

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ

На правах рукопису

Гакал Павло Григорович

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ КОНТУРІВ З ДВОФАЗНИМ
ТЕПЛОНОСІЄМ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ТА ЕНЕРГОУСТАНОВОК

05.14.05 - теоретична теплотехніка

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Харків-1995



AB 32.860

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано на кафедрі Теплофізичних основ
двигунобудування Харківського авіаційного інституту
ім. М. С. Жуковського Міністерства освіти України

Науковий керівник - доктор технічних наук, доцент

Блишков Володимир Миколайович

Науковий консультант - доктор технічних наук, доцент

Горбенко Геннадія Олександрович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор

Смирнов Генріх Федорович

- кандидат технічних наук, доцент

Елькін Борис Соломонович

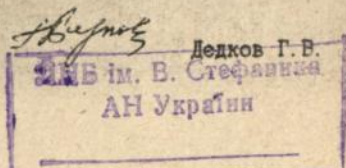
Провідна установа - фізико-технічний інститут низьких
температур НАН України (м. Харків)

Захист відбудеться 21.09 1995р. о 14 годині в ауд. 1112
на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 02.18.03 в
Інституті проблем машинобудування НАН України за адресов:
310046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
проблем машинобудування НАН України за адресов:
310046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

Автореферат розісланий 17.08, 1995р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Системи терморегулювання (СТР) космічних апаратів (КА) на основі контурів з двофазним теплоносієм (ДФК), в яких тепло акумулюється у вигляді прихованої теплоти пароутворення, мають суттєві переваги в порівнянні з однофазними по масі, енергоспоживанню та точності термостабілізації. В той же час, ДФК є складними технічними системами, синтез яких стає суттєво продуктивнішим при використанні адекватних математичних моделей. Необхідність в математичному моделюванні виникає при аналізі працездатності та при розробці рекомендацій по поліпшенню функціональних характеристик конкретних схем ДФК СТР, які розробляються в рамках російсько-американського проекту Міжнародної Космічної Станції (МКС) "АЛЬФА", що виконується за участю Національного Космічного Агентства України.

Ядерні енергоустановки (ЯЕУ), які охолоджуються киплячов водою, отримали поширення як на Заході (реактори типу BWR), так і в країнах колишнього СРСР (Росія, Україна, Литва), де триває експлуатація реакторів типу РВМК та проєктуються нові реактори підвищеної безпеки. Забезпечення сталості течії киплячого теплоносія є важливим аспектом проблеми безпеки ЯЕУ і вимагає розробки математичних моделей для вивчення процесів, які відбуваються при коливальних режимах течії теплоносія, визначення областей сталої роботи ЯЕУ, прогнозування ефективних інженерних заходів, направлених на забезпечення сталості течії киплячого теплоносія.

Роботу виконано на кафедрі Теплофізичних основ двигунобудування Харківського авіаційного інституту у відповідності з д/б НДР ДКНО СРСР "Розробка теплообмінного контуру з однофазним перетворювачем енергії" на 1988-1990 р. (Н. Д. Р.

01.88.0089455); Загальносоюзною науково-технічною програмою ДКНТ СРСР АН СРСР "Енергетика" на 1986-1990 р.р. (розділ 0.01.04, завдання ИЭг-7, тема "Моделювання руху парорідинних сумішей в елементах циркуляційних контурів для аналізу аварійних та перехідних режимів роботи АЕС", (СН Д.Р. Д.Р.01.87.0099313); Міжвузівської науково-технічної програми ДКНО СРСР "Ядерна енергетика підвищеної безпеки" на 1990-1993 р.р. (розділ 4.4 "Розробка математичних моделей та програм для аналізу динамічних процесів в ЯЕУ з двофазним теплоносієм", N Д.Р.01.90.0062703); г/д N Д.Р.01.91.0011327 в Електрогорській науково-дослідній станції-філіалом ВНДІ з експлуатації атомних станцій; г/д N З-ЦТФ/94 з науково-виробничим об'єднанням "Енергія"; г/д N 205-75/94 з Електрогорським науково-дослідним центром з безпеки атомних станцій; г/д N 402-99/94 з Національним Космічним Агенством України.

Необхідність запрошення Горбенко Г.О. в якості науково-го керівника визначається тим, що другий розділ дисертації присвячений аналізу поточкорозподілу в розгалуженій багато-елементній системі терморегулювання орбітальної станції, виконувався на основі консультацій з Горбенко Г.О. Необхідність цих консультацій визначається тим, що Г.О. Горбенко є науковим керівником спільних НДР КАІ та РКК "Енергія", зв'язаних з розробкою проекту та випробуваннями системи забезпечення теплового режиму орбітальної станції "АЛЬФА", автором опублікованої в РКК "Енергія" монографії та цілої низки публікацій в міжнародних науково-технічних видавництвах аерокосмічного напрямку.

Мета роботи: розробка ефективних та достовірних математичних моделей розгалужених багатоелементних теплообмінних контурів з двофазним теплоносієм та рішення на їх основі но-

вих задач, які зв'язані з проектуванням та аналізом робочих процесів ДФК СТР і ЯЕУ.

Основні завдання дослідження:

-розробка математичних моделей та алгоритмів, які дозволяють розраховувати поточкорозподіл в складних розгалужених ДФК СТР з двофазним теплоносієм; аналіз способу регулювання ДФК СТР за допомогою регуляторів подачі рідини (РПР) і гідроакумулятора з тепловим регулюванням (ТГА);

-проведення якісного та кількісного аналізу коливальних режимів роботи та сталості киплячого теплоносія в підсистемі ДФК ЯЕУ - збірці паралельних парогенеруючих каналів; розрахунки областей сталої роботи каналних реакторів РБМК-1000 та РБМК-1500.

Методологія дослідження. Моделювання ДФК СТР базується на принципі подання багатоелементних розгалужених систем у вигляді еквівалентних термогідродинамічних ланцюгів, ідеалізовані елементи яких несуть в собі внутрішньо присутні властивості конструктивних елементів реальних систем. Ідеалізовані елементи включають контрольні об'єми та гілки для гідродинамічної підмоделі, теплові вузли та провідники для теплової підмоделі. Особливості, якими характеризуються елементи реальних систем, в ідеалізованих елементах проявляються через відповідні джерельні члени в диференціальних рівняннях збереження маси, енергії, імпульсу. В математичному плані задача зводиться до розв'язку системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь.

Підсистема ДФК ЯЕУ-збірка паралельних парогенеруючих каналів-досліджується шляхом моделювання течії в одиночному каналі при граничних умовах, які характерні для паралельно-каналної збірки ($\Delta P = \text{const}$). Течію киплячого теплоносія

в обігрівачому каналі описано 1P2T1W моделлю нестационарного одномірного двофазного потоку разом з рівнянням збереження енергії для стінки. Для інтегрування системи диференціальних рівнянь використано неявний чисельний метод Liles, Reed (Los Alamos, 1978).

Обґрунтування теоретичної та практичної цінності дослідження та його наукова новизна. В дисертаційній роботі запропоновано подальший розвиток математичних моделей розрахунку та аналізу гідродинамічних та теплових процесів в розгалужених багатоелементних ДФК. За допомогою запропонованих математичних моделей розв'язано задачі про потокорозподіл та теплообмін в ДФК СТР МКС "АЛЬФА"; про паралельно-каналну несталість в підсистемі ДФК ЯЕУ - збірці паралельних парогенеруючих каналів.

На основі чисельного аналізу отримано залежності параметрів в ДФК СТР (тиску, температури, розходи) від розподілу теплового навантаження при засобі регулювання за допомогою РПР та ТГА. Отримані результати дозволили детально проаналізувати працездатність ДФК СТР та запропонувати комплекс заходів, направлених на поліпшення функціональних характеристик ДФК СТР МКС "АЛЬФА". Під час розв'язку задачі про паралельно-каналну несталість в підсистемі ДФК ЯЕУ-збірці паралельних парогенеруючих каналів, проаналізовано вплив різних факторів (розподіл гідроопору уздовж каналу, теплова інерція матеріалу поверхні, яка нагрівається, установка кавітуючої трубки Вентурі) на сталість системи.

Розроблені для рішення конкретних технічних задач математичні моделі та розрахункові програми можуть бути також використані при розробці систем термостабілізації біотехнологічних установок для переробки стоків тваринництва та

птахівництва, при проектуванні та розрахунках характеристик об'єктів криогенної та ракетної техніки, а також при проектуванні маслосистем двигунів.

Реалізація наукових розробок. Математична модель та реалізуюча її розрахункова програма, а також отримані за їх допомогою рекомендації по вибору схемних рішень та проектуванню елементів двофазних контурів теплопереносу (трубопроводів, теплообмінників-випарувачів), використовують в НДР та ДКР ракетно-космічної корпорації (РКК) "Енергія" ім. С. П. Корольова (Російська Федерація) при розробці льотної експериментальної установки та централізованої СТР російського сегменту МКС "АЛЬФА". Математична модель та програма розрахунку коливальних режимів та сталості двофазного теплоносія в паралельних технологічних каналах (ТК) реакторів типу РБМК використовується в Електрогорському науково-дослідному центрі по безпеці атомних станцій (Російська Федерація) для планування та аналізу експериментів на інтегральному стенді безпеки.

Особистий внесок дисертанта у роботи, які опубліковано разом із співавторами. В роботах [1-6] автор приймав участь в розробці нових та подальшому розвитку вже запропонованих математичних моделей; в проведенні експериментів та обробці отриманих результатів; у відпрацюванні заключних висновків. Автором особисто розроблені розрахункові програми та проведено розрахунково-теоретичні дослідження.

Основні наукові та прикладні результати роботи пройшли апробацію на: 8-й всесоюзній конференції "Двофазний потік в енергетичних машинах та апаратах" (Ленінград, 1990); Міжгалузевому семінарі-наradі "Системи терморегулювання з двофазним теплоносієм для космічних апаратів", (Крим, 1991); Міжнародному симпозіумі "Несталість в багатофазних потоках "

(Руен, 1992); 8-я науково-практичній конференції "Досвід експлуатації та шляхи вдосконалення теплообмінного устаткування" (Севастополь, 1993); Українській конференції "Моделювання та дослідження сталості систем" (Київ, 1993); 11-я Міжнародній конференції "Моделювання як критична технологія" (Сан-Дієго, 1994); Міжнародній конференції "Нові тенденції в термодинаміці ядерних систем" (Піза, 1994); Першій російській національній конференції по теплообміну (Москва, 1994р.).

За темою дисертації опубліковано 9 друкованих праць, серед них: дві статті в наукових журналах, препринт, три доповіді та три тези доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновку, списку літератури із 102 найменувань. Основний зміст роботи викладено на 168 сторінках, 58 малюнках та 6 таблицях, усього 209 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ.

В першому розділі проведено аналіз проблеми математичного моделювання робочих процесів в теплообмінних контурах з двофазним теплоносієм систем терморегулювання космічних апаратів. Зростання тепловиділення ($Q \geq 10^4$ кВт) на перспективних КА з одночасним збільшенням до $L \cong 10^2$ м їх лінійних розмірів ставлять проблему розробки СТР, які використовують двофазний киплячий теплоносій. Перевагами ДФК в порівнянні з традиційними однофазними рідинними системами є квазіізотермічність ділянок збору та скидання тепла, суттєво менші витрати теплоносія та потужність прокачуючих насосів, габаритів та маси трубопроводів, арматури та теплообмінних апаратів. Аналіз тенденція розвитку та основних технічних рішень дозволило визначити домінуючу концепцію перспективних ДФК СТР—основний контур типу "теплова шина" з насосом прокачок, до якого

приєднуються різні навантаження (користувачі).

В ДФК СТР реалізовано широкий спектр гідродинамічних та тепломасообмінних процесів в стаціонарних та нестаціонарних режимах роботи, для моделювання яких необхідно створювати адекватні та достовірні математичні моделі. Запропоновані в дисертації математична модель та розрахункова програма є результатом досліджень виконаних в ХАІ та РКК "Енергія" по розробці власного програмного комплексу, необхідного для проектування та супроводження експлуатації СТР МКС "АЛЬФА".

Важливим аспектом проблеми безпеки ЯЕУ є забезпечення сталості течії киплячого теплоносія. Останнє потребує розробки достовірних математичних моделей і програм для детального вивчення та поглибленого порозуміння природи коливальних режимів течії теплоносія, розрахунку областей сталої роботи ЯЕУ, зменшення числа інтегральних експериментів, прогнозування ефективності інженерних заходів по забезпеченню сталості. Проведений автором огляд робіт присвячених математичним моделям для аналізу сталості киплячого теплоносія в ЯЕУ, виявив домінування лінійного підходу та поодинокі випадки використання нелінійних моделей (програми RETRAN, SPORTS). Ці обставини, разом з необхідністю уточнення безпечних експлуатаційних параметрів реакторів типу РБМК, визначили необхідність побудови розрахункової програми, яка реалізує нелінійну гідродинамічну модель нестаціонарної течії киплячого теплоносія в збірці паралельних технологічних каналів та проведення комплексного розрахунково-теоретичного дослідження явища паралельно-канальної теплогідравлічної несталості.

В другому розділі проведено аналіз поточкорозподілу та теплообміну в складних багатоелементних ДФК СТР в межах підходу, який базується на принципі показу багатоелементних

розгалужених систем у вигляді еквівалентних термогідродинамічних ланцюгів. Закони збереження для елементів термогідродинамічних ланцюгів мають вигляд:

$$\frac{dM_k}{dt} = \sum m_j; \quad (1)$$

$$\frac{dU_k}{dt} = \sum m_j \cdot i_j + q_{w-f,k} \cdot F_{w,k} + W. \quad (2)$$

$$\frac{dm_j}{dt} = \frac{1}{L_j} \cdot (P_k - P_{k+1} + \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_p + \Delta P_g). \quad (3)$$

$$\rho_{w,k} \cdot C_{w,k} \cdot \frac{dT_{w,k}}{dt} = q_k - \frac{q_{w-f,k} \cdot F_{w,k}}{V_{w,k}}, \quad (4)$$

де індекс "к" відносять до контрольного об'єму та сполученого з ним теплового вузла, а індекс "j" відносять до гілки, яка виходить із контрольного об'єму. Тепловий потік q_{w-f} моделюється елементом "тепловий провідник" і визначається законом Ньютона - Ріхмана. Теплові потоки між конструктивними елементами та навколишнім середовищем за рахунок теплопровідності та радіації моделюється елементами "тепловий провідник" та визначаються відповідно законами Фур'є або Стефана-Больцмана. Коефіцієнт теплообміну α_k обчислюється в залежності від режиму теплообміну за допомогою співвідношень:

J. Chen, D. Groeneveld, R. Bougall-W. Rohsenow. В рівнянні закону збереження імпульсу (3) незворотні витрати тиску в двофазному потоці розраховуються за допомогою параметра двофазності Φ_{Lo}^2 , який визначається в залежності від режиму течії двофазного потоку за співвідношеннями Beattie. Для визначення структур двофазного потоку та режиму теплообміну в роботі запропоновано карту режимів течії двофазного теплоносія в теплообміннику-випаровачу в умовах послабленої гравітації.

Запропонований вище підхід дозволяє проводити як розрахунки нестационарних режимів (запуск, зміна тепловиділення, зміна умов тепловідводу, зміна температури термостабілізації, реакція на дію активних регуляторів, коливання, нештатні си-

туації), а також для розрахунків стаціонарних характеристик, які відображають залежність внутрішніх теплофізичних параметрів системи (розходу, тиску, температур, паровмісту) від теплового навантаження або іншого зовнішнього параметру системи. При стаціонарних розрахунках вважають, що в контрольних об'єктах та теплових вузлах не здійснюється накопичення маси та енергії, а всі гілки безінерційні. Система диференціальних рівнянь, які описують контур теплопереносу, трансформується в систему трансцендентних рівнянь, які одержано шляхом обнулення похідних в лівих частинах диференціальних рівнянь. При цьому замість одного із рівнянь типу (1) необхідно задати масу теплоносія в контурі $M = \text{const}$, якщо контур замкнений, або інший параметр в будь-якій точці контура, якщо він розімкнений. Для одержання замкненої математичної моделі ДФК СТР автором були розроблені математичні моделі кавітуючої трубки Вентурі, теплообмінника-випарювача в умовах послабленої гравітації, гідроакумулятора з тепловим регулюванням, конденсатора-випромінювача, механічного відцентрового насоса.

Кавітуюча трубка Вентурі виконує функцію обмежувача розходу в гілках сітки теплозбору ДФК СТР при змінах теплових навантажень та гідроопорів. Проведене автором експериментальне дослідження малорозмірних кавітуючих трубок Вентурі на фреоні-113 показало, що в діапазоні режимних та геометричних параметрів, яке характерне для ДФК СТР, максимальний розхід через трубку із задовільною точністю описується гомогенною ізоентропічною моделлю.

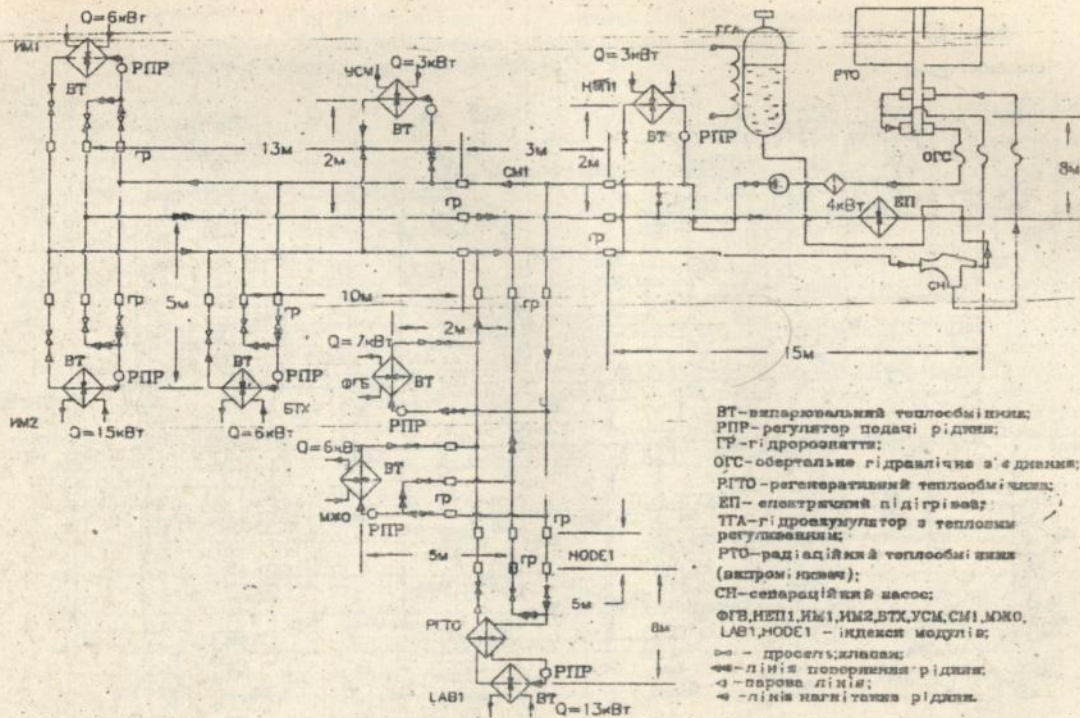
Робота теплообмінників-випарювачів в умовах ослабленої гравітації. Автором виконано експериментальне дослідження структур потоку та режимів теплообміну в випарювачах конвективного типу. Методика експерименту міститься в порівнянні

температур верхньої та нижньої гріючих поверхонь плоского каналу, які охолоджувались киплячим фреоном-113, при різних витратах охолоджувача. Суттєва різниця цих температур інтерпретувалась як доказ значного впливу сили Архімеда на механізм кипіння. Вважалось, що в цій області параметрів вірогідне виникнення плівкового режиму кипіння в умовах невагомості. Результати експериментів оброблені в координатах "G-x" в вигляді карти режимів і з задовільною точністю співставлені з результатами аналітичного розв'язку задачі про відрив парової бульбашки в умовах змінного поля сили тяжіння. За допомогою викладеної методики побудовано також карту режимів течії в умовах нульової гравітації киплячого аміаку, який є штатним теплоносієм ДФК СТР в проєкті МКС "АЛЬФА".

Гідроаккумулятор з тепловим регулюванням (ТГА) призначений для регулювання тиску в контурі, а відповідно, і температури в випарувачах. На відміну від гідроаккумуляторів з газобалонним наддувом, тиск в ТГА регулюється випаруванням рідини, або конденсацією пара. Для цього в ТГА передбачена можливість підводу або відводу тепла до або від теплоносія. Принцип дії ТГА засновано на балансі між кількістю підводжуваної електронагрівачем Q_n та відводжуваної випромінювачем з поверхні ТГА Q_{out} теплоти. ТГА моделюється контрольним об'ємом та гілком. В контрольному об'ємі знаходяться нерівновісні парова та рідка фази, що розділені міжфазною поверхнею. При визначенні стаціонарного поточкорозподілу ТГА моделюється контрольним об'ємом із незмінним в часі тиском.

Крім перерахованих вище елементів математична модель контура містить в собі рівняння тепловіддачі в конденсаторі-випромінювачі та регенеративному теплообміннику, а також рівняння характеристики механічного відцентрового насосу. На

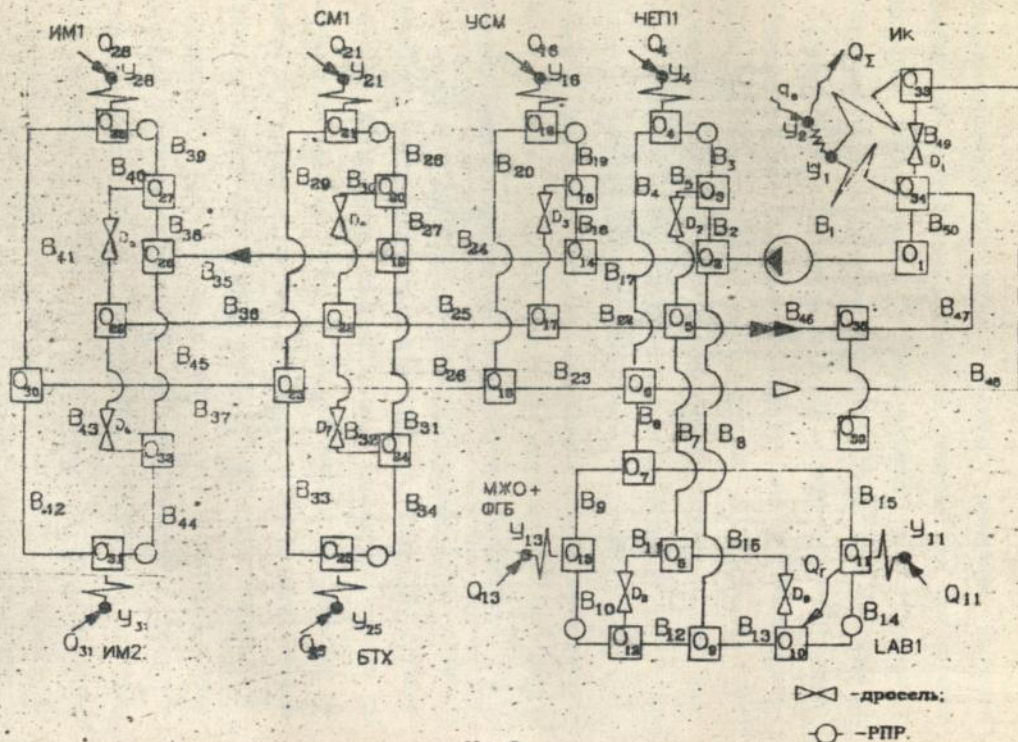
ДФК СТР МКС "АЛЬФА"



ВТ-випаровальний теплообмінник;
 РРР-регулятор подачі рідкого;
 ГР-гідророз'єкти;
 ОГС-обертальне гідралічне з'єднання;
 РГТО-регенеративний теплообмінник;
 ЕП-електричний підігрівач;
 ТГА-гідроккумулятор з теплою регулюванням;
 РТО-радіаційний теплообмінник (важковий, масив);
 СН-сепараційний насос;
 ФГБ, ИВН1, ИМ1, ИМ2, ВТХ, УСМ, СМ1, МЖО, ЛАВ1, НОДЕ1 - індекси модуля;
 — - проєкти, ліній;
 — - лінія поперемітної рідкого;
 — - парова лінія;
 — - лінія нагрівача рідкого.

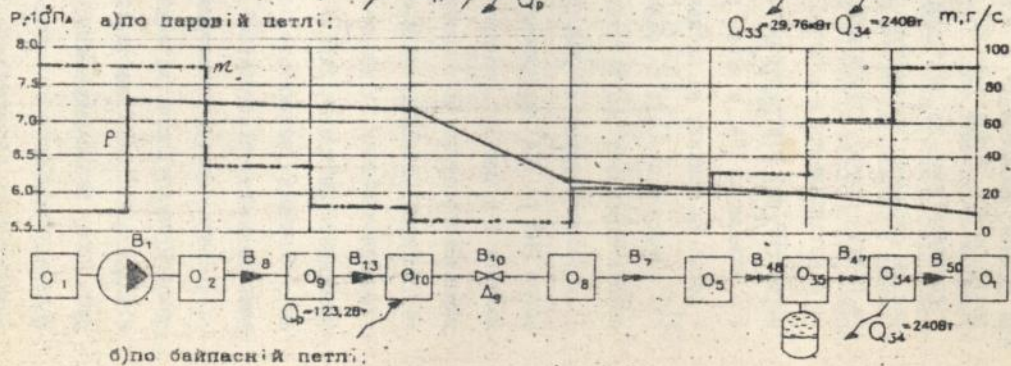
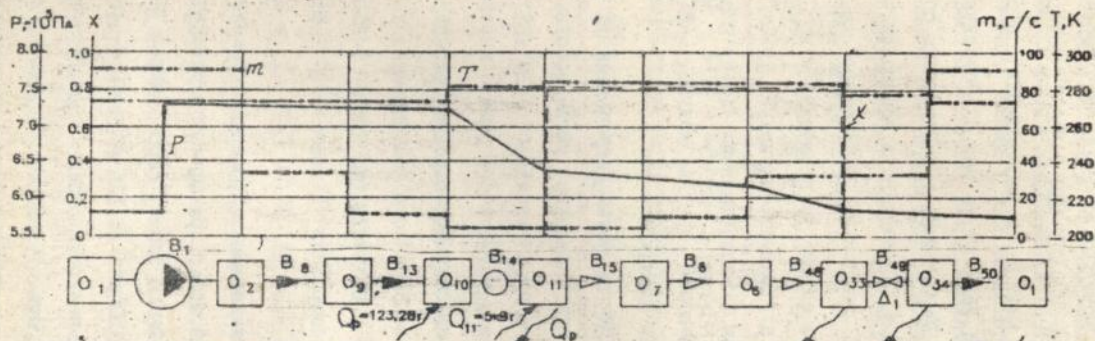
Мал.1

Еквівалентний термогідродинамічний ланцюг для
розрахунку потужності в ДФК СТР МКС "АЛЬФА".



Мал.2

Профілі тиску (P), температури (T), паровмісту (x) та розходу теплоносія (m) по замкненому контуру через модуль LAB1
 (варіант розрахунку 07.07.94-001)



Мал.3

основі описаній математичної моделі, проведено аналіз працездатності та запропоновано комплекс заходів по покращенню функціональних характеристик ДФК СТР МКС "АЛЬФА", конфігурація якого зображена на мал. 1, а еквівалентні спряжені гідродинамічний та тепловий ланцюги на мал. 2. Розрахунковим шляхом отримано залежності параметрів в контрольних об'ємах та гілках (тиску, температури, розходу) від розподілу теплового навантаження в контурі при засобі регулювання за допомогою РПР, які підтримують на виході із випарувачів $x_{ex} = 0,8$, і з допомогою ТГА, в якому підтримується тиск $P_{ТГА} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па} = \text{const}$. Як приклад на мал. 3 представлено зміну параметрів потоку в паровій та байпасній лініях модулю LAB1. На основі отриманих результатів визначено, що:

1) конфігурація ДФК СТР та засіб регулювання за допомогою РПЖ та ТГА забезпечують сприятливі умови роботи всіх модулів в діапазоні теплового навантаження (0...30 кВт) при різних конфігураціях тепловиділення;

2) в модулі LAB1 необхідно використовувати регенеративний теплообмінник (підібрано місце його розташування та коефіцієнт теплопередачі $k \cdot F$). Показано, що при $Q_{\Sigma} \leq 15 \text{ кВт}$, для виключення можливості замерзання теплоносія, необхідно вмикати електричні підігрів;

3) при заданих проектувальником параметрах конденсатора-випромінювача, кавітаційний запас при $Q_{\Sigma} = 30 \text{ кВт}$ недостатній. Для підвищення кавітаційного запасу запропоновано збільшити площу випромінювача з 150 м^2 до 175 м^2 , розмістити панель випромінювача так, щоб тепловий потік, падаючий на неї з навколишнього середовища, $q_{\text{ср}}$ був мінімальним; розмістити конденсатор та переохолоджувач на "своїх" теплових трубах та панелях випромінювача.

В третьому розділі коливальні режими течії киплячого теплоносія в системі паралельних парогенеруючих каналів досліджені шляхом моделювання течії в одиночному каналі при граничних умовах, які характерні для паралельно-канальної збірки ($\Delta P = \text{const}$). Течія киплячого теплоносія в обігріваному каналі описується 1P2T1W моделлю нестационарного одномірного двофазного потоку, основні рівняння законів збереження для якої мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{1}{F} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\rho_m \cdot w \cdot F) &= 0, \quad \rho_m = \alpha \cdot \rho_v + (1-\alpha) \cdot \rho_l, \\ \frac{\partial(\alpha \cdot \rho_v)}{\partial t} + \frac{1}{F} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \cdot \rho_v \cdot w \cdot F) &= J_{1-v}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho_m} \cdot \Gamma_f + g \cdot \cos j &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha) \cdot \rho_l \cdot u_1] + \frac{1}{F} \cdot \frac{\partial}{\partial z} [(1-\alpha) \cdot \rho_l \cdot u_1 \cdot w \cdot F] + \frac{P}{F} \cdot \frac{\partial}{\partial z} [(1-\alpha) \cdot w \cdot F] - \\ - P \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} + J_{1-v} \cdot i_{1, \text{sat}} + q_{1-v} - q_{w-f} \cdot \frac{F}{V^w} &= 0, \\ T_v = T_{\text{sat}}(P), \quad \rho_v = \rho_{v, \text{sat}}(P), \quad \rho_l = \rho_{l, \text{sat}}(T_1), \end{aligned} \quad (5)$$

$J_{1-v} = \frac{q_{1-v}}{T_{1-v}}$, де $q_{1-v} = \alpha_h \cdot A \cdot (T_1 - T_{\text{SAT}})$.
 Однофазна рідина моделюється системою (5) при $\alpha=0$. Для інтегрування системи (5) використано неявний чисельний метод Liles, Reed (Los Alamos, 1978). Рівняння енергії для кожного елемента стінки аналогічно рівнянню (). Для розрахунку теплообміну між стінкою каналу та теплоносієм використовується залежність $q_{\text{CHF}} = f(x)$ (П.Л. Кирилов, 1984), що представляє зміну критичного теплового потоку в залежності від масового паровмісту потоку теплоносія. Коефіцієнти тепловіддачі α_h при різних режимах теплообміну розраховувались по кореляціям: J. Chen, D. Groeneveld, K. Dougal - W. Rohsenow.

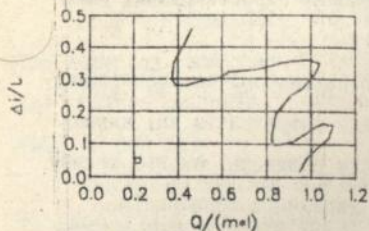
На основі розробленої математичної моделі було розв'язано задачу про паралельно-канальну несталість. Співставлення теоретичних та експериментальних результатів показало, що математична модель з задовільною точністю узгоджується з

експериментом. Детально пояснено фізичну природу та побудовано блок-схему коливань, зв'язаних з періодичним виникненням та переміщенням в потоці хвиль густини. Показано, що збільшення теплової інерції матеріалу обігріваної поверхні веде до збільшення області сталої роботи системи паралельних каналів. Чисельно доведено доцільність використання для подавлення пульсацій та розширення області сталої роботи передвключених кавітуючих трубок Вентурі. Порівняльний аналіз сталості течії киплячого теплоносія в ТК РБМК-1000 та РБМК-1500 показав, що обмеження на зміну режимних параметрів в ТК РБМК-1000 та РБМК-1500 не ідентичні з точки зору недопущення розвитку паралельно-канальної несталості та кризи тепловіддачі. На мал. 5 показані автоколивальні режими роботи ТК РБМК-1000 та РБМК-1500 біля межі сталості. Бачимо, що в ТК РБМК-1000 на фазі мінімального розходу спостерігається різке зростання температури стінки (криза тепловіддачі), тоді як в ТК РБМК-1500, завдяки встановленому інтенсифікатору теплообміну, температура стінки змінюється слабо.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. Розроблено математичну модель та розрахункову програму, що її реалізує; для аналізу поточкорозподілу та теплообміну в розгалужених багатоелементних ДФК.
2. Розроблено та експериментально перевірено математичні моделі елементів ДФК - кавітуюча трубка Вентурі та теплоомінник-випарувач в умовах послабленої гравітації.
3. Проведено комплекс розрахунків по аналізу працездатності та вироблено конкретні рекомендації по покращенню функціональних характеристик ДФК СТР МКС "АЛЬФА".
4. Розроблено математичну модель та розрахункову програму для аналізу коливальних режимів течії киплячого теплоно-

Кордон сталості для ТК
РБМК-1000.

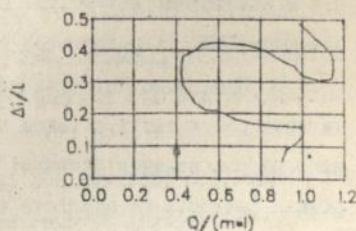


□ Ном. режим РБМК-1000

а) $P_{ex} = 6,9 \text{ МПа}$; $Q = 3000 \text{ кВт}$;

$\xi_{1wc} = 50$; $\xi_{vwc} = 0$.

Кордон сталості для ТК
РБМК-1500.



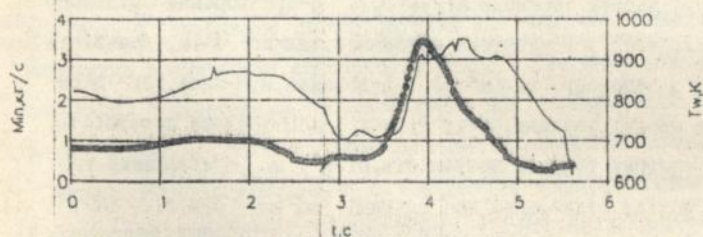
□ Ном. режим РБМК-1500

б) $P_{ex} = 6,9 \text{ МПа}$; $Q = 4500 \text{ кВт}$;

$\xi_{1wc} = 50$; $\xi_{vwc} = 4,1$.

Мал. 4

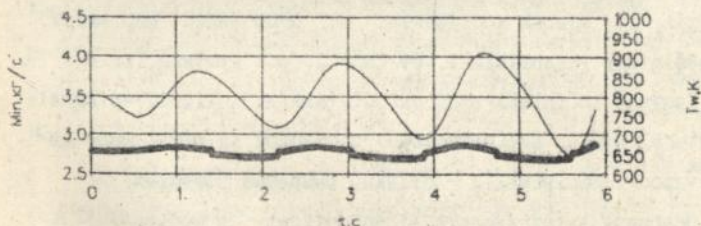
Кольвання розряду та температури стінки
біля кордону сталості РБМК-1000



а) $P_{in} = 7,182 \text{ МПа}$; $P_{ex} = 6,9 \text{ МПа}$; $T_{in} = 503,15 \text{ К}$; $Q = 3000 \text{ кВт}$;

$\xi_{1wc} = 50$; $\xi_{vwc} = 0$.

Кольвання розряду та температури стінки
біля кордону сталості РБМК-1500



б) $P_{in} = 7,678 \text{ МПа}$; $P_{ex} = 6,9 \text{ МПа}$; $T_{in} = 503,15 \text{ К}$; $Q = 4500 \text{ кВт}$;

$\xi_{1wc} = 50$; $\xi_{vwc} = 4,1$.

Мал. 5

сія в підсистемі ЯЕУ-збірці паралельних парогенеруючих каналів типу РБМК та моделюючих стендів.

5. Проведено співставлення розрахункових та експериментальних результатів, а також комплекс розрахунків, які направлено на роз'яснення фізичної природи коливань, аналіз впливу різних факторів на сталість течії киплячого теплоносія.

6. Визначено, що діапазон дозволеного змінювання режимних параметрів в ТК РБМК - 1500 вищий над ТК РБМК - 1000 , завдяки встановленому інтенсифікатору теплообміну.

Основні позначення: C - питома теплоємність, Дж/(кг·К); F -площа, м²; f -сила, віднесена до одиниці об'єму суміші, Н/м³; G -питомі масові розходи, кг/(м²·с); g -прискорення вільного падіння, м/с²; i - питома ентальпія, Дж/кг; J -інтенсивність фазового переходу, кг/(м²·с); L -довжина, м; M -маса, кг; m -секундні масові розходи, кг/с; P -тиск, Па; Q -теплова потужність, Вт; q_v -питома теплова потужність, Вт/м³; q_{1-v} - міжфазний тепловий потік, віднесений до одиниці об'єму суміші, Вт/м³; q_{w-t} - тепловий потік від стінки до теплоносія, віднесений до одиниці омиваємої поверхні, Вт/м²; T -температура, К; t -час, с; U -внутрішня енергія, Дж; u -питома внутрішня енергія, Дж/кг; V -об'єм, м³; w -швидкість, м/с; x -масовий паровміст (ступінь сухості); z - осьова координата, м; α -об'ємний паровміст; α_n -коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); ρ - густина, кг/м³.

Індекси: in(inlet)-вхід; ex(out)-вихід; l(liquid)-рідина; m(mixture)-суміш; sat(saturated)-параметри на лінії насичення; v(vapour)-пар; w(wall) - стінка, омиваема поверхня.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Б. И. Нигматулин, О. И. Мелихов, В. Н. Блинков, П. Г. Гакал . Численний аналіз устойчивости кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах. - Теплофизика высоких

температур, 1993, 31, N 6. С. 934-940.

2. B. I. Nigmatulin, O. I. Melikhov, V. N. Blinkov, P. G. Gakal. The numerical analyses of boiling flow instability in parallel heated channels. - Nuclear Engineering and Design, 139, 1993. P. 235-243.

3. Б. И. Нигматулин, В. Н. Блинков, О. И. Мелихов, П. Г. Гакал. Расчетное исследование устойчивости течения двухфазного теплоносителя в параллельных каналах реакторов типа РБМК. Электрогорск, ЭНИЦ, Препринт L 15/01-1994.06, 1994. - 48 с.

4. В. Н. Блинков, П. Г. Гакал, Т. А. Горбенко, С. В. Синицкий, И. Э. Теняков, Ч. А. Никонов, Ю. М. Прохоров. Экспериментальное и теоретическое исследование элементной базы теплообменных контуров с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. В книге: Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов. Обзор трудов межотраслевого семинара-совещания "Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов" (Крым 1991 г.). - Москва: Центр НТИ "Поиск", Серия: Ракетно-космическая техника, Машиностроение, 1992 г. С. 22-34.

5. B. I. Nigmatulin, O. I. Melikhov, V. N. Blinkov, P. G. Gakal. The numerical investigation of boiling flow instability in heated channels. Paper presented at the International Symposium on Instabilities in Multiphase Flows, Rouen, France, May 11-14, 1992. P. 89-100.

6. B. I. Nigmatulin, O. I. Melikhov, V. N. Blinkov, P. G. Gakal, N. A. Brus. The experimental and numerical analyses of boiling flow instability in parallel heated channels. Paper presented at the International Conference on "New Trends in Nuclear System Thermohydraulics". Vol. 1, Pisa, May 30th-

- June 2nd, 1994, P. 779-791.

SUMMARY

Gakal P.G. Modelling of the heat exchange loops with a two-phase heat carrier for temperature control systems and power plants.

This thesis is a manuscript being submitted for a Candidate of Sciences Degree (Engineering) in the speciality 05.14.05 - theoretical heat engineering. Institute for problems in Machinery of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov 1995.

Being defended are 9 scientific works in which the method of modelling the ramified multi-element loops for heat transfer with the two-phase carrier has received a further development effort. This method in essence is in the representation of the loop as an equivalent hydrodynamic and thermal circuits integration whose idealized elements inherit the properties of real systems. Mathematical models developed on the basis of this method allow to solve two problems: calculation of the flow distribution and heat exchange in a two-phase loop (TPL) of a thermal control system (TCS) of the international space station (ISS) "ALPHA" and the analysis of the flow stability of a two-phase heat carrier in technological channels of power plants with reactors of the RBMK type. Theoretically calculated results allow to elaborate a complex of proposals directed to further improvement of functional characteristics of TRL TCS ISS "ALPHA" and insure flow stability of a two-phase heat carrier in an assembly of parallel stream generating channels.

АННОТАЦИЯ

Гакал П.Г. Моделирование теплообменных контуров с двухфазным теплоносителем систем терморегулирования и энергоустановок.

Диссертация является рукописью, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - теоретическая теплотехника. Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, 1995.

Защищается 9 научных работ, в которых получил дальнейшее развитие метод моделирования разветвленных многоэлементных контуров теплопереноса с двухфазным теплоносителем. Суть метода заключается в представлении контура в виде эквивалентных сопряженных гидродинамических и тепловых цепей, идеализированные элементы которых несут в себе внутренне присущие свойства реальных систем. На основе метода разработаны математические модели с помощью которых решено две задачи: расчет потокораспределения и теплообмена в двухфазном контуре (ДФК) системы терморегулирования (СТР) международной космической станции (МКС) "АЛЬФА" и анализ устойчивости течения двухфазного теплоносителя в технологических каналах энергетических установок с реакторами типа РБМК. Получены расчетно-теоретические результаты, позволяющие выработать комплекс предложений, направленных на улучшение функциональных характеристик ДФК СТР МКС "АЛЬФА" и обеспечение устойчивости течений двухфазного теплоносителя в сборке параллельных парогенерирующих каналов.

Ключові слова:

теплообмін, теплообмінні контури, система терморегулювання, двофазний теплоносій, хвиля густини, сталість.

454376

АВ 32.860

Відповідальний за випуск доцент Павленко Г.В.

Підп. до друку 190495р. . Формат 60x90 1/16

Папір друк. №1. Ум. друк. арк. 1,0. .

Обл.-вид. арк. 0,96. Тираж 100 пр. Зам. №82

Ротапринт Інституту проблем машинобудування НАН України.
310046, Харків 46, вул. Дм. Пожарського, 2/10.