

Автореферат  
Т33

ОДЕСЬКИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ І ЕНЕРГЕТИКИ

На правах рукопису

ТЕНЯКОВ ІГОР ЕДУАРДОВИЧ

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОФАЗНИХ КОНТУРІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ  
ІЗ СТРУМІННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.

Спеціальність 05.14.05-теоретичні основи теплотехніки

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук.

XV 1012

Інститут холода  
ОНАХТ  
бібліотека

Одеса - 1993р.

Робота виконана в Харківському авіаційному інституті  
ім. М. Е. Жуковського.

Науковий керівник: доктор технічних наук,  
доцент Горбенко Г. О.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор Смирнов Г. Ф.  
кандидат технічних наук,  
с. н. с. Ботук Ю. С.

Ведуча організація - Інститут проблем машинобудування  
АН України

Захист відбудеться "29" XI 1993р. об 11 годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради К. 068. 27. 01 при Одеському  
інституті низькотемпературної техніки і енергетики за адресою:  
270100, Україна, м. Одеса, вул. Петра Великого, 1/3 - вчена рада  
ОІНТЕ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОІНТЕ.

Автореферат розіслано "29" XI 1993р.

...ий секретар  
...зованої ради К. 068. 27. 01  
...нічних наук, професор

Нікульшин Р. К.

1993 р.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. У системах відводу тепла і термостабілізації технологічного обладнання, енергетичних установок, діореакторів, приладів, ЕОМ, у системах кондиціонування жилих приміщень та терморегулювання космічних апаратів використовуються контури теплопереносу. Використання у контурах двофазного теплоносія замість однофазного дозволяє істотно знизити витрати теплоносія, зменшити потужність прокачувального приладу, збільшити інтенсивність тепловіддачі при кипінні та конденсації, зменшити різницю температур між джерелом і стоком тепла, підвищити точність термостабілізації об'єктів. Створення двофазних контурів теплопереносу (ДФК) доцільно для об'єктів з більшим тепловиділенням (десятки та сотні кВт) і значною відстанню теплопереносу (десятки та сотні метрів).

Перспективним напрямком стає створення термоциркуляційних контурів (ТЦК) - пасивних контурів теплопереносу, циркуляція теплоносія в яких здійснюється за допомогою прямого термодинамічного циклу. Такі контури не потребують для свого функціонування сторонніх джерел енергії, володіють підвищеною автономністю. Для прокачування теплоносія в ТЦК можуть використовуватися капілярні, осмотичні, струминні та інші типи насосів, які не мають рухомих частин і здатні перекачувати насичений та малонеогрітий теплоносій. Це дозволяє утворити високоресурсні, надійні контури теплопереносу.

При розробці ДФК з'являються специфічні завдання: усунення кавітації прокачувальних приладів, розподіл двофазного потоку по паралельних каналах, сепарація фаз, запуск контура з будь-якого теплового стану, вибір оптимальних способів та приладів регулювання та інше. Необхідно розробити нові багатофункціональні вузли, які істотно розширюють можливості конструювання ДФК різного призначення.

Зв'язок дисертації з позначеними науково-технічними завданнями визначає її актуальність.

Мета роботи: розробка методу розрахунку характеристик струминного сепараційного парорідинного насосу (СПРН) як багатофункційного елемента контурів з двофазним теплоносієм, розробка методу, який дозволяє моделювати процеси в пасивному струминному роздільнику двофазного потоку; експериментальне об-

грунтування роботоспроможності альтернативних схем контурів теплопереносу із струминним сепараційним насосом та інжектором-конденсатором (ІК); розрахунково-теоретичне обґрунтування роботоспроможності та ефективності перспективних схем контурів з струминними насосами для біотехнологічної установки та системи терморегулювання (СТР) космічного апарату (КА).

При виконанні роботи автором одержані слідуючі нові наукові результати, які вносяться на захист:

- експериментальні дані по дослідженню на фреонах струминного сепараційного парорідинного насосу як багатофункціонального елемента контурів теплопереносу; методика розрахунку напірних та тепломасообмінних характеристик насосу;

- методика математичного та фізичного моделювання пасивного струминного роздільника двофазного потоку, результати його експериментального дослідження;

- дослідні характеристики контурів теплопереносу з струминним сепараційним насосом на фреоні-114 та інжектором-конденсатором на суміші фреон-113+ТЕМП, результати їх порівняльного аналізу з розрахунково-теоретичними даними;

- математичні моделі перспективних схем контурів теплопереносу з струминним сепараційним парорідинним насосом для системи терморегулювання космічного апарату та систем термостабілізації біотехнологічної установки; рекомендації по складу та компоновці, роботоспроможності, геометрії регулюючого органу.

Наукове положення. Струминні елементи-струминний сепараційний насос, інжектор-конденсатор, струминний роздільник двофазового потоку можуть використовуватись як багатофункціональні вузли двофазних контурів теплопереносу, розширючі можливість синтезу нових схем. Визначені експериментальними та розрахунково-теоретичними методами характеристики струминних елементів та контурів показують доцільність установки цих елементів в контури теплопереносу систем терморегулювання. При цьому розширюється діапазон працездатності контурів, з'являється можливість пасивного терморегулювання об'єктів, підвищується надійність функціонування контурів на граничних теплових навантаженнях.

Практична цінність та реалізація результатів. На основі власних експериментальних досліджень СПЖН на фреонах дороблено математичну модель струминного сепараційного насосу, що дозволяє достовірно розраховувати його напірні та тепломасообмінні ха-

рактеристики. Математична модель насоса інтегрована в математичну модель контура, апробована при порівнянні розрахункових та експериментальних характеристик контурів з струминними насосами. В ході експериментів з контурами на фреонах отримано рекомендації по їх регулюванню та поліпшенню характеристик. Ці результати дозволили прогнозувати ефективність застосування термоциркуляційних контурів з струминним сепараційним насосом для термостабілізації космічної станції та біотехнологічної установки.

Автором запропонована конструкція струминного пасивного роздільника двофазного потоку, методика його фізичного та математичного моделювання. Роздільник доцільно встановлювати в місцях розгалуження двофазного потоку перед сіткою паралельних теплообмінників: випарників або конденсаторів.

Методики, математичні моделі, рекомендації по використанню струминних насосів, роздільника та термоциркуляційних контурів використані при проектуванні систем терморегулювання космічних станцій УКП та МИР-2 в НВО "Енергія" ім. С.П.Корольова, при розробці технічних пропозицій по термостабілізації біотехнологічної установки для високотемпературної переробки стоків тваринництва та птахівництва.

Достовірність та обґрунтування запропонованих в роботі математичних моделей, методик, рекомендацій підтверджується побудовою математичних моделей на основі фундаментальних законів збереження, порівнянням розрахункових результатів з власними дослідними даними по роботі СПЖН, ТЦК та роздільника потоку на робочих тілах повітря-вода, фреон-113, фреон-114, суміші фреона та антифризу.

По темі дисертації опубліковано 4 друковані праці. Результати роботи використані для напису 5 науково-технічних звітів та монографії.\*

Основні наукові та прикладні результати роботи пройшли апробацію на 8-ій Всесоюзній конференції "Двофазний потік в енергетичних машинах та апаратах" (Ленінград, 1990р.); Всесоюзному

---

\* Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. -М.: Центр НТИ "Поиск". Сер.: Ракетно-космическая техника, машиностроение, 1991. -302с.

семинарі-наradі "Системи терморегулювання з двофазним теплоносієм для космічних апаратів" (Крим, 1991р.); на науково-технічних семінарах кафедри Теплофізичних основ двигунобудування ХАІ в 1986 ... 1993р.р.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з вступу, п'яти розділів, закінчення, одного додатка. Основний зміст роботи викладено на 186 сторінках машинописного тексту, включаючи 66 малюнків та 13 таблиць, списку літератури з 80 найменувань, всього 219 сторінок.

#### Зміст роботи.

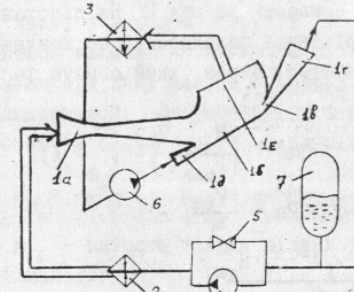
У першому розділі аналізується стан розробок контурів теплопереносу з двофазним теплоносієм. Як додаток розглядаються системи терморегулювання космічних апаратів. Виділяються задачі, які необхідно вирішувати на шляху створення ДФК незалежно від типу технічних додатків. Серед них відмічаються: математичне та фізичне моделювання СПЖН як багатофункціонального елемента ДФК; створення нової елементної бази (пасивного струминного роздільника двофазового потоку); розробка математичних моделей нових елементів; виробка пропозицій по засобам регулювання ТЦК та зниження різниці температур у межах контура.

У другому розділі проведено аналіз результатів по дослідженню струминного сепараційного насоса, визначені задачі його подальшого дослідження як багатофункціонального елемента ДФК.

Принцип дії СПЖН зрозуміло з мал.1. Двофазовий потік розганяється в соплі 1а та сепарується в відцентрованому сепараторі 1б. Високошвидкісний потік відсепарованої рідини з незначною місткістю пару відновлює тиск в дифузорі 1г, і тим самим забезпечується прокачка теплоносія через випарний теплообмінник 2 на вході в двофазне сопло СПЖН. Пар, який попав на вихлоп 1е, конденсується в холодильнику 3 і з допомогою додаткового насоса 6 повертається в СПЖН через сопло 1д. В рамках концепції ТЦК існують схеми, в яких повернення конденсата в сепараційний насос здійснюється за допомогою рідинно-рідинного інжектора, капілярного або осмотичного насосів.

СПЖН в двофазних контурах може виконувати функцію змішувального теплообмінника. Інтенсивні тепломасообмінні процеси протікають в сепараторі СПЖН поміж двофазним середовищем та перохолодженим конденсатом. Для підтвердження цього факту були

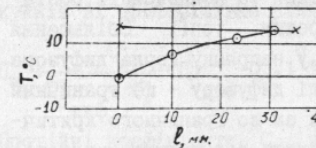
Термоциркуляційний контур із струминним сепараційним насосом



1 - СПЖН; 1а - сопло; 1б - сепаратор; 1в - захоплювач шліна; 1г - дифузор; 1д - сопло реінжекції; 1е - вихлоп; 2 - випарник; 3 - конденсатор; 4 - пусковий насос; 5 - клапан; 6 - допоміжний насос; 7 - гідроакумулятор.

Мал. 1.

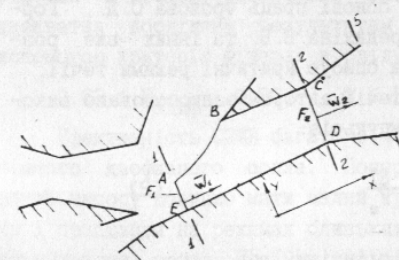
Розподіл температури по довжині сепаратора



x - температура насичення  
o - температура відсепарованої рідини.

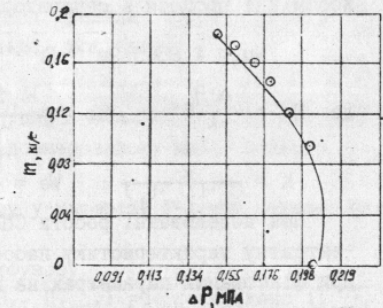
Мал. 2.

До вибору контрольного об'єму.



Мал. 3.

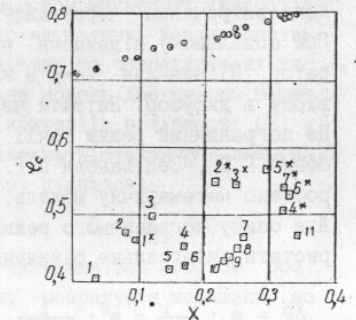
Дограничний режим течії в дифузорі СПЖН.



o - експеримент; — - розрахунок.

Мал. 4.

Залежність коефіцієнту швидкості сопла від початкового паровмісту.



□ - експеримент; o - теорія.

Мал. 5.

проведені експерименти по заміру температури відсепарованої рідини при наявності температурного напору між конденсатом та двофазним потоком. Результати показані на мал.2. На підставі власних дослідних даних та критеріальних залежностей по конденсації пара на струменях, пропонується вираз, який описує теплообмінні процеси в сепараторі:

$$Nu = 4,8545 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot K^{0,1} \cdot We^{0,4} \cdot \left( \frac{H_{pe}}{l_{cen}} \right)^{0,8}, \quad (1)$$

$$\text{де } Nu = \frac{\alpha \cdot H_{pe}}{\lambda_1}; \quad Re = \frac{W_1 \cdot H_{pe}}{\nu_1}; \quad Pr = \frac{\nu_1}{a_1};$$

$$K = \frac{R}{C_1 \cdot (t_v - t_1)}; \quad We = \frac{(w_v - w_1)^2 \cdot \rho_v \cdot H_{pe}}{\sigma_1};$$

При моделюванні роботи СПЖН необхідно розраховувати напірно-витратну характеристику насоса у всьому діапазоні зміни витрат. При фіксованих параметрах на вході в сопла 1а, 1д та постійному тиску на вихлопі 1е тиск за дифузorzом СПЖН 1г визначається режимом течії через дифузorz. Якщо протитиск сіті за дифузorzом насоса невеликий, то "стрибок" стиснення та конденсації розташований у дифузorzі. Це - критичний режим течії. Збільшення протитиску веде до зміщення "стрибка" у напрямку горла дифузorzа 1в. Якщо "стрибок" розташований в горлі дифузorzу - це граничний критичний режим. На критичних режимах аж до граничного критичного витрачання через дифузorz не залежить від протитиску сіті. При подальшому підвищенні протитиску "стрибок" виходить в сепаратор. Підвищення тиску в відсепарованій рідині відбувається до входу в дифузorz. Витрати через дифузorz визначаються протитиском. Це дограничний режим течії. На основі праць Фролова С.Д., Горбенко Г.О., Селіванова В.Г., Бредихіна В.В. та інших вже розроблено математичну модель, яка описує критичні режими течії. Для опису дограничного режиму течії автором запропоновано використати інтегральне рівняння імпульсів:

$$\Delta P = m_2 \cdot \frac{w_1}{F_2} - m_2^2 \cdot \frac{1}{\rho_1 \cdot F_2^2} + \frac{\Delta l}{F_2}, \quad (2)$$

$$\text{де } \Delta l = \int_{(A-B)} [(P-P_1) \cdot \cos(\vec{n} \cdot \vec{x}) + \rho \cdot |w_n| \cdot w_x] \cdot dx$$

$\Delta P$  - перепад тиску на дифузorzі;

$m_2$  - витрати теплоносія через дифузorz;

$w_1$  - швидкість потоку в перерізі 1-1 (див. мал.3).  
Вибір контрольного об'єму показано на мал.3. Всі ефекти, які зв'язані з виходом "стрибка" в сепаратор, в рівнянні (2) враховуються величиною інтеграла  $\Delta l$ . Було проаналізовано змінні величини від яких залежить інтеграл  $\Delta l$ , виключено незначні, а із залишившихся, використовувачи формальні правила теорії розмірностей та подібності, складено критерії подібності:

$$P_{m_2} = \frac{m_2}{m_{1,1}}; \quad P_{\Delta l} = \frac{\Delta l}{m_{1,1} \cdot w_1}; \quad P_{\delta_{\text{диф}}} = \frac{\delta'_{\text{шару}}}{\delta_{\text{диф}}}, \quad (3)$$

де  $m_{1,1}$  - витрати тільки рідини у відсепарованому шарі (переріз 1-1 мал.3);

$\delta'_{\text{шару}}$  - товщина відсепарованого шару у перерізі 1-1 при нульовому паротримуванні;

$\delta_{\text{диф}}$  - висота захоплючої щілини дифузorzу.

Для визначення залежності  $F(P_{m_2}, P_{\Delta l}, P_{\delta_{\text{диф}}}) = 0$  досліджено її асимптотики при наблизенні критеріїв до границі області визначення. В результаті зконструйовано та запропоновано для розрахунків  $\Delta l$  критеріальне рівняння:

$$P_{m_2} + \frac{C_1^2}{P_{\delta_{\text{диф}}}^2 + C_2^2} \cdot (P_{\delta_{\text{диф}}} \cdot P_{\Delta l})^{C_3} = \frac{1,004/\pi \cdot (\pi/2 - \text{arctg}(C_4 \cdot P_{\delta_{\text{диф}}}^{-C_5} / P_{\delta_{\text{диф}}}))}{\exp[(C_6 \cdot P_{\delta_{\text{диф}}} \cdot P_{\Delta l})^{C_7}]} \quad (4)$$

Постійні коефіцієнти  $C_1$  підбрано методом найменших квадратів на основі власних дослідних напірно-витратних характеристик СПЖН на фреоні-113. Порівняння дослідних та розрахункових характеристик показано на мал.4. Отримана модель дає якісно вірне рішення в усьому діапазоні зміни критеріїв подібності (3) і адекватна дослідним результатам (адекватність обгрунтована за допомогою критерія Фішера) в слідуючому діапазоні:

$$0,63 \leq P_{\delta_{\text{диф}}} \leq 0,89; \quad 0 \leq P_{m_2} \leq 1; \quad 0 \leq P_{\Delta l} \leq 0,8.$$

Ефективність СПЖН багато в чому визначається роботом розгінного двофазного сопла. Попередні розрахунки показали, що сопло насоса повинно мати малий кут розкриття дифузorzної частини і працювати на режимах близьких до критичних. Для визначення ефективності сопла, яке має нульовий кут розкриття дифузorzної частини і працюючого на нетрадиційному теплоносії - фреоні-113, було проведено експерименти по визначенню коефіцієнта швидкості. Результати показано на мал.5. Для порівняння коефіцієнт швид-

кості визначений по емпіричній залежності, яка запропонована у роботі "Адиабатные двухфазные течения" (автори: Циклаурі Г.В., Данилін В.С., Селезнев Л.І.):

$$\varphi_0 = 0,96 - 0,115 \cdot \lg(\rho_1 / \rho_v) \cdot (1-x). \quad (5)$$

Як видно із малюнка 5 є значні параметри, які не враховані в виразі (5).

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень термоциркуляційних контурів з СПЖН та ІК, результати порівняння дослідних та розрахункових характеристик.

Випробування струминних насосів виконано на стенді ЕУ-626 в ЧВО "Енергія". Одержані дослідні характеристики комбінованого контуру теплопереносу (мал.1). В ньому прокачка теплоносія по гарячій петлі здійснювалась СПЖН, а по холодній петлі - допоміжним електромеханічним насосом. Робота ДФК досліджена при постійній заправці теплоносієм та незмінному об'ємі контуру на режимах з перемінним теплопідводом із стабілізацією умов теплопідводу. Підведена потужність змінювалась від 4,5 до 7,5 кВт. Ріст теплопідводу веде до збільшення температури теплоносія за парогенератором. Запропоновані та проведена дослідна перевірка способів стабілізації температури теплоносія в парогенераторі при змінному теплопідводі. Пропонується:

- змінювати кількість теплоносія або об'єм ДФК;
- змінювати гідравлічний опір петлі конденсації;
- використовувати разом перший та другий способи.

Проведено порівняння дослідних характеристик комбінованого ДФК із розрахунковими. Теоретичні характеристики отримано на основі моделі, яку запропонували Горбенко Г.О., Файрузов Ю.В., з урахуванням реальних гідравлічних опорів ДФК та при використанні моделі СПЖН, яку дорацював автор. Результати порівняння демонструють добре співвідношення досліду та теорії.

На базі ІК експериментально реалізована концепція ТЦК (Беспятов М.О., Бредихін В.В., Горбенко Г.О.). Є моделі, які прогнозують роботу ТЦК з ІК та які описують теплофізичні процеси в проточній частині інжектора (Селіванов В.Г., Севастьянов А.П., Бредихін В.В. та інші). Тому в теперішній час пристосовуючи до СТР космічних апаратів актуальна задача зниження перепаду температур в ТЦК з ІК. Для її рішення пропонується використовувати двофазний двокомпонентний теплоносій. Отримані експериментальні характеристики ТЦК з ІК, які працюють на сумі-

ші фреону-113 і ТЕМПа (теплоносій типу антифриз 20). Двофазний фреоновий потік розганяється в соплі, а холодний ТЕМП подається до камери змішування ІК через форсунки. Більш висока теплоємність рідкого ТЕМПа в порівнянні з фреоном-113 дозволяє знизити перепад температур в контурі. При використанні двокомпонентного теплоносія збільшується передзривний напір ІК і термічний КПД циклу перетворення енергії в порівнянні з ІК, який працює на легкокиплячому компоненті.

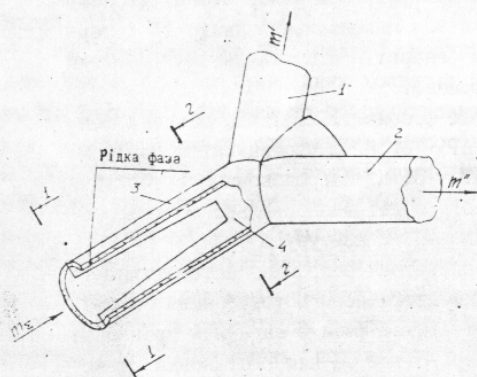
В експериментах із сумішшю фреона-113 і ТЕМПа різниця температур в ТЦК з ІК становить  $\Delta T \sim 31^\circ\text{K}$ . В порівнянні з фреоном-113 ця різниця становить  $\Delta T \sim 54^\circ\text{K}$ . Запропоновано і дослідно перевірено способи термостабілізації випарувального теплообмінника такі ж, як і для комбінованого контуру з СПЖН.

У четвертому розділі описується розробка, математичне та фізичне моделювання роздільника двофазного потоку, який забезпечує розподіл тільки витрат рідкої фази в заданій пропорції при змінному гідравлічному опорі сітей за ним. Установка такого роздільника перед сіттю паралельних теплообмінників (випарувачів, конденсаторів) дозволяє запобігти негативних ефектів, які пов'язані з сепарацією потоку (цій проблемі присвячено роботи R. Lahey, Горбенко Г.О. та інших).

Конструкція струминного роздільника двофазного потоку, який забезпечує пасивний розподіл тільки витрат рідкої фази в заданій пропорції, показано на мал.6. Розподільник виконує свої функції при кільцевому режимі течії двофазного потоку на вході в нього. В перерізі 1-1 роздільна пластина 4 ділить рідку фазу в заданому відношенні. Переріз 1-1 обирається із умови однорідності кільцевого потоку рідини. Поміж перерізами 1-1 та 2-2 формується неоднорідне поле тиску поперек потоку. Під його дією рідина прямує перетекти в сектор з більш низьким тиском. Проте роздільна пластина заважає перетіканню пристінного шару аж до входу в патрубки 1 та 2. Розподіл пару здійснюється під дією реалізуємих перепадів тиску.

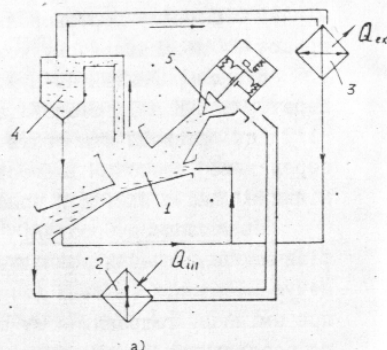
Перевірка працездатності роздільника проводилась на водо-повітряному середовищі. В експериментах змінювалось гідравлічний опір сітки за одним із вихідних патрубків роздільника. Як видно із малюнка 7, зміна відношення витрат повітря  $m'_G/m'_G'$  в вихідних патрубках практично не впливає на відношення витрат води  $m'_1/m'_1'$  в вихідних патрубках.

Роздільник двофазного потоку



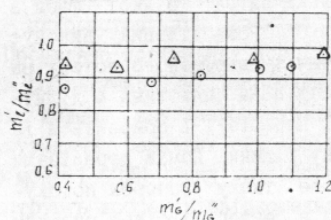
1, 2 - вихідні патрубки; 3 - вхідний патрубок;  
4 - подільна пластина  
Мал. 6.

Перспективні схеми ДФК з СПЖН

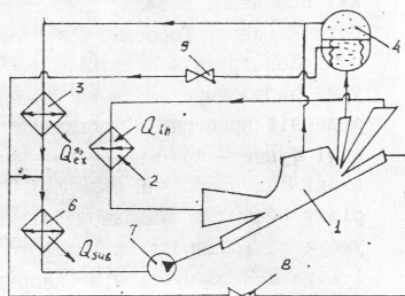


а)

Характеристика роздільника



О -  $x = 0,44$ ;  $m'_g = 11,3 \cdot 10^{-3}$  кг/с;  
Δ -  $x = 0,53$ ;  $m'_g = 7,6 \cdot 10^{-3}$  кг/с.  
Мал. 7.



1 - СПЖН; 2 - випарник; 3 - конденсатор;  
4 - гідроаккумулятор; 5 - регулювальна голка;  
6 - переохолоджувач; 7 - насос; 8 - регулятор  
витрат; 9 - дросель  
Мал. 8.

Отримано набір критеріїв подібності, який характеризує роботу роздільника:

$$Re_v; Re_1; x; \frac{m'_v}{m'_g}; \frac{\rho_v}{\rho_1}; \frac{\mu_v}{\mu_1}; Fr_1. \quad (6)$$

За допомогою критеріїв подібності (6) дослідні результати з модельним робочим тілом (вода-повітря) переносилися на штатну систему терморегулювання УКП (теплоносій - аміак). В УКП планується встановити розподільник потоку перед сіткою радіаційних конденсаторів. На основі повного факторного експерименту типу  $2^*$  отримано математичні моделі в формі регресійної залежності двох типорозмірів роздільника двофазного потоку. Незалежними факторами, які змінювались на протязі всіх експериментів, були: витрати води  $m_1$ ; витрати повітря  $m_2$ ; відношення витрат повітря по каналах на виході із роздільника  $m'_g/m''_g$ ; кут установки роздільника по відношенню до вектора сили тяжіння  $\alpha$ .

Розроблена методика математичного та фізичного моделювання дозволила довести працездатність роздільника в умовах мікрогравітації.

П'ятий розділ присвячено розрахунково-теоретичному дослідженню перспективних контурів теплопереносу на основі СПЖН.

Рішення проблеми термостабілізації біореактора технологічної установки переробки стоків тваринництва та птахівництва можливо при використанні пасивного ДФК, який показано на мал. 8а). Він здатний з високими точністю та надійністю підтримувати температуру в охоронному нагрівнику біореактора (в схемі це конденсатор 3) при змінному тепlopідводі, температурі атмосферного повітря та гріючих топливних газів. У своєму складі контур має два оригінальних елементи, в цілому завдяки яким здійснюється пасивне терморегулювання. Це СПЖН з регулюючою площею горла двофазного сопла та випарний теплообмінник 2, в якому тепlopідвід залежить від витрат теплоносія. Автором розроблено математичну модель випарного теплообмінника і контура в цілому. Розраховано характеристики ДФК і залежність площі горла двофазного сопла СПЖН від кількості тепла, яка переноситься контуром  $F_{KP} = f(Q)$ . Функціональна залежність  $F_{KP} = f(Q)$  дозволяє спроектувати пасивний вузол, який регулює площу горла сопла, а характеристики підтверджують працездатність ДФК.

На основі аналізу систем терморегулювання КА з двофазним теплоносієм, які є та які розробляються Горбенко Г.О., Ніконо-

вим О.А., Прохоровим Ю.М., Ціхоцьким В.М. (ХАІ, НВО "Енергія"), запропонована перспективна схема контура теплопереносу для терморегулювання КА (мал.86). Високу надійність системи в усьому діапазоні теплових навантажень забезпечує сепараційний парорідинний насос з трьома дифузорами і гідроакумулятор з паровою поржниною. В сепараторі СПЖН будуть протікати інтенсивні тепломасообмінні процеси, а як мінімум один дифузор буде працювати на дограничному режимі. Критеріальне рівняння, яке описує тепломасообмінні процеси в сепараторі СПЖН та математична модель дограничного режиму течії в дифузори насоса, отримані автором, дозволяють обґрунтувати працездатність та розрахувати характеристики запропонованої схеми. Щоб наблизити характеристики ДФК до реальних характеристик СТР КА, як прототип конденсатора-радіатора використовується реальний конденсатор з капілярним відсоом, який запропонував Valenzuela J., Drem B. Проведено фізичну схематизацію процесу в конденсаторі та підсистемі конденсатор-випромінювач, розроблено математичну модель. На підставі узагальнених законів Кірхгофа для розв'язаних пневмогідролічних контурів отримано систему рівнянь, які описують статичні характеристики ДФК. Система рівнянь була розв'язана чисельно методом Ньютона. На підставі отриманих характеристик доведена працездатність запропонованої схеми в діапазоні теплових навантажень від 7 до 40 кВт. Теплоносій, який було використано-аміак. Розрахована залежність, яка дозволяє підібрати або зпроектувати пасивний регулятор витрат 8.

#### ВИСНОВКИ.

1. Математична модель струминного сепараційного насосу дозволяє достовірно розрахувати його характеристики як багатofункціонального елемента двофазного контуру теплопереносу.

2. Регулювання контурів із струминними насосами з метою стабілізації температури теплоносія в випарниках можливе за рахунок зміни маси теплоносія в контурі, дроселювання петлі конденсації, разом першим та другим способами.

3. Використання замість однокомпонентного (фреон-113) двокомпонентного теплоносія у вигляді суміші фреона-113 та антифризу ТЕМП, дозволяє знизити перепад температур в контурі з інжектором-конденсатором між джерелом та стоком тепла з 54°C до 31°C.

4. Запропонована конструкція струминного пасивного роздільника двофазного потоку дозволяє розподіляти витрати рідкої фази в заданій пропорції незалежно від гідроопору сітки за роздільником. Роздільник доцільно встановлювати в місцях розгалуження двофазного потоку перед паралельними каналами теплообмінників (випарниками або конденсаторами), що дозволяє підвищити надійність їх роботи.

5. На основі струминного сепараційного насоса можна запропонувати конкурентоздатні двофазні контури теплопереносу, які пасивним образом термостабілізують об'єкти при змінних зовнішніх умовах теплопідводу та перепад температур між джерелом та стоком тепла одиниці градусів.

Результати роботи, а саме: математичні моделі СПЖН та двофазного контуру з СПЖН, струминного роздільника потоку, експериментальні та розрахункові дані по їх характеристиках використані в НВО "Енергія" ім. С.П.Корольова при проектуванні систем терморегулювання космічної станції МІР-2 та Універсальної Космічної Платформи; в НВО "Екологія людини" при обґрунтуванні технічних пропозицій по високотемпературній біотехнологічній установці переробки стоків тваринництва та птахівництва. Елементи дисертаційної роботи використовуються на кафедрі Теплофізичних основ двигунобудування ХАІ.

Основні позначення:  $\alpha$  - коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C$  - питома теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $F$  - площа,  $\text{м}^2$ ;  $Fg$  - число Фруда;  $H_{pe}$  - висота сопла реінжекції,  $\text{м}$ ;  $K$  - критерій подібності;  $l_{сеп}$  - довжина сепаруючої поверхні,  $\text{м}$ ;  $m$  - секундні витрати,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $P$  - тиск,  $\text{Па}$ ;  $Pg$  - число Прандтля;  $R$  - теплота фазового переходу,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $Re$  - число Рейнольдса;  $Q$  - теплова потужність,  $\text{Вт}$ ;  $We$  - число Вебера;  $w$  - швидкість,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $x$  - масовий паровміст;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $\mu$  - динамічна в'язкість,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\nu$  - кінематична в'язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Індекси:  $l$  (liquid) - рідина;  $v$  (vapour) - пар.

Скорочення: ДФК-контур теплопереносу з двофазним теплоносієм; ІК - інжектор-конденсатор; КА - космічний апарат; СПЖН - струминний сепараційний парорідинний насос; СТР-система терморегулювання; ТЕМП-рідкий теплоносій типу "Антифриз-20"; ТЦК - термоциркуляційний контур; УКП - Універсальна Космічна Платформа.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних

роботах:

1. Бредихин В. В., Гончаров Б. А., Горбенко Г. А., Иванов Ю. М., Синецкий С. В., Теняков И. Э. Экспериментальное исследование струйных насосов в теплообменном контуре. - В кн. Тез. докл. Восьмой Всесоюзной конф. "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". 23-25 окт., 1990г., Ленинград, НПО ЦКТИ, т.3. С.263-266.
2. Горбенко Г. А., Теняков И. Э., Вологдин А. С. Экспериментальные данные по конденсации пара фреона-114 на струях. // Газотермодинамические процессы в энергоустановках с многофазным рабочим телом: Сб. научн. трудов, Харьков, 1990. С.66-70.
3. Теняков И. Э., Романенко В. В., Беспятов М. А., Бредихин В. В. Измеритель импульса потоков. // Газотермодинамические процессы в энергоустановках с многофазным рабочим телом: Сб. научн. трудов, Харьков, 1990. С.114-118.
4. Горбенко Г. А., Блинков В. Н., Теняков И. Э., Гакал П. Г., Синецкий С. В., Никонов А. А., Прохоров Ю. М. Экспериментальное и теоретическое исследование элементной базы теплообменных контуров с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов: - М. Центр НИИ Поиск. Сер.: Ракетно-космическая техника. Машиностроение, 1992. С.8-20.
5. Горбенко Г. А., Беспятов М. А., Теняков И. Э. и др. Замкнутый теплогидравлический стенд ФВ для исследования струйных насосов и их элементов. Методика измерений. Расчет погрешностей. (Отчет о НИР) / Харьк. авиац. ин-т. Руководитель темы С. Д. Фролов. - ГР. N 01860136238, Инв. N 0287.062675, Харьков, 1987. - 94с.
6. Горбенко Г. А., Бредихин В. В., Теняков И. Э. и др. Экспериментальное исследование сепарационных насосов в составе контура ЭУ-626. (Отчет о НИР) / Харьк. авиац. ин-т. Руководитель темы Фролов С. Д. ГР. N 01.86.0136238, Инв. N 02880.024337, Харьков, 1989. - 66с.
7. Горбенко Г. А., Блинков В. Н., Теняков И. Э. и др. Обзор технологий переработки отходов животноводства и птицеводства. Предложение и разработка новых концепций. (Отчет о НИР) / Харьк. авиац. ин-т. Руководитель темы Горбенко Г. А. - ГР. N 01:910011327, Харьков, 1992. - 28с.
8. Горбенко Г. А., Блинков В. Н., Теняков И. Э. и др. Моделирование рабочих процессов в двухфазных контурах теплопереноса систем терморегулирования. (Отчет о НИР) / Харьк. авиац. ин-т. Руководитель темы Горбенко Г. А. - ГР. N 01.910011327, Харьков, 1992. - 81с.

*Минин*

