

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ТЕНЯКОВ ИГОРЬ ЭДУАРДОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ КОНТУРОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА
СО СТРУИНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Специальность 05.14.05—теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.



00814099 (V)

Одесским авиационном институте

им. В. Е. Кутковского.

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Горбенко Г. А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Смирнов Г. Ф.
кандидат технических наук,
с. н. с. Ботук Ю. С.

Ведущая организация - Институт проблем машино-
строения АН Украины

Защита состоится 29 XI 1993г. в 11 часов на
заседании специализированного совета К. 068. 27. 01 при Одесском
институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу:
270100, Украина, Одесса, ул. Петра Великого, 1/3 - ученый совет
ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИНТЭ.

Автореферат разослан 29 XI 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета К. 068. 27. 01
доктор технических наук, профессор

Никольшин Р. К.

25 XI 1993 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. В системах отвода тепла и термостабилизации технологического оборудования, энергетических установок, биореакторов, приборов, ЭВМ, в системах кондиционирования жилых помещений и терморегулирования космических аппаратов используются контуры теплопереноса. Применение в контурах двухфазного теплоносителя вместо однофазного позволяет существенно снизить расход теплоносителя, уменьшить мощность прокачиваемого устройства, увеличить интенсивность теплоотдачи при кипении и конденсации, уменьшить разность температур между источником и стоком тепла, повысить точность термостабилизации объектов. Создание двухфазных контуров теплопереноса (ДФК) целесообразно для объектов с большим тепловыделением (десятки и сотни кВт) и значительным расстоянием теплопереноса (десятки и сотни метров).

Перспективным направлением является создание термоциркуляционных контуров (ТЦК) - пассивных контуров теплопереноса, циркуляция теплоносителя в которых осуществляется за счет реализации прямого термодинамического цикла. Такие контуры не требуют для своего функционирования посторонних источников энергии, обладают высокой автономностью. Для прокачки теплоносителя в ТЦК могут использоваться капиллярные, осмотические, струйные и другие типы насосов, которые не имеют подвижных частей и способны перекачивать насыщенный и слабонагретый теплоноситель. Это позволяет создавать высокоресурсные, надежные контуры теплопереноса.

При разработке ДФК возникают специфические задачи: устранение кавитации прокачиваемых устройств, разделение двухфазного потока по параллельным каналам, сепарация фаз, запуск контура из любого теплового состояния, выбор оптимальных способов и устройств регулирования и др. Необходимо разработать новые многофункциональные узлы, которые существенно расширяют возможности конструирования ДФК различного назначения.

Связь диссертации с указанными научно-техническими задачами определяет ее актуальность.

Цель работы: разработка метода расчета характеристик струйного сепарационного парожидкостного насоса (СПЖН) как многофункционального элемента контуров с двухфазным теплоносителем; выработка методики, позволяющей моделировать процессы в пассивном струйном разделителе двухфазного потока; экспериментальное

обоснование работоспособности альтернативных схем контуров теплопереноса со струйным сепарационным насосом и инжектором-конденсатором (ИК); расчетно-теоретическое обоснование работоспособности и эффективности перспективных схем контуров со струйными насосами для биотехнологической установки и системы терморегулирования (СТР) космического аппарата (КА).

В ходе выполнения работы автором получены следующие новые научные результаты, которые вносятся на защиту:

- экспериментальные данные по исследованию на фреонах струйного сепарационного парожидкостного насоса как многофункционального элемента контуров теплопереноса; методика расчета напорных и тепломассообменных характеристик насоса;

- методика математического и физического моделирования пассивного струйного разделителя двухфазного потока, результаты его экспериментального исследования;

- опытные характеристики контуров теплопереноса со струйным сепарационным насосом на фреоне-114 и инжектором - конденсатором на смеси фреон-113+ГЕМП; результаты их сравнительного анализа с расчетно-теоретическими данными;

- математические модели перспективных схем контуров теплопереноса со струйным сепарационным парожидкостным насосом для системы терморегулирования космического аппарата и системы термостабилизации биотехнологической установки; рекомендации по составу и компоновке, работоспособности, геометрии регулирующего органа.

Научное положение. Струйные элементы- струйный сепарационный насос, инжектор-конденсатор, струйный разделитель двухфазного потока могут использоваться как многофункциональные узлы двухфазных контуров теплопереноса, расширяющие возможность синтеза новых схем. Определенные экспериментальными и расчетно-теоретическими методами характеристики струйных элементов и контуров показывают целесообразность установки этих элементов в контуры теплопереноса систем терморегулирования. При этом расширяется диапазон работоспособности контуров, появляется возможность пассивного терморегулирования объектов, повышается надежность функционирования контуров на предельных тепловых нагрузках.

Практическая ценность и реализация результатов. На основе собственных экспериментальных исследований СПЖН на фреонах доработана математическая модель струйного сепарационного насоса,

что позволяет достоверно рассчитывать его напорные и теплообменные характеристики. Математическая модель насоса интегрирована в математическую модель контура, апробирована при сопоставлении расчетных и экспериментальных характеристик контуров со струйными насосами. В ходе экспериментов с контурами на фреонах получены рекомендации по их регулированию и улучшению характеристик. Эти результаты позволили прогнозировать эффективность применения термоциркуляционных контуров со струйным сепарационным насосом для термостабилизации космической станции и биотехнологической установки.

Автором предложена конструкция струйного пассивного разделителя двухфазного потока, методика его физического и математического моделирования. Разделитель целесообразно устанавливать в местах ветвления двухфазного потока перед сетью параллельных теплообменников: испарителей или конденсаторов.

Методики, математические модели, рекомендации по использованию струйных насосов, разделителя и термоциркуляционных контуров использованы при проектировании систем терморегулирования космических станций УКП и МИР-2 в НПО "Энергия" им. С. П. Королева, при разработке технических предложений по термостабилизации биотехнологической установки для высокотемпературной переработки стоков животноводства и птицеводства.

Достоверность и обоснованность предложенных в работе математических моделей, методик, рекомендаций подтверждается построением математических моделей на основе фундаментальных законов сохранения, сопоставлением расчетных результатов с собственными опытными данными по работе СПЖН, ТЦК и разделителя потока на рабочих телах воздух - вода, фреон-113, фреон-114, смеси фреона и антифриза.

По теме диссертации опубликовано 4 печатных труда. Результаты работы использованы при написании 5 научно - технических отчетов и монографии.*

Основные научные и прикладные результаты работы прошли апробацию на 8-й Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в

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

энергетических машинах и аппаратах" (Ленинград, 1990г.); Всесоюзном семинаре - совещании "Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов" (Крым, 1991г.); на научно-технических семинарах кафедры Теплофизических основ двигателестроения ХАИ в 1986...1992г.г.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, одного приложения. Основное содержание работы изложено на 186 стр. машинописного текста, включая 66 рисунков и 13 таблиц, списка литературы из 80 наименований, всего 219 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

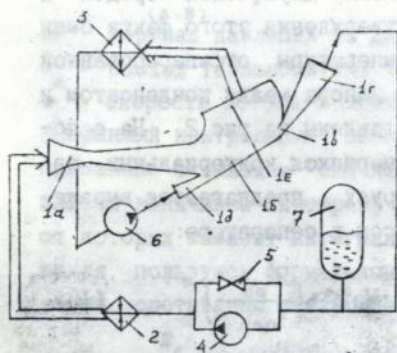
В первой главе анализируется состояние разработок контуров теплопереноса с двухфазным теплоносителем. В качестве приложения рассматриваются системы терморегулирования космических аппаратов. Выделяются задачи, которые необходимо решить на пути создания ДФК независимо от типа технических приложений. Среди них отмечаются: математическое и физическое моделирование СПЖН как многофункционального элемента ДФК; создание новой элементной базы (пассивного струйного разделителя двухфазного потока); разработка математических моделей новых элементов; выработка предложений по способам регулирования ТЦК и снижения температурного перепада в пределах контура.

Во второй главе проведен анализ имеющихся результатов по исследованию струйного сепарационного насоса, определены задачи его дальнейшего исследования как многофункционального элемента ДФК.

Принцип действия СПЖН ясен из рис.1. Двухфазный поток разгоняется в сопле 1а и сепарируется в центробежном сепараторе 1б. Высокоскоростной поток отсепарированной жидкости с незначительным содержанием пара восстанавливает давление в диффузоре 1г, и тем самым обеспечивается прокачка теплоносителя через испарительный теплообменник 2 на вход в двухфазное сопло СПЖН. Пар, попавший на выхлоп 1е, конденсируется в холодильнике 3 и с помощью дополнительного насоса 6 возвращается в СПЖН через сопло 1д. В рамках концепции ТЦК существуют схемы, в которых возврат конденсата в сепарационный насос осуществляется с помощью жидкостно-жидкостного инжектора, капиллярного или осмотического насосов.

СПЖН в двухфазных контурах может выполнять функцию смеси-

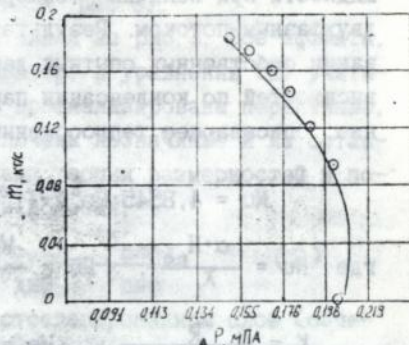
Термоциркуляционный контур со струйным
сепарационным насосом



1 - СПЖН: 1а-сопло, 1б-сепаратор, 1в-захватывающая щель,
1г-диффузор, 1д-сопло реинжекции, 1е-выхлоп; 2 - испари-
тель; 3 - конденсатор; 4 - пусковой насос; 5 - клапан;
6 - вспомогательный насос; 7 - гидроаккумулятор.

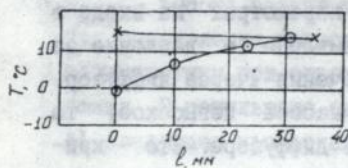
Рис. 1.

Допределенный режим течения в диффузоре СПЖН.



○ - эксперимент; — — расчет
Рис. 4.

Распределение температуры по длине сепаратора.



x - температура насыщения;
o - температура отсепарированной жидкости.

Рис. 2.

К выбору контрольного объема.

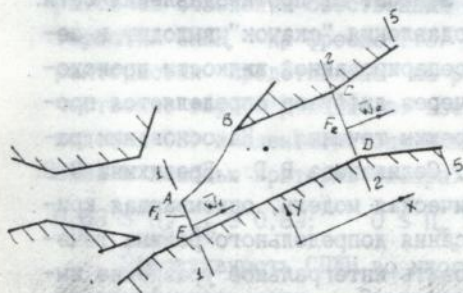
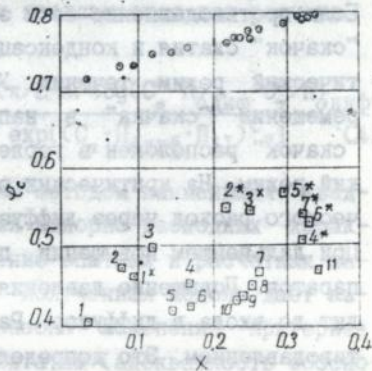


Рис. 3.

Зависимость коэффициента скорости сопла от
начального паросодержания.



□ - эксперимент ○ - теория
Рис. 5.

тельного теплообменника. Интенсивные тепломассообменные процессы протекают в сепараторе СПЖН между двухфазной средой и переохлажденным конденсатом. Для подтверждения этого факта были проведены эксперименты по замеру температуры отсепарированной жидкости при наличии температурного напора между конденсатом и двухфазным потоком. Результаты представлены на рис. 2. На основании собственных опытных данных и имеющихся критериальных зависимостей по конденсации пара на струях, предлагается выражение, описывающее теплообменные процессы в сепараторе:

$$Nu = 4,8545 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,45} \cdot K^{0,11} \cdot We^{0,4} \cdot \left(\frac{H_{pe}}{I_{con}} \right)^{0,6}, \quad (1)$$

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

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

При моделировании работы СПЖН в любом качестве необходимо рассчитывать напорно-расходную характеристику насоса во всем диапазоне изменения расхода. При фиксированных параметрах на входе в сопла 1а, 1д и постоянном давлении на выхлопе 1е давление за диффузором СПЖН 1г определяется режимом течения через диффузор. Если противодействие сети за диффузором насоса невысокое, то "скачок" сжатия и конденсации расположен в диффузоре. Это - критический режим течения. Увеличение противодействия ведет к перемещению "скачка" в направлении горла диффузора 1в. Когда "скачок" расположен в горле диффузора - это предельный критический режим. На критических режимах вплоть до предельного критического расход через диффузор не зависит от противодействия сети. При дальнейшем повышении противодействия "скачок" выходит в сепаратор. Повышение давления в отсепарированной жидкости происходит до входа в диффузор. Расход через диффузор определяется противодействием. Это допредельный режим течения. На основании работ Фролова С. Д., Горбенко Г. А., Селиванова В. Г., Бредихина В. В. и других уже разработана математическая модель, описывающая критические режимы течения. Для описания допредельного режима течения автором предлагается использовать интегральное уравнение импульсов:

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

где $\Delta I = \int_{(A-B)} (P-P_1) \cdot \cos(\vec{n} \cdot \vec{x}) + \rho \cdot |w_n| \cdot |w_x| \cdot dF$

ΔP - перепад давления на диффузоре;

m_2 - расход теплоносителя через диффузор;

w_1 - скорость потока в сечении 1-1 (см. рис. 3).

Выборанный контрольный объем представлен на рис. 3. Все эффекты, связанные с выходом "скачка" в сепаратор, в уравнении (2) учитываются величиной интеграла ΔI . Были проанализированы переменные, от которых зависит интеграл ΔI , исключены незначимые и из оставшихся, пользуясь формальными правилами теории размерностей и подобия, составлены следующие критерии подобия:

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

где $m_{1,1}$ - расход только жидкости в отсепарированном слое (сечение 1-1 рис. 3);

$\delta'_{\text{слоя}}$ - толщина отсепарированного слоя в сечении 1-1 при нулевом паросодержании;

$\sigma_{\text{диф}}$ - высота захватывающей щели диффузора.

Для определения зависимости $F(P_{m_2}, P_{\Delta I}, P_{\sigma_{\text{диф}}}) = 0$ исследованы ее асимптотики при стремлении критериев к границам области определения. В результате сконструировано и предлагается для расчета ΔI следующее критериальное уравнение:

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

Постоянные коэффициенты C_1 подобраны методом наименьших квадратов на основании собственных опытных напорно-расходных характеристик СПЖ на фреоне-113. Сравнение опытных и расчетных характеристик представлено на рис. 4. Полученная модель дает качественно верное решение во всем диапазоне изменения критериев подобия (3) и адекватна опытным результатам (адекватность обоснована с помощью критерия Фишера) в следующем диапазоне:

$$0,63 \leq P_{\sigma_{\text{диф}}} \leq 0,83; \quad 0 \leq P_{m_2} \leq 1; \quad 0 \leq P_{\Delta I} \leq 0,8.$$

Эффективность СПЖ во многом определяется работой разгонного двухфазного сопла. Предварительные расчеты показали, что сопло насоса должно иметь малый угол раскрытия диффузорной части и работать на режимах близких к критическим. Для определения

эффективности сопла, имеющего нулевой угол раскрытия диффузорной части и работающего на нетрадиционном теплоносителе - фреоне-113, были проведены эксперименты по определению коэффициента скорости. Результаты представлены на рис. 5. Для сравнения коэффициент скорости рассчитан по предложенной в работе "Адиабатные двухфазные течения" (авторы: Циклаури В. Г., Данилин В. С., Селезнев Л. И.) эмпирической зависимости:

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

Как видно из рисунка 5 имеются значимые параметры, неучтенные в выражении (5).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований термоциркуляционных контуров с СПЖН и ИК, результаты сравнения опытных и расчетных характеристик.

Испытания струйных насосов выполнены на стенде ЭУ-626 в НПО "Энергия". Получены опытные характеристики комбинированного контура теплопереноса (рис. 1.). В нем прокачка теплоносителя по горячей петле осуществлялась СПЖН, а по холодной петле - вспомогательным электромеханическим насосом. Работа ДФК исследована при постоянной заправке теплоносителем и неизменном объеме контура на режимах с переменным теплоподводом со стабилизацией условий теплоотвода. Подводимая мощность изменялась от 4,5 до 7,5 кВт. Рост теплоподвода ведет к увеличению температуры теплоносителя за парогенератором. Предложены и проведена экспериментальная проверка способов стабилизации температуры теплоносителя в парогенераторе при переменном теплоподводе. Предлагается:

- изменять количество теплоносителя или объем ДФК;
- изменять гидравлическое сопротивление петли конденсации;
- использовать совместно первый и второй способы.

Проведено сопоставление опытных характеристик комбинированного ДФК с расчетными. Теоретические характеристики получены на основании модели, предложенной Горбенко Г. А., Файрузовым Ю. В., с учетом реальных гидравлических сопротивлений ДФК и при использовании модели СПЖН, доработанной автором. Результаты сравнения демонстрируют хорошее соответствие опыта и теории.

На базе ИК экспериментально реализована концепция ТЦК (М. А. Беспятов, В. В. Бредихин, Г. А. Горбенко). Имеются модели, прогнозирующие работу ТЦК с ИК и описывающие теплофизические процессы в проточной части инжектора (Селиванов В. Г., Севастьянов А. П., Бредихин В. В. и другие). Поэтому в настоящее время

применительно к СТР космических аппаратов актуальна задача снижения перепада температур в ТЦК с ИК. Для ее решения предлагается использовать двухфазный двухкомпонентный теплоноситель. Получены экспериментальные характеристики ТЦК с ИК, работающего на смеси фреона-113 и ТЕМПа (теплоноситель типа антифриз 20). Двухфазный фреоновый поток разгоняется в сопле, а холодный ТЕМП подается в камеру смешения ИК через форсунки. Более высокая теплоемкость жидкого ТЕМПа по сравнению с фреоном-113 позволяет снизить перепад температур в контуре. При использовании двухкомпонентного теплоносителя увеличивается предельный напор ИК и термический КПД цикла преобразования энергии по сравнению с ИК, работающим на легкокипящем компоненте.

В опытах со смесью фреона-113 и ТЕМПа разность температур в ТЦК с ИК составила $\Delta T \sim 31^\circ\text{K}$. Для сравнения на фреоне-113 эта разность составила $\Delta T \sim 54^\circ\text{K}$. Предложены и экспериментально проверены способы термостабилизации испарительного теплообменника такие же, как и для комбинированного контура с СПЖН.

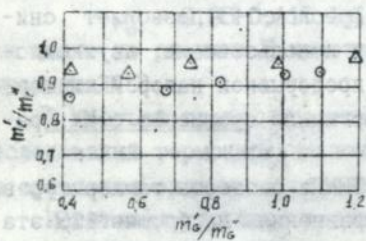
В четвертой главе приводятся результаты разработки, математического и физического моделирования разделителя двухфазного потока, обеспечивающего деление только расхода жидкой фазы в заданной пропорции при переменном гидравлическом сопротивлении сетей за ним. Установка такого разделителя перед сетью параллельных теплообменников (испарителей, конденсаторов) позволяет избежать отрицательных эффектов, связанных с сепарацией потока (этой проблеме посвящены работы R. Lahey, Горбенко Г. А. и др.).

Конструкция струйного разделителя двухфазного потока, обеспечивающего пассивное деление только расхода жидкой фазы в заданной пропорции, представлена на рис. 6. Разделитель выполняет свои функции при кольцевом режиме течения двухфазного потока на входе в него. В сечении 1-1 разделительная пластина 4 делит жидкую фазу в заданном отношении. Сечение 1-1 выбирается из условия однородности кольцевого потока, жидкости. Между сечениями 1-1 и 2-2 формируется неоднородное поле давления поперек потока. Под его действием жидкость стремится перетечь в сектор с более низким давлением. Однако разделительная пластина препятствует перетеканию пристенного слоя вплоть до входа в патрубки 1 и 2. Распределение пара осуществляется под действием реализуемых перепадов давления.

Проверка работоспособности разделителя проводилась на водо-

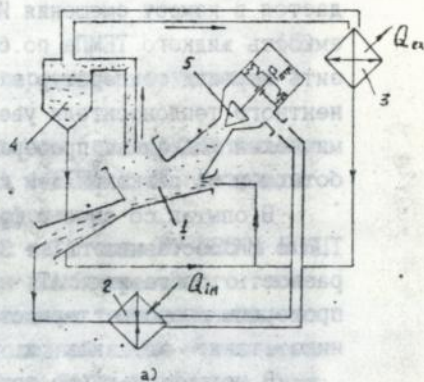
Перолевитивные схемы ДФК с СПДЖИ

Характеристика разделителя

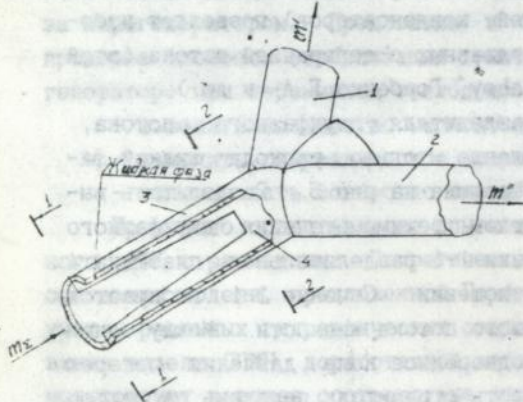


○ - $x = 0.44$; $m_{\Sigma} = 11.3 \cdot 10^{-3}$ кг/с.
 △ - $x = 0.53$; $m_{\Sigma} = 7.6 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Рис. 7.

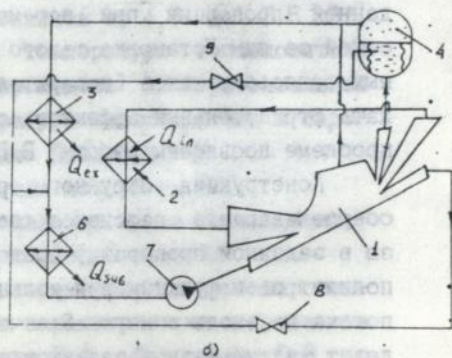


Разделитель двухфазного потока



1, 2 - выходные патрубки; 3 - входной патрубок;
 4 - делительная пластина.

Рис. 6.



1 - СПДЖИ; 2 - испаритель; 3 - конденсатор;
 4 - гидроаккумулятор; 5 - регулировочная игла;
 6 - переохладитель; 7 - насос; 8 - регулятор
 расхода; 9 - дроссель.

Рис. 8

-воздушной среде. В экспериментах изменялось гидравлическое сопротивление сети за одним из выходных патрубков разделителя. Как видно из рис. 7, изменение отношения расходов воздуха m'_G/m''_G в выходных патрубках практически не влияет на отношение расходов воды m'_1/m''_1 в выходных патрубках.

Получен набор критериев подобия, характеризующий работу разделителя:

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

С помощью критериев подобия (6) опытные результаты с модельным рабочим телом (вода-воздух) переносились на штатную систему терморегулирования УКП (теплоноситель - аммиак). В УКП планируется установка разделителя потока перед сетью радиационных конденсаторов. На основании полного факторного эксперимента типа 2^4 получены математические модели в форме регрессионной зависимости двух типоразмеров разделителей двухфазного потока. Независимыми факторами, которыми варьировали во время проведения опытов, являлись: расход воды m_1 ; расход воздуха m_G ; отношение расхода воздуха по каналам на выходе из разделителя m'_G/m''_G ; угол установки разделителя по отношению к вектору силы тяжести α .

Разработанная методика математического и физического моделирования позволила доказать работоспособность разделителя в условиях микрогравитации.

Пятая глава посвящена расчетно-теоретическому исследованию перспективных контуров теплопереноса на основе СПЖН.

Решение проблемы термостабилизации биореактора технологической установки переработки стоков животноводства и птицеводства возможно при использовании пассивного ДФК, представленного на рис. 8а). Он способен с высокими точностью и надежностью поддерживать температуру в охранным нагревателе биореактора (в схеме это конденсатор 3) при переменном теплоподводе, температуре атмосферного воздуха и греющих топочных газов. В своем составе контур имеет два оригинальных элемента, в основном благодаря которым осуществляется пассивное терморегулирование. Это СПЖН с регулируемой площадью горла двухфазного сопла и испарительный теплообменник 2, в котором теплоподвод зависит от расхода теплоносителя. Автором разработана математическая модель испарительного теплообменника и контура в целом. Рассчитаны характеристики ДФК и зависимость площади горла двухфазного сопла СПЖН от коли-

чества тепла, переносимого контуром $F_{кр} = f(Q)$. Функциональная зависимость $F_{кр} = f(Q)$ позволяет спроектировать пассивный узел, регулирующий площадь горла сопла, а характеристики подтверждают работоспособность ДФК.

На основании анализа имеющихся и разрабатываемых систем терморегулирования КА с двухфазным теплоносителем Горбенко Г. А., Никоновым А. А., Прохоровым Ю. М., Цихоцким В. М. (САИ, НПО "Энергия") предложена перспективная схема контура теплопереноса для терморегулирования КА (рис. 8 б)). Высокую надежность системы во всем диапазоне тепловых нагрузок обеспечивает сепарационный парожидкостный насос с тремя диффузорами и гидроаккумулятор с паровой полостью. В сепараторе СПЖН будут протекать интенсивные тепломассообменные процессы, а как минимум один диффузор будет работать на допредельном режиме. Критериальное уравнение, описывающее тепломассообменные процессы в сепараторе СПЖН, и математическая модель допредельного режима течения в диффузоре насоса, полученные автором, позволяют обосновать работоспособность и рассчитать характеристики предложенной схемы. Чтобы приблизить характеристики ДФК к реальным характеристикам СТР КА в качестве прототипа конденсатора-радиатора использован реальный конденсатор с капиллярным отсосом, предложенный Valenzuela J., Drew B. Проведена физическая схематизация процесса в конденсаторе и подсистеме конденсатор-излучатель, разработана математическая модель. На основании обобщенных законов Кирхгофа для разветвленных пневмогидравлических контуров получена система уравнений, описывающая статические характеристики ДФК. Система уравнений решалась численно, методом Ньютона. На основании полученных характеристик доказана работоспособность предлагаемой схемы в диапазоне тепловых нагрузок от 7 до 40 кВт. Используемый теплоноситель - аммиак. Рассчитана зависимость, позволяющая подобрать или спроектировать пассивный регулятор расхода 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Математическая модель струйного сепарационного насоса позволяет достоверно рассчитывать его характеристики как многофункционального элемента двухфазного контура теплопереноса.

2. Регулирование контуров со струйными насосами с целью стабилизации температуры теплоносителя в испарителях возможно за счет изменения массы теплоносителя в контуре, дросселирования

петли конденсации, совместно первым и вторым способами.

3. Использование вместо однокомпонентного (фреон-113) двухкомпонентного теплоносителя в виде смеси фреона-113 и антифриза "ТЕМП" позволяет снизить перепад температур в контуре с инжектором-конденсатором между источником и стоком тепла с 54°C до 31°C .

4. Предложенная конструкция струйного пассивного разделителя двухфазного потока позволяет разделять расход жидкой фазы в заданной пропорции независимо от гидросопротивления сети за разделителем. Разделитель целесообразно устанавливать в местах ветвления двухфазного потока перед параллельными каналами теплообменников (испарителей или конденсаторов), что повышает надежность их работы.

5. На основе струйного сепарационного насоса можно предложить конкурентоспособные двухфазные контуры теплопереноса, которые пассивным образом термостабилизируют объекты при переменных внешних условиях теплоподвода и перепаде температур между источниками и стоками тепла единицы градусов.

Результаты работы, а именно: математические модели СПЖН и двухфазного контура с СПЖН, струйного разделителя потока, экспериментальные и расчетные данные по их характеристикам использованы в НПО "Энергия" им. С. П. Королева при проектировании систем терморегулирования космической станции МИР-2 и Универсальной Космической Платформы; в НПО "Экология человека" при обосновании технических предложений по высокотемпературной биотехнологической установке переработки стоков животноводства и птицеводства.

Элементы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре Теплофизических основ двигателестроения ХАИ.

Основные обозначения: a - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; C - удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; F - площадь, м^2 ; F_g - число Фруда; H_{re} - высота сопла реинжекции, м ; K - критерий подобия; $l_{\text{сеп}}$ - длина сепарирующей поверхности, м ; m - секундный расход, $\text{кг}/\text{с}$; P - давление, Па ; P_g - число Прандтля; R - теплота фазового перехода, $\text{Дж}/\text{кг}$; Re - число Рейнольдса; Q - тепловая мощность, Вт ; We - число Вебера; w - скорость, $\text{м}/\text{с}$; x - массовое паросодержание; α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$; σ - коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$; μ - динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ν - кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$.

Индексы: l (liquid) - жидкость; v (vapour) - пар.

Сокращения: ВУРЖ - вращающееся устройство разделения и перекачивания жидкости; ДФК - контур теплопереноса с двухфазным теплоносителем; ИК - инжектор-конденсатор; КА - космический аппарат

АН Украины

464622

СПДЖН - струйный сепарационный насос; тема терморегулирования; ТЕМП - термометрический прибор "Фриз-20"; ТЦК - термоциркуляционная контур; УКИ - универсальная космическая платформа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

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 НТИ 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.