії. Вибір альтернативного обладнання за двома аналізованими критеріями (вплив на виснаження природних ресурсів і внесок в глобальне потепління) сприятиме реалізації закону України про енергозбереження та Кіотського протоколу (спрямованого на зниження емісії парникових газів). Загальний екологічний вплив для ССКПн/пр так само більше, ніж для ССКПпр, що ще раз підтверджує переваги останньої.

Альтернативна сонячна система кондиціонування повітря здатна забезпечити отримання комфортних параметрів повітря для будь-яких кліматичних умов земної кулі. У порівнянні з традиційними парокомпресійними системами кондиціонування повітря альтернативна система ССКП забезпечує значне зниження енерговитрат (на 30-60%), що підтверджується даними експлуатації аналогічних установок в світі.



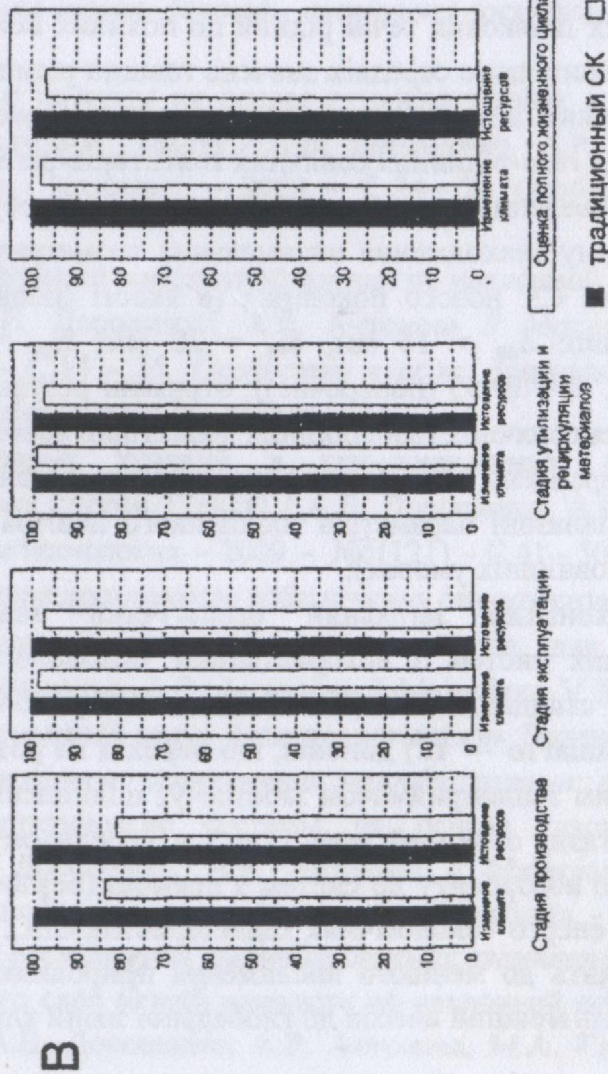
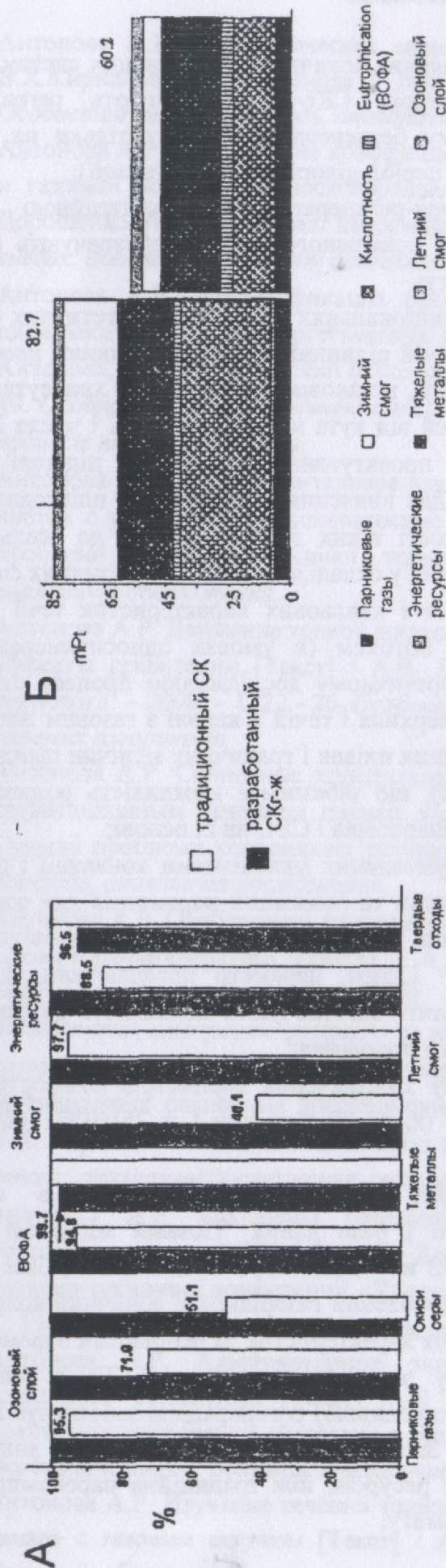


Рис. 7.

А, Б - Порівняльний аналіз впливу на навколишнє середовище традиційного сонячного колектора-регенератора [Renewable Energy 31 (2006) 1073-1088] і розробленого сонячного колектора-регенератора СКг-ж (теплоприймач з продольнопрофілюваною поверхнею, коефіцієнт профілювання  $K=8$ , висота профілю  $E=10\text{мм}$ ) при розрахунку на 1 ГДж виробленого системою тепла;

В - Порівняння екологічного впливу ССКВ на стадії виробництва, в період експлуатації, на стадії утилізації та в повному життєвому циклі порівнюваного обладнання для ССКВпр і ССКВн/пр.



## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблені схемні рішення багатофункціональних сонячних енергетичних систем (СХС, ССКП) на основі сонячних колекторів-регенераторів СКг-ж забезпечують регенерацію (відновлення концентрації) абсорбенту та підтримку безперервності циклу тільки на основі сонячної енергії, або переважно на її основі (до 70% у період цілорічної експлуатації);

2. Розроблені сонячні газо-рідинні колектори-регенератори з гравітаційною течією рідинних плівок абсорбенту та протилежним рухом повітряного потоку забезпечують процес десорбції вологи і відновлення концентрації абсорбенту;

3. Особистий інтерес для створення багатофункціональних сонячних енергетичних систем має теоретичне дослідження процесу гравітаційних течій рідинних плівок по похилим поверхнях СКг-ж, де кут нахилу визначається широтою місцевості, встановлення характеру хвилеутворення на поверхні рідинних плівок, дослідження залежностей від кута нахилу поверхні і числа  $Re_{ж}$ , та отримання необхідних формул для розрахунку і проектування СКг-ж; на підставі циклу теоретичних і експериментальних досліджень необхідне вивчення особливостей плівкових течій по похилим поверхнях, включаючи проблему стійкості таких течій, стосовно до реальностей роботи газо-рідинних сонячних колекторів-регенераторів у складі сонячних енергетичних систем;

4. Виведені рівняння для визначення товщини і хвильових характеристик течії плівки рідини по похилій поверхні в каналі з газовим потоком (в умовах односпрямованості і протivotочного течій газу та рідини) сприяють теоретичному дослідженню процесу стійкості гравітаційних плівкових течій рідини по похилих поверхнях і течій в каналі з газовим потоком і отриманню даних щодо середніх значень товщин рідинних плівок і граничних величин швидкостей руху повітряних потоків над їх поверхнею (5-6 м/с), що забезпечує можливість розрахунку і проектування газо-рідинних сонячних колекторів-регенераторів і СЕС на їх основі;

5. Проведений аналіз тепловтрат в СКг-ж, обумовлених механізмами конвекції і радіації вирішує задачу знаходження оптимальних геометричних та режимних параметрів для сонячних газо-рідинних СК нового покоління (в якості базових геометричних розмірів і співвідношень рекомендовано:  $\delta_{пл} = 15$  мм,  $\delta_{из} = 28$  мм,  $h_{рж} = 125$  мм, параметр профілювання  $k=p/e=8$  (продольне),  $K=P/E=55$  (поперечне)); отримані результати забезпечують можливість розрахунку і проектування сонячних газорідинних колекторів нового покоління;

6. Розроблена ССКП повністю вирішує задачу забезпечення параметрів комфортності в широкому діапазоні параметрів зовнішнього повітря ( $x_r$  до 20 г/кг, при  $t_r = 25-40^\circ\text{C}$ , тобто при найважчих зовнішніх умовах);

7. Виконаний загальний екологічний аналіз альтернативних рішень в області кондиціонувачів систем з використанням методології і бази даних "Повний життєвий цикл" (міжнародні стандарти ISO (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043, "eco - indicator 99", база даних програми "SimaPro — 12) доповів, що перехід на розроблений газорідинної сонячний колектор з профілюваним теплоприймачом забезпечує поліпшення характеристик за основними параметрами (парникові гази, озоновий шар і пр.) в середньому до 20 %; перехід від СЕС з непрямою регенерацією абсорбенту до систем з прямою (безпосередньою) регенерацією забезпечує істотне поліпшення енерго - екологічних характеристик СЕС. Застосування СЕС осушувально - випарного типу приводить до меншого виснаження природних ресурсів, ніж традиційна парокомпресійна СКП і вносить менший внесок до глобальної зміни клімату.



## ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Антонова А.Р. Математическое моделирование работы холодильных установок [Текст] / В.Х.Кириллов, А.Р. Антонова // Інформаційні системи і технології. – 2004. – С.20 - 22. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
2. Антонова А.Р. Определение коэффициента теплоотдачи между тонким слоем вязкой жидкости и газовым потоком в плоскопараллельной насадке плёночного охладителя. [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Інформаційні системи і технології. – 2005. – С.20 - 21. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
3. Антонова А.Р. Интенсификация процессов совместного тепломассообмена в аппаратах пленочного типа для энергетических и холодильных систем [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, С.Ю. Васютинский // Холодильная техника и технология. – 2006. – №4(109). – С.34 - 40. *Особистий внесок: висунення ідеї, обґрунтування запропонованих методів інтенсифікації процесів тепломасообміну.*
4. Антонова А.Р. Экспериментальное изучение пленочных течений по поверхности полимерных листов с регулярной шероховатостью [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології. – 2008. – С.26 - 28. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження.*
5. Антонова А.Р. Движение тонкой жидкой пленки на наклонной плоскости, которая реагирует на эффекты гравитации [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Інформаційні системи і технології. – 2008. – С.22 - 26. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
6. Антонова А.Р. Солнечные холодильные системы на основе газо-жидкостных коллекторов с гравитационным течением пленки жидкости [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології. – 2009. – С.24 - 26. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження.*
7. Антонова А.Р. Особенности волновых течений жидкостной пленки по наклонной поверхности коллектора-регенератора [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Моделирование и информационные технологии. – 2009. – С.14 - 15. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, створення програмного забезпечення для розрахунків.*
8. Антонова А.Р. Особенности пленочных течений в газо-жидкостных коллекторах-регенераторах солнечных абсорбционных систем [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, В.Х. Кириллов // Холодильная техника и технология. – 2009. – №5(121). – С.41 - 50. *Особистий внесок: аналітичні дослідження, створення програмного забезпечення для розрахунків.*
9. Антонова А.Р. Проблемы разработки газо-жидкостных коллекторов для солнечных холодильных систем [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Удосконалення малої хладотеплотехніки» Донецьк. – 2010. – С. 15-16. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
10. Антонова А.Р. Альтернативные энергетические системы на основе газожидкостного солнечного коллектора [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Матеріали науково-практичної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв. – 2010. – С. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
11. Антонова А.Р. Изучение течения тонкого слоя вязкой жидкости по наклонной поверхности в канале с газовым потоком [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, М.А. Глауберман // Научный сборник «Физика аэродисперсионных систем». – 2011. – Вып. 48. – С. 25 - 34.

V018547



*Особистий внесок: аналітичні дослідження, створення програмного забезпечення для розрахунків.*

12. Антонова А.Р. Альтернативные энергетические системы на основе газо-жидкостных солнечных коллекторов-регенераторов [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, М.А. Глауберман // Научный сборник «Физика аэродисперсионных систем». - 2011. - Вып. 48. - С. 35 - 44. *Особистий внесок: аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
13. Антонова А.Р. Экспериментальне дослідження плівкових течій рідини в газорідинному сонячному колекторі [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Матеріали V Міжнародної науково-техничної конференції «Удосконалення малої хладотеплотехніки» Донецьк. - 2012. - С. 43-50. *Особистий внесок: доповідь, аналітичні дослідження.*
14. Антонова А.Р. Газожидкостные солнечные коллекторы для альтернативных холодильных систем. [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Матеріали Міжнародної науково-техничної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». - 2012. - С.17-18. *Особистий внесок: доповідь, висунення ідей, обґрунтування запропонованих схемних рішень.*
15. Антонова А.Р. Многофункциональные альтернативные энергетические системы на основе газожидкостных солнечных коллекторов [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // "Problemele energeticii regionale" Кишинев. - 2012. - №3(20). - С.38 - 45. *Особистий внесок: висунення ідей, обґрунтування запропонованих схемних рішень.*
16. Антонова А.Р., Кириллов В.Х. Теоретическое экспериментальное изучение пленочных течений в теплообменных аппаратах (испарительных охладителях, газо-жидкостных солнечных коллекторах-регенераторах) энергетических систем [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, В.Х. Кириллов // Холодильная техника и технология. - 2013. - №2(142). - С.20 - 28. *Особистий внесок: аналітичні дослідження, розробка окремих алгоритмів.*
17. Антонова А.Р. Экспериментальное исследование теплообменной аппаратуры осушительного и охладительного контуров [Текст] / А.Р. Антонова // Матеріали Міжнародної науково-техничної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». - 2013. - С.48. *Особистий внесок: аналітичні експериментальні дослідження, створення програмного забезпечення для розрахунків.*
18. Антонова А.Р., Дорошенко А.В. Разработка солнечных холодильных систем, коллекторов - регенераторов и теплообменных аппаратов [Текст] / А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова // Матеріали науково-практичної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв. - 2013. - С.45. *Особистий внесок: доповідь, висунення ідей, обґрунтування запропонованих схемних рішень.*

## АННОТАЦИЯ

**Антонова А.Р. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов в газо-жидкостных солнечных коллекторах-регенераторах альтернативных холодильных систем. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2014.

Диссертация посвящена развитию научных и инженерных основ создания многофункциональных солнечных энергетических систем с использованием методов испарительного охлаждения сред. Показано, что для СЭС в основных вариантах использования



СХС и ССКВ наиболее перспективно включение испарительных охладителей в состав осушительно-испарительных систем на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента. Это позволяет упростить конфигурацию солнечной системы путем устранения десорбера-регенератора и снизить энергозатраты, поскольку традиционный десорбер, и солнечная система нагрева теплоносителя здесь заменяется солнечным коллектором - регенератором абсорбента.

Разработаны схемные решения солнечных холодильных (СХС) и кондиционирующих систем (ССКВ) на основе газо-жидкостных солнечных коллекторов-регенераторов СКГ-ж (прямая регенерация абсорбента), что позволяет создать автономную солнечную многофункциональную систему жизнеобеспечения. Новое поколение СКГ-ж, являясь, в отличие от традиционных СК, тепломассообменным аппаратом, обеспечивает восстановление концентрации абсорбента и поддержание непрерывности цикла на основе солнечной энергии, обеспечивающей подвод необходимого тепла для регенерации абсорбента, гравитационно стекающего в виде жидкостной пленки по поверхности теплопремника СКГ-ж.

Выполнено теоретическое и экспериментальное изучение волновых процессов при течении жидкостных пленок по вертикальным и наклонным поверхностям солнечных систем, включая вопросы толщины жидкостной пленки, устойчивости течения пленки жидкости (как гравитационного, так и при противоточном взаимодействии в газовом потоке в рабочем канале СКГ-ж). Выполнено математическое моделирование процессов трансформации солнечной энергии в СКГ-ж, где тепловые потери обусловлены механизмами конвекции и радиации нагретых элементов СКГ-ж, а также экспериментальное изучение процесса восстановления абсорбента (изменения влагосодержания воздуха в десорбере) в зависимости от приведенной концентрации раствора абсорбента  $\xi^*$  (отношение рабочей концентрации к предельно возможной, соответствующей линии кристаллизации раствора) и температуры наружного воздуха, а также влияние различных вариантов профилирования поверхности течения на тепловые потери нагретых элементов СКГ-ж.

Выполнено моделирование процессов совместного тепломассопереноса в процессе регенерации абсорбента в солнечном коллекторе-регенераторе. В качестве абсорбента рекомендован раствор  $\text{LiBr} + (\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3)$ , предпочтительный с точки зрения достигаемой степени осушения воздуха и требуемой температуры регенерации абсорбента, а также надежности эксплуатации.

Разработанная СЭС решает задачи обеспечения параметров комфортности во всем рассмотренном диапазоне параметров наружного воздуха (до  $x_r = 20$  г/кг, при  $t$  до  $40^\circ\text{C}$ , то есть при самых тяжелых внешних условиях), при этом температура десорбции не превышает  $60-70^\circ\text{C}$ . Выполнен экологический анализ альтернативных решений с использованием методологии «Полный жизненный цикл» (Life Cycle Assessment, международные стандарты ISO (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043, «eco-indicator 99», база данных программы «SimaPro-6»). Разработанная система прямой регенерации оказывает существенно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, приводит к меньшему истощению природных ресурсов (в т.ч. и энергоресурсов) и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата.

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



## АНОТАЦІЯ

**Антонова А.Р. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів в газорідинних сонячних колекторах-регенераторах альтернативних холодильних систем. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2014.

Дисертація присвячена розвитку наукових та інженерних основ створення багатофункціональних сонячних енергетичних систем (СЕС) з використанням методів випарного охолодження середовищ. Показано, що для СЕС в основних варіантах використання сонячних холодильних (СХС) і кондиціонуючих систем (ССКП) найбільш перспективно включення випарних охолоджувачів до складу осушувально - випарних систем на основі тепловикористовуючого абсорбційного циклу з прямою (безпосередньою) регенерацією абсорбенту. Це дозволяє спростити конфігурацію сонячної системи шляхом усунення десорбера - регенератора, знизити енерговитрати і створити автономну сонячну багатофункціональну систему життєзабезпечення..

Виконано теоретичне і експериментальне вивчення хвильових процесів при перебігу рідинних плівок по вертикальних і похилих поверхнях сонячних систем, включаючи питання товщини рідинної плівки, стійкості течії плівки рідини (як гравітаційного, так і при протиточному взаємодію в газовим потоком в робочому каналі СКг-ж).

Виконано моделювання процесів спільного тепломасопереносу в процесі регенерації абсорбенту в сонячному колекторі - регенераторі. Розроблена СЕС вирішує завдання забезпечення параметрів комфортності в усьому розглянутому діапазоні параметрів зовнішнього повітря.

Розроблена система прямої регенерації надає істотно менший шкідливий вплив на навколишнє середовище, призводить до меншого виснаження природних ресурсів та вносить менший внесок у глобальну зміну клімату.

**Ключові слова:** сонячна система, колектор-регенератор, абсорбція-десорбція, випарне охолодження, тепломасообмін, повітроохолоджувач, градієнт, екологічний вплив.

## SUMMARY

**Antonova A.R. Theoretical and experimental study of processes in gas-liquid solar collectors, regenerators alternative refrigeration systems. - Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and industrial power. - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2014.

The dissertation is devoted to the development of scientific and engineering principles of developing multi-functional solar energy systems (SES) using methods of evaporative cooling media. It is shown that for SES in major ways to use in system of solar refrigeration (SRS) and solar kondytsyonnyyushchyh systems (SKS) most promising include evaporative cooling of the drainage - evaporative systems based on waste heat absorption cycle with direct (immediate) regeneration of the absorbent. This helps simplify the configuration of the solar system by removing desorbera - regenerator and reduce energy consumption.



A schematics of solar refrigeration (SRS) and solar kondytsyonyruiyuschyh systems (SKS) based on gas - liquid solar collectors - regenerators (direct regeneration of absorbent), which lets you create stand-alone solar multifunction life-support system.

Theoretical and experimental study of wave processes in the flow of liquid films on vertical and inclined surfaces of the solar system, including the question of the thickness of the liquid film flow stability of a liquid film (both gravitational and interaction with countercurrent to the gas flow in the working channel gas - liquid solar collectors).

Modeling of common processes teplomassoperenosa during regeneration of the absorbent in the solar collector - the regenerator. Designed solar system solves the problem of providing comfort settings throughout the considered range of outdoor air.

The developed system provides direct regeneration significantly less harmful impact on the environment, resulting in less depletion of natural resources and makes less contribution to global climate change.

**Keywords:** solar system, collector-regenerator, absorption-desorption, evaporative cooling, heat and mass transfer, air-cooler, cooler, environmental impact.