

Харьковский авиационный институт
им. Н. Е. Жуковского

На правах рукописи

ФАИРУЗОВ КРИИ ВАЛЕРЬЕВИЧ

УДК: 629.78.048.7-716

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА С ДВУХФАЗНЫМ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Специальности: 05.07.05 - тепловые двигатели летательных
аппаратов;
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.



Харьков - 1992г.

020 26.353

Работа выполнена на кафедре теплофизических основ двигателестроения Харьковского авиационного института им. Н. Е. Жуковского.

Научный руководитель:

кандидат технических наук Г. А. Горбенко

Научный консультант:

кандидат технических наук В. Н. Блинков.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, вед. научн. сотр. К. В. Безручко

кандидат технических наук, доцент Л. В. Гончаренко

Ведущая организация - Научно-Производственное Объединение "Южное" (г. Днепропетровск)

Защита состоится 29 января 1993г. в 14 часов в ауд. 427 главного корпуса на заседании специализированного совета Д 053.14.02 в Харьковском авиационном институте (310070, Харьков, ул Чкалова 17).

Просим принять участие в обсуждении диссертации или прислать отзыв на автореферат, заверенный печатью.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского авиационного института

Автореферат разослан 28 декабря 1992г.

Ученый секретарь

специализированного совета Д 053.14.02

кандидат технических наук, доцент *Г. Л. Корнилов*

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816990 (X)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. В системах конвективного охлаждения и терморегулирования двигателей и энергетических установок летательных аппаратов используется двухфазный теплоноситель. В одних случаях, например, в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов, в контурах охлаждения ядерных и солнечных энергоустановок применение двухфазного кипящего теплоносителя позволяет существенно интенсифицировать теплообмен. В других - например, в контурах маслосистем авиадвигателей, наличие двухфазного газожидкостного потока является фактором, способным качественно изменить характер течения и теплообмена, что обязательно необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации двигателей.

Контур теплопереноса с двухфазным теплоносителем является сложными техническими системами, синтез которых становится существенно продуктивнее при использовании адекватных математических моделей. Большое значение математического моделирования определяется как сложность термогидродинамических процессов, имеющих место в контурах с двухфазным теплоносителем, так и наличием большого числа новых элементов (испарителей, конденсаторов, сепараторов, струйных насосов, гидроаккумуляторов и др.), которые ранее не применялись в однофазных контурах теплопереноса. Потребность в математическом моделировании и расчетном анализе контуров возникает при выборе рационального схемного решения, анализе характеристик контуров при переменных внешних воздействиях, определении диапазона работоспособности, прогнозировании поведения системы в переходных процессах пуска, останова, изменения тепловой нагрузки, в аварийных ситуациях. Для решения перечисленных задач необходимо создавать свои математические модели и программы. За рубежом существует большое количество программ для моделирования СТР, тем не менее NASA пользуется своими программами, ESA - своими. Если не придавать этому фактору значения, то Украина и СНГ потеряют свои позиции в указанной области.

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

Целью работы является построение эффективных и достоверных математических моделей контуров теплопереноса с двухфазным тепло-

носителем для описания квазистационарных и нестационарных процессов в нем; анализ конкретных схем контуров, перспективных для использования в энергоустановках и системах терморегулирования космических аппаратов; выработка рекомендаций для проектирования и регулирования двухфазных контуров теплопереноса (ДФК).

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

- методика моделирования стационарных и нестационарных термодинамических процессов в многоэлементных теплообменных контурах с двухфазным теплоносителем, основанная на представлениях об идеализированных элементах;

- математические модели, реализующие эту методику в виде двух "быстрых" программ, позволяющих выполнять расчеты стационарных и нестационарных характеристик различных типов контуров на персональных компьютерах с приемлемыми затратами машинного времени;

- рекомендации по проектированию, организации процедур запуска и регулирования двухфазных контуров теплопереноса с механическим насосом для систем терморегулирования перспективных космических аппаратов с большим тепловыделением;

- результаты исследования характеристик термоциркуляционных контуров со струйными насосами (контуров, реализующих прямой термодинамический цикл), в которых определены диапазон их работоспособности и рациональные законы регулирования.

Практическая ценность и реализация результатов. Разработанная методика может быть полезна при расчете и анализе характеристик контуров с двухфазным теплоносителем для энергетических и биотехнологических установок, маслосистем авиадвигателей, систем терморегулирования (СТР) космических аппаратов. Программы и результаты исследования термоциркуляционных контуров со струйными насосами и ДФК с механическими насосами использованы в НПО "Энергия" им. С. П. Королева при выполнении поисковых работ и проектов космических аппаратов МИР-2 и Универсальная Космическая Платформа (УКП). Методика расчета контуров используется также в учебном процессе на кафедре Теплофизических основ двигателестроения ХАИ.

Достоверность и обоснованность предложенных в работе моделей, методик и рекомендаций подтверждается построением моделей на

основе фундаментальных законов сохранения, контрольными расчетами автора, экспертной оценкой специалистов НПО "Энергия", сопоставлением результатов с экспериментальными данными.

По теме диссертации опубликовано 3 печатных труда. Результаты работы использованы при написании 5-ти научно-технических отчетов и монографии: А. А. Никонов, Г. А. Горбенко, В. Н. Блинов. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. -М.: Центр НТИ "Поиск". Сер.: Ракетно-космическая техника, машиностроение. 1991, -302с.

Основные научные и прикладные результаты работы прошли апробацию на: 8-й Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (Ленинград, 1990г.); Всесоюзном совещании "Современные проблемы аэрогидродинамики" (Крым, 1989г.); межотраслевом 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 и заключения. Основное содержание работы изложено на 94 стр. машинописного текста, включая 35 рисунков и 5 таблиц, списка литературы из 71 наименований, всего 132 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность выбранной научно - технической задачи, формулируется цель работы и обстоятельства, определяющие научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

В первой главе анализируется состояние разработок двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов, выделяются задачи, которые необходимо решить на пути создания штатных систем.

До настоящего времени СТР космических аппаратов имели однофазные конвективные системы теплопереноса. Однако рост тепловыделения на борту до десятков и сотен кВт подвел к необходимости разработки двухфазных конвективных систем теплопереноса. Их преимуществами являются: существенно меньший расход теплоносителя; небольшие затраты электрической мощности на его прокачку; высокие коэффициенты теплоотдачи при испарении и конденсации, воз-

возможность конструирования пассивных контуров теплопереноса. Так, S. Ollendorf, J. Rankin показали, что двухфазные контуры (ДФК) теплопереноса с капиллярной и насосной прокачкой имеют многократное преимущество над однофазным по мощности насоса, удельному коэффициенту переноса теплоты, массе и др. начиная с единиц кВт.

Активные разработки двухфазных СТР начаты в СССР, США, Европейском Космическом Агенстве (ESA) начиная с конца 70-х годов в связи с планами создания больших космических платформ. Так, в США в рамках реализации проекта космической станции Freedom параллельно разрабатываются три варианта двухфазных контуров с насосной прокачкой теплоносителя. Они отличаются составом элементной базы и гидравлической схемой. В ДФК фирмы Guplan теплоноситель прокачивается центробежным насосом, а регулирование расхода на параллельно включенные термоплаты происходит активным образом специальными клапанами по сигналам от датчиков паросодержания. В ДФК фирмы Lockheed регулирование осуществляется пассивным методом за счет использования капиллярных эффектов. Сердцевинной контура фирмы Boeing и Sundstrand является многофункциональный вращающийся узел разделения и перекачивания жидкости (ВУРЖ). Пассивные системы терморегулирования могут быть созданы на основе термоциркуляционных контуров (ТЦК). В них реализуется прямой термодинамический цикл Ренкина, поэтому они являются по существу, тепловыми машинами, полезная работа которой затрачивается только на прокачку теплоносителя. В США, ESA, СНГ активно разрабатываются ТЦК с капиллярной прокачкой (С. Вауп, Ю. Ф. Майданик и др.). НПО "Энергия" и ХАИ (С. Д. Фролов, А. А. Никонов, Г. А. Горбенко и др.) предложили использовать более высоконапорные ТЦК на основе струйных преобразователей энергии (инжекторов-конденсаторов, сепарационных насосов). ТЦК с сепарационным насосом приведен на рис. 1. В ESA и НПО "Энергия" в последние годы ориентируются на комбинированные схемы контуров: ТЦК + насосные.

Окончательный выбор типа ДФК индивидуален для конкретного приложения и должен основываться на анализе набора критериев оценки (масса, надёжность, ресурс, точность термостабилизации, габариты и геометрия, возможность испытаний на Земле, диапазон работоспособности, стоимость и т. д.). В то же время тенденции развития СТР вполне определены в ведущих космических центрах мира

и выражаются в следующем: использование двухфазного теплоносителя; минимальное электропотребление на собственные нужды; пассивное регулирование; высокая точность термостабилизации; нечувствительность системы к перераспределению тепловой нагрузки; использование прямоточных теплообменников и теплообменников с капиллярной структурой, теплоносителя-аммиака.

В ДФК СТР реализуется широкий спектр гидродинамических и тепломассообменных процессов. Ситуация осложняется работой системы как в невесомости, так и на Земле, необходимостью прогнозирования поведения системы в многочисленных переходных процессах и анализа нештатных ситуаций. При разработке новых СТР используются два направления моделирования - математическое и физическое. Оба направления осуществляются на уровнях элементной базы (при разработке теплообменников - испарителей и конденсаторов, термоплат, радиационных теплообменников, арматуры, ограничителей расхода, струйных насосов, тепловых и гидроаккумуляторов и т. д.) и интегрированных многоэлементных систем.

Основу для разработки эффективных математических моделей составляют фундаментальные результаты, полученные в последние десятилетия в механике гетерогенных сред и теории пневмогидравлических цепей (Р. И. Нигматулин, Б. Ф. Гликман). Математические модели различных иерархических уровней должны поставлять информацию для принятия рациональных проектировочных и эксплуатационных решений, прогнозировать характеристики (стационарные и нестационарные) спроектированной системы, сопровождать работу системы в реальном масштабе времени. Наличие достоверных математических моделей позволяет уменьшить количество физических экспериментов, а также получать данные для построения и проверки более простых (регрессионных) моделей. В США в последние 5-6 лет разработан ряд машинных программ (SINDA, FLUINT, BETA, CINDA, MITAS, FLOSIN, FLUIDNET) для расчета тепловых и гидродинамических процессов в конструкции и теплоносителе. Однако они недоступны пользователям в СНГ, ориентированы на конкретные схемы контуров, не имеют в своем составе таких элементов, как струйные преобразователи энергии.

Физическому моделированию ДФК в целом обычно предшествуют подробные экспериментальные исследования элементов, а на их

основе создаются интегрированные многоэлементные макеты, приближенные к штатным системам по составу элементной базы и основным параметрам. Цели физического моделирования ДФК СТР таковы: провести сравнительную оценку вариантов СТР; поставить экспериментальный материал для оценки и уточнения математических моделей; изучить влияние на работу системы ослабленности гравитационного поля (в летных испытаниях); и др.

Формулированию основных задач по исследованию ДФК были посвящены ряд международных семинаров в 1988...1991г.г. в СССР и за рубежом. Среди важнейших проблем назывались: создание новой элементной базы; усовершенствование математических моделей и др.

На основе выполненного обзора автором сформулированы следующие научно-технические задачи настоящей работы, решение которых содействует созданию двухфазных контуров теплопереноса с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов: разработка эффективных и достоверных математических моделей, методик и программ расчета характеристик теплообменных контуров; выполнение комплекса расчетов стационарных характеристик ДФК СТР различных типов с целью определения областей работоспособности, выбора законов регулирования, выработки рекомендаций в отношении схемных решений и состава элементной базы; численный анализ нестационарных характеристик прототипа аммиачной насосной двухфазной СТР Универсальной Космической Платформы, выработка рекомендаций в отношении процедуры запуска и прогноз поведения системы в некоторых переходных режимах.

Вторая глава посвящена методике математического моделирования термогазодинамических процессов в ДФК, построенная на основе разработанных В.Н.Блинковым общих подходов. В их основе лежат фундаментальные понятия теории цепей - эквивалентная цепь, идеализированные элементы, обобщенные законы Кирхгофа. Реальные элементы систем моделируются идеализированными элементами, несущими в себе свойства разнообразных реальных элементов контуров теплопереноса с двухфазным теплоносителем (способность аккумулировать массу и энергию теплоносителя, гидросопротивление, механическую и тепловую инерцию и т.д.). Оригинальным идеализированным элементом является конечный контрольный объем с подвижной границей заки-

пания (конденсации), введение которого позволяет существенно упрощать эквивалентные гидродинамические цепи при моделировании систем с испарителями и конденсаторами. Нестационарная модель системы включает гидродинамическую и тепловую подмодели, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями законов сохранения и решаемые единым численным методом.

Номенклатура этих идеализированных элементов разработана автором применительно к конкретным моделируемым объектам и включает контрольные объемы и ветви для гидродинамической подмодели, тепловые узлы и проводники для тепловой подмодели. Контрольные объемы описываются уравнениями законов сохранения массы и энергии, ветви переносят массу и энергию между контрольными объемами и описываются уравнениями закона сохранения импульса. В конечном контрольном объеме возможно накопление массы и энергии. Конечный контрольный объем с подвижной границей закипания моделирует обогреваемый элемент контура, частично заполненный жидкостью, а частично - двухфазной смесью. Конечный контрольный объем с подвижной границей конденсации моделирует элемент с отводом теплоты, приводящим к конденсации теплоносителя. Бесконечно малый контрольный объем мгновенно реагирует на любые изменения массы и энергии и описывается уравнениями стационарных балансов. Бесконечно большой контрольный объем моделирует идеальные гидроаккумуляторы и граничные условия в разомкнутых контурах.

Основные уравнения для описания конечного контрольного объема:

$$\frac{dM_K}{dt} = \sum m_j, \quad M_K = \rho_K \cdot V_K, \quad (2.1)$$

$$\frac{dU_K}{dt} = \sum m_j \cdot i_j + q_{w-f,K} \cdot F_{w,K} + L_t, \quad U_K = u_K \cdot M_K \quad (2.2)$$

$F_{w,K}$ - поверхность теплообмена стенка-поток, м²; L_t - техническая работа, Дж/с; k - индекс контрольного объема, j - индекс ветви.

Конечный контрольный объем с подвижной границей закипания:

$$F_K \cdot \frac{d}{dt} [\rho_{1p} \cdot z_b + \rho_{2p} \cdot (L_K - z_b)] = m_{j-1} - m_j, \quad (2.3)$$

$$F_K \cdot \frac{d}{dt} [\rho_{1p} \cdot u_{1p} \cdot z_b + \rho_{2p} \cdot u_{2p} \cdot (L_K - z_b)] = m_{j-1} \cdot i_{j-1} -$$

$$- m_j \circ i_j + q_{w-f, k} \circ F_{w, k} \quad (2.4)$$

$$i_j = i_K \quad \text{при } m_j > 0, \quad i_j = i_{K+1} \quad \text{при } m_j < 0,$$

u_{1p} - среднее значение удельной внутренней энергии жидкости на экономайзерном участке (1p - однофазный), u_{2p} - среднее значение удельной внутренней энергии смеси на испарительном участке (2p - двухфазный), z_b - протяженность экономайзерного участка, м.

Течение в трубе описывается уравнением:

$$\frac{dm_j}{dt} = \frac{F_{K_0}}{L_{K_0}} (P_K - P_{K+1} - F_j \circ m_j \circ |m_j| + \Delta P_p + \Delta P_a + \Delta P_g) \quad (2.5)$$

Здесь ΔP_p , ΔP_a , ΔP_g - напор насоса, потери давления на ускорение потока и гравитационные потери давления соответственно. В уравнениях энергии из-за малости опущен член, определяющий изменение кинетической энергии. Источниковые члены в уравнениях рассчитываются в отдельных модулях, отражающих индивидуальность конкретной задачи и допускающих выбор корреляций пользователем. Если гидродинамическая цепь состоит из N_v контрольных объемов и N_p ветвей, то размерность вектора решения и количество уравнений составляют $2 \cdot N_v + N_p$. При этом система обыкновенных дифференциальных уравнений является замкнутой, а ее решение в любой момент времени обеспечивает выполнение контурных законов сохранения (обобщенных законов Кирхгофа) во всех узлах и внутренних контурах гидродинамической цепи. Система уравнений записывается в матричной форме, расположение и число элементов матриц коэффициентов определяются конфигурацией гидродинамической цепи. Тепловое состояние элементов конструкции и оборудования, его теплообмен с теплоносителем и окружающей средой описывается тепловой подмоделью. Тепловая подмодель основана на дифференциальных уравнениях энергии для тепловых узлов - элементов конструкции. Тепловой поток q_{w-f} моделируется элементом "проводник" и определяется законами Фурье, Ньютона - Рихмана или Стефана - Больцмана в зависимости от способа теплообмена. Для сведения этой системы к системе дифференциальных уравнений служит подпрограмма, разрешающая итеративным методом систему алгебраи-

ческих уравнений и формирующая правые части для системы дифференциальных уравнений. Решение последней выполняется в два этапа. На первом этапе система в матричной форме разрешается относительно производных искоемых переменных, в результате получается система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме. Второй этап состоит собственно в интегрировании дифференциальных уравнений. В результате тестирования различных численных методов для расчета нестационарных характеристик ДФК выбран численный метод Гира, рекомендуемый для решения жестких систем уравнений.

Выбор представительного количества контрольных объемов и ветвей является самостоятельной задачей, подлежащей решению при моделировании каждой конкретной системы в зависимости от характера происходящих в ней процессов. В частности, при исследовании колебательных режимов, размер элементов с сосредоточенными параметрами должен быть много меньше длины распространяющихся в системе волн. При построении эквивалентных цепей, учитывая вышесказанное, автор исходил из следующего: решение должно практически не зависеть от числа используемых идеализированных элементов.

Для описания стационарных состояний ДФК используется стационарная математическая модель, которая представляет собой систему нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$F(\bar{x}) = 0, \quad (2.6)$$

где \bar{x} - вектор искоемых внутренних параметров.

Стационарная математическая модель используется для: нахождения стационарного распределения параметров в контуре, определения исходных данных для проектирования элементов; оптимизации параметров или геометрии элементов по показателям эффективности всей системы; выбора наиболее эффективного теплоносителя; определения величины заправки и объема гидроаккумулятора; определения квазистатических характеристик ДФК; выбора рациональных законов регулирования и способов их реализации; определения диапазона работоспособности ДФК и причин, ограничивающих работоспособность; нахождения начальных распределений параметров СТР, которые необходимы при исследовании переходных

режимов работы с помощью нестационарных моделей.

Система уравнений (2.6) может быть получена из нестационарной модели путем обнуления производных по времени в уравнениях (2.1, 2.2, 2.5). Однако, если формальным путем приравнять нулю правые части уравнений (2.1), то теряется уравнение для определения массы теплоносителя в системе, а одно из уравнений типа $\sum m_j = 0$ является лишним, так как является следствием всех остальных. Поэтому "к" уравнений 2.1 в стационарном случае необходимо представить в виде $k-1$ уравнений типа

$$\sum m_i = 0 \quad (2.7)$$

и одного уравнения

$$\frac{dM}{dt} = 0 \rightarrow M = \text{const}, \quad (2.8)$$

которое определяет постоянство суммарной массы теплоносителя в закрытой системе.

Существенное уменьшение числа переменных и уравнений путем подстановки не всегда возможно из-за их трансцендентного вида. В этом случае может оказаться эффективным подход к составлению стационарной математической модели путем непосредственной записи обобщенных законов Кирхгофа для узлов и независимых контуров гидродинамической цепи в стационарной форме. Кроме этого в систему уравнений включают: уравнения баланса энергии для ветвей; уравнения теплоотдачи в теплообменниках; уравнения, связывающие перепады давления в ветвях с расходами в них; уравнение состояния теплоносителя; уравнение, описывающее гидроаккумулятор.

Последнее уравнение, совместно с уравнением сохранения массы заправленного теплоносителя (2.8) определяет, по существу, закон регулирования ДФК как закрытой системы. Возможен и другой подход. Гидроаккумулятор не включается в состав элементов ДФК. В этом случае система становится открытой, с переменным количеством заправленного теплоносителя. Поэтому для замыкания системы уравнений привлекают какое-либо уравнение закона регулирования, а количество заправленного теплоносителя в этом случае является искомой величиной.

По поводу необходимости экспериментальной апробации стационарной математической модели ДФК можно отметить следующее.

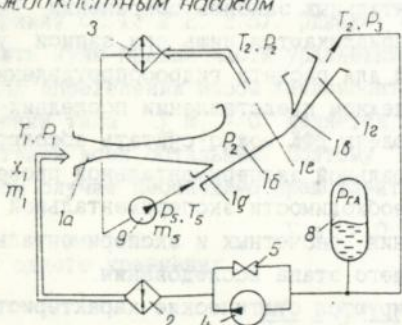
При построении этой модели не делаются допущения, требующие экспериментальной проверки. Основой этой модели являются стационарные уравнения фундаментальных законов сохранения. Экспериментальные же корреляции привлекаются лишь при записи уравнений теплоотдачи, уравнений для расчета гидросопротивлений и специфических узлов. При надежном представлении последних стационарную математическую модель ДФК можно считать абсолютной, то-есть не требующей интегральной экспериментальной проверки. Вышесказанное не отрицает необходимости экспериментальной отработки ДФК и сопоставления расчетных и экспериментальных характеристик, как завершающего этапа исследования.

В третьей главе анализируются статические характеристики, диапазон работоспособности, законы регулирования термоциркуляционных контуров (ТЦК).

В ХАИ и НПО "Энергия" длительное время разрабатываются высокоресурсные пассивные системы терморегулирования на основе ТЦК со струйными преобразователями энергии: струйным сепарационным насосом (рис. 1) и инжектором-конденсатором (ИК). Эти преобразователи энергии обладают высокой напорностью (до 1...2 бар) и поэтому перспективны для больших космических платформ с большим тепловыделением (более 10 кВт) и расстоянием теплопереноса порядка 10^2 м.

Была разработана стационарная математическая модель ТЦК со струйными насосами, особенностью которой является включение в гидродинамическую сеть специфического многофункционального узла - струйного преобразователя энергии (СПЭН). СПЭН отличается от гидродинамических узлов тем, что энтальпия и давление на всех входах и выходах различны. В самом струйном насосе в результате достаточно сложных термогазодинамических процессов взаимодействия фаз и струй происходит преобразование тепловой энергии в механическую. Описываются эти процессы с помощью специальных алгоритмов, которые в виде подпрограмм включаются в общую математическую модель ТЦК. На основе теории характеристик можно показать, что число независимых переменных, описывающих параметры СПЭН, строго регламентировано. Сепарационный насос имеет два входа и два выхода (везде с дозвуковым течением среды), поэтому его статические характеристики будут

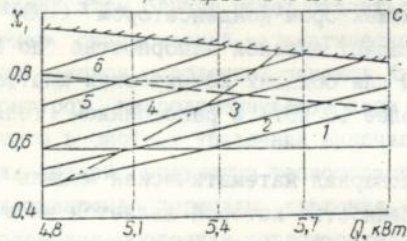
Штамм циркуляционный контур с
спиральным сетчаточным паро-
жидкостным насосом



1-СН (1а-котло; 1б-сепаратор; 1в-захватываю-
щая щель; 1г-диффузор; 1д-щель реинжекции;
1е-бычок); 2-испаритель; 3-конденсатор;
4-пусковой насос; 5-клапан; 6-гидроакку-
мулятор; 7-спомогательный насос; 8-ох-
ладитель; 9-жидкостно-жидкостный эжектор.
— жидкость; — пар.

Рис. 1.

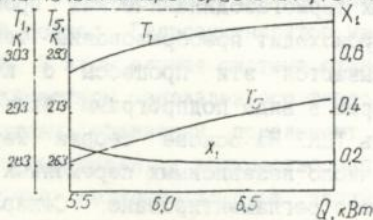
Статические характеристики штатного ТЦК
СЦК



— закон регулирования $m = const$;
— закон регулирования $M = const$;
— закон регулирования $T_s = const$;
1- $m = 0,049 \text{ кг/с}$; 2- $0,046 \text{ кг/с}$; 3- $0,043 \text{ кг/с}$; 4-
 $0,040 \text{ кг/с}$; 5- $0,037 \text{ кг/с}$; 6- $0,034 \text{ кг/с}$.

Рис. 3.

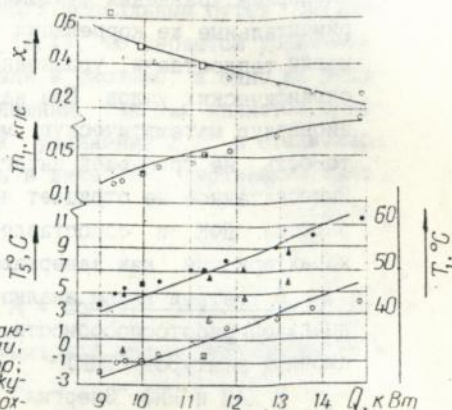
Статическая характеристика ТЦК ССН



Фреон 114. $M = 50 \text{ кг}$

Рис. 5.

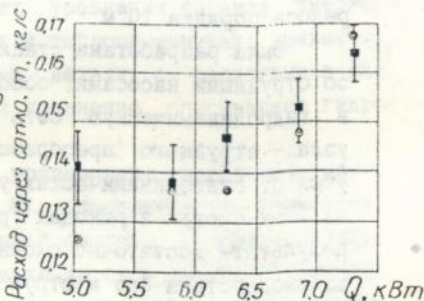
Характеристики ТЦК СЦК



Рабочее тело: фреон 113 + ТЕМП
Стенд ЭУ-626.

Рис. 2.

Сравнение статических экспе-
риментальных и теоретических
характеристик ТЦК ССН



Стенд ЭУ-626. Насос ЮУ-1 фреон 114.
■ - эксперимент; ○ - теория.

Рис. 4.

включать шесть независимых параметров:

$$m_1, i_1, T_1, P_3, i_3, i_3, T_3, m_3, P_3^{\text{max}} \dots = f(P_1, x_1, P_2, m_3, T_3, P_3)$$

Если учесть, что диффузор струйного насоса обычно работает на критическом режиме, то противодавление за ним (P_3) не сказывается на расход, поэтому число независимых параметров можно сократить до пяти.

В инжекторе-конденсаторе, имеющем два входа и один выход число независимых параметров четыре. Из-за того, что математическая модель СПЭН задана в виде отдельного алгоритма, целесообразно математическую модель всего ТЦК представить в виде системы уравнений, число которых равно числу граничных условий, которые необходимо задать для расчета СПЭН. Сами же уравнения имеют форму невязок между одноименными параметрами, определяемыми из расчета струйного насоса (индекс "с") или внешней цепи (индекс "ц"). Для ТЦК с сепарационным насосом система уравнений имеет вид:

$$T_3 - T_3^{\text{ц}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) = 0,$$

$$P_3^{\text{с}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) - P_3^{\text{ц}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) = 0,$$

$$m_2^{\text{с}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) - m_2^{\text{ц}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) = 0,$$

$$x_1 - x_1^{\text{ц}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) = 0,$$

$$m_{\text{ас}} - m_3^{\text{с}}(T_1, x_1, P_2, m_3, T_3) = 0.$$

В данном случае гидроаккумулятор не включен в состав ТЦК, система открытая. Замыкающим условием является условие постоянства расхода теплоносителя $m_{\text{ас}} = \text{const}$, которое, по существу, является законом регулирования контура.

Режим работы ТЦК (его состояние) однозначно определяется заданием величин подведенной тепловой мощности Q и падающего на панели радиатора внешнего излучения q_{Σ} . Эти величины используются при расчете элементов испарителя и конденсатора и являются аргументами задачи. Статические характеристики ТЦК обычно представляются в зависимости от этих параметров.

Для проверки достоверности разработанных методик и программ расчета ТЦК была выполнена серия экспериментов с моделья-

ми струйных насосов и ТЦК на стендах ХАИ и НПО "Энергия". В качестве рабочих тел использовались фреон-113, фреон-114, смесь фреона-113+ТЕМП. В силу большой трудоемкости и дороговизны экспериментов, число получаемых экспериментальных точек было ограничено. Их разброс часто определялся невозможностью точно выдержать постоянными все условия эксперимента. Поэтому статистическая обработка экспериментальных данных затруднена. Рассчитывался доверительный интервал измерений, который и наносился на экспериментальные точки. Погрешность измерения температуры составляла 0,2 К; давления - 2,5%; расхода - 1,6... 3%; изменения энтальпии - 2,5%.

На рисунках 2, 4 приведены экспериментальные и расчетные характеристики $\frac{T_{ЦК}}{C}$ ИК и СН, полученные на стенде ЗУ-626 в НПО "Энергия". В обоих случаях контур был закрытой системой, закон регулирования $M = const$. Расчетные значения в основном попадают в доверительный интервал измерений.

Расчеты характеристик штатных ТЦК выполнены в порядке разработки проектов систем терморегулирования для космических станций УКП и МИР-2. На рис 3. приведены характеристики ТЦК с ИК при различных законах регулирования. Наиболее просто можно реализовать закон регулирования $M = const$ (закрытая система), но при этом законе наиболее резко меняется температура T_1 в испарителе. При законах регулирования $m_1 = const$ и $T_1 = const$ необходима установка в контур гидроаккумулятора. В первом случае необходим также регулятор расхода, а во втором - гидроаккумулятор должен иметь пренебрежимо малую жесткость. Нанесенная на рис. 3 граница работоспособности определяется превышением потребного напора над максимально возможным. Вся область работоспособности ТЦК с ИК исследована в отдельной серии расчетов. Определено, что область работоспособности составляет $\sim \pm 30\%$ от номинальной тепловой нагрузки. В координатах $T_1 - Q$ она имеет форму овала. Причинами ограничения работоспособности, помимо указанной выше, являются: на-

* Эксперименты проведены В. В. Бредихиным, И. Э. Теняковым и другими. Автор участвовал в постановке задачи на эксперимент, расчете и проектировании экспериментальных моделей струйных насосов, обработке и анализе результатов, расчете погрешностей измерений.

ступление режима "запаривания" или "захлебывания" инжектора, несогласованность площади радиатора-излучателя с необходимой для отвода заданного количества тепла Q .

На рис. 5 приведены характеристики штатного ТЦК с СН при законе регулирования $m_1 = \text{const}$. Видно, что все параметры изменяются очень плавно, диапазон работоспособности составляет $\sim \pm 30\%$ от $Q_{\text{НОМ}}$. Наблюдается качественное соответствие характеристик всех исследованных ТЦК (модельных и штатных, с инжектором и сепарационным насосом). Например, отметим следующий неочевидный факт: в ТЦК с ростом тепловой нагрузки уменьшается паросодержание на выходе из испарителей.

В четвертой главе анализируются стационарные характеристики двухфазного насосного контура теплопереноса аммиачной системы терморегулирования космической платформы на основе этого предлагаются конкретные конструктивные мероприятия по повышению ее эффективности. Упрощенная схема контура приведена на рис. 6а. Контур имеет две петли: основную с двухфазным теплоносителем и байпасную - с жидким. Соотношение расходов теплоносителя в петлях устанавливается дросселями. Оригинальную конструкцию имеет блок радиационных теплообменников (РТО). Он состоит из большого числа параллельно включенных секций, конденсаторов, соединенных тепловой трубой с излучающей панелью. Некоторая часть тепловой трубы омывается байпасным потоком жидкости.

Для составления математической модели СТР была построена эквивалентная термогидродинамическая цепь (рис. 6б), состоящая из 13 контрольных объемов, 14 ветвей, 5 тепловых узлов и 7 тепловых проводников. В соответствии с ней была составлена система нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений. Система считается закрытой с заданным количеством заправленного теплоносителя. Закон регулирования определялся уравнением для объема газа в баллоне, подсоединенном к гидроаккумулятору. В математическую модель СТР включена оригинальная подмодель РТО, учитывающая его конструктивные особенности и детально описывающая процесс передачи тепла от теплоносителя к излучающим панелям. Благодаря этому имелась возможность анализировать влияние некоторых конструктивных параметров РТО, реализуемых коэффициентов теплоотдачи на участках конденсации и

АНБ Ин. К. Стефанович
АН УРСР 7

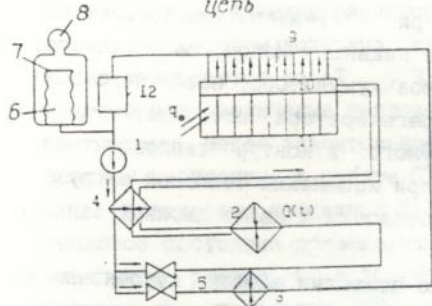
переохлаждения теплоносителя на характеристики всей системы. Система уравнений решалась итеративным методом второго порядка Ньютона-Рафсона, решение обычно получалось за 3...5 итераций. Целями исследования характеристик ДФК были: определение диапазона работоспособности ДФК, точности термостабилизации при изменении тепловой нагрузки и падающего на РТО лучистого потока; определение влияния величин коэффициентов теплоотдачи в конденсаторах и их конструктивных размеров; выявление целесообразности установки в ДФК теплообменника-регенератора, дополнительного радиационного теплообменника-переохладителя; определение влияния утечки теплоносителя на его работоспособность.

Основные размеры ДФК, параметры насоса, гидроаккумулятора соответствовали предварительно определенным при проектировании СТР Универсальной Космической Платформы в НПО "Энергия", (мощностью 12 кВт). Вначале анализировались характеристики ДФК без регенератора и переохладителя. Диапазон работоспособности ДФК по тепловой нагрузке составил 6 кВт и определяется крайними положениями сильфона в гидроаккумуляторе, после чего возможно его разрушение вследствие значительного перепада давления. Изменение температуры теплоносителя в испарителе при этом составляет ~ 15 К. Для расширения диапазона работоспособности ДФК, устранения вероятности аварийных ситуаций рекомендовано установить в контур гидроаккумулятор с паровой полостью и регулятор давления.

Основное количество тепла отводится при конденсации теплоносителя. Если в реальных условиях эксплуатации в невесомости коэффициент теплоотдачи при конденсации уменьшится в десять раз, то это не приведет к заметным изменениям характеристик ДФК. Кавитационный запас в насосе на всех режимах будет достаточен, установка дополнительного РТО для переохлаждения конденсата не обязательна. При утечке до 10% теплоносителя из контура он сохранит свою работоспособность, причем его характеристики незначительно сместятся в область более низких температур. Снижение падающего на РТО внешнего лучистого потока практически до нуля не приводит к замерзанию теплоносителя в какой-либо точке контура.

Большая серия расчетов была выполнена при установке в ДФК

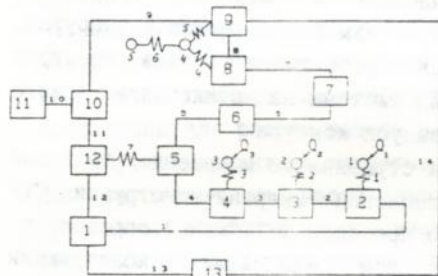
Схема насосного ДФК с его эквивалентная цепь



1-насос; 2-сеть термоточек; 3-жидкостный теплообменник; 4-регенератор; 5-дрозсели; 6-гидроаккумулятор; 7-сифон; 8-газовый баллон; 9-коллектор; 10-конденсатор; 11-радиатор; 12-преобразователь.

— жидкостный трубопровод;
 == — двухфазный трубопровод.

а)

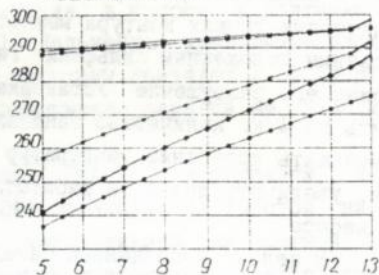


□ — контрольный объем; — — дросель;
 — — тепловой проводник; о — тепловой узел.

б)

Рис. 6

Зависимости температур от Q в ДФК с регенеративным теплообменником

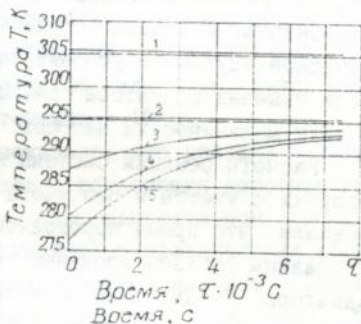


Тепловая нагрузка Q , кВт

• — T_1 ■ — T_2 ▲ — T_3

* — T_{10} ◊ — T_4 Рис. 7.

Реакция параметров ДФК СТ на ухудшение условий теплообмена с окружающей средой (оазонирование 30% площади излучающих панелей).



Время, $\tau \cdot 10^{-3}$ с

Время, с

1 — T_{w3} 2 — T_4 3 — T_1

4 — T_{10} 5 — T_{w4}

Рис. 8.

регенеративного теплообменника. Показана его положительная роль, даны рекомендации по его конструированию. Характеристики ДФК с регенератором приведены на рис. 7. Температуры во всех характерных точках контура меняются плавно. Излом соответствует крайним положениям сильфона гидроаккумулятора, после чего возможно его разрушение. Установка регенератора позволяет уменьшить на 4 кг количество заправляемого в контур теплоносителя, уменьшить колебание температур при изменении тепловой нагрузки, увеличить диапазон работоспособности и кавитационный запас в насосе.

В целом, выполненный анализ позволил внести коррективы в проект штатной СТР, снижающие ее массу, повышающие ее надежность и улучшающие эксплуатационные характеристики.

В пятой главе представлен численный анализ нестационарных режимов работы ДФК аммиачной насосной СТР номинальной мощностью 11 кВт Универсальной Космической Платформы. Схема ДФК представлена на рис. 6. В диссертации численно исследованы четыре нестационарные ситуации: ступенчатое изменение тепловой нагрузки, внезапное ухудшение условий теплосбора из-за выхода из строя части панелей радиатора, реакция системы на отключение одного из двух механических насосов, запуск контура.

Расчеты реакции системы на ступенчатое изменение тепловой нагрузки с учетом и без учета тепловой инерции конструкции СТР показали, что время переходного процесса ($\sim 10^2$ мин.) определяется главным образом временем тепловой релаксации в конструкции радиатора. Характер же переходных процессов (изменение длины экономайзерного участка в эквиваленте участка теплосбора, изменение паросодержания в двухфазных коммуникациях, перетекание теплоносителя между контуром и аккумулятором, изменение давления в системе и температуры охлаждаемых поверхностей) определяется теплообменом и гидродинамикой теплоносителя. Длительность таких переходных процессов без учета тепловой инерции конструкции составляет $\sim 10^1$ мин. В результате расчетов выяснено, что установка регенератора способствует стабилизации давления в системе и температуры охлаждаемых поверхностей в нестационарных режимах. Временной масштаб моделирования был опережающим и достигал (1:10...100) при использовании IBM PC 386.

Расчеты реакции системы на ухудшение условий теплообмена с окружающей средой показали (см. рис. 8), что уменьшение площади излучающих панелей радиатора на 30% приводит систему к состоянию, в котором возможна кавитация в насосе (кавитационный запас уменьшается до $\Delta T_{\text{cav}} = 3 \text{ K}$). Дальнейшее уменьшение площади панелей или увеличение тепловой нагрузки приведет к срыву работы системы. Менее значительное разрушение панелей не приводит к опасным нарушениям в работе СТР.

Исследована процедура запуска ДФК УКП в условиях, когда тепловое состояние покоящегося ДФК определяется работой на номинальном режиме ($Q = 11 \text{ кВт}$) параллельной жидкостной СТР. Полагалось, что запуск ДФК и останов жидкостного контура производятся одновременно. Обнаружено, что попадание в первые секунды после запуска холодной жидкости в участок теплосбора вызывает конденсацию находящегося там двухфазного теплоносителя и снижение давления в системе. Последнее может приводить к недопустимому уменьшению кавитационного запаса механического насоса. Расчетами показано, что избежать кавитации в насосе при запуске можно путем использования дополнительной, установленной на входе в насос, емкости со слабонедогретой жидкостью, масса которой достаточна для работы насоса в течение $\sim 10^2 \text{ с}$.

Путем вариантных расчетов показано, что реакция параметров ДФК на отключение части насосов, образующих насосную группу, при разных способах их соединения (последовательном либо параллельном) определяется видом (крутизной) гидравлических характеристик контуров и напорных характеристик насосов. Тенденции состоят в уменьшении расхода через участок теплосбора, росте паросодержания на его выходе, перетекании теплоносителя из контура в гидроаккумулятор, росте давления и температуры термостабилизации. Повышение паросодержания в термоплатах участка теплосбора нежелательно с точки зрения теплообмена и обеспечения теплового режима.

Достоверность приведенных расчетов подтверждается построением математической модели ДФК на основе фундаментальных законов сохранения, контрольными расчетами тестовых задач и сопоставлением с результатами расчетов по более точным моделям с распределенными параметрами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа направлена на решение научно-технической задачи создания контуров теплопереноса с двухфазным теплоносителем систем терморегулирования и энергоустановок.

Основные результаты работы следующие:

1. На основе использования классического принципа представления многоэлементных разветвленных систем в виде эквивалентных цепей, состоящих из идеализированных элементов разработана методика математического моделирования стационарных и нестационарных термогидродинамических процессов в контурах теплопереноса с двухфазным теплоносителем.

2. Предложены конкретные математические модели и реализующие их программы нескольких типов теплообменных контуров: с механическим насосом, со струйными преобразователями энергии. Модели прошли экспериментальную апробацию.

3. Исследованы характеристики термоциркуляционных контуров со струйными насосами (инжектором - конденсатором и струйным сепарационным насосом), реализующих прямой термодинамический цикл. Определены диапазоны их работоспособности, рациональные законы регулирования.

4. На основе анализа квазистационарных и нестационарных термогазодинамических процессов в контуре теплопереноса с механическим насосом выработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации таких контуров для систем терморегулирования больших космических платформ.

Основные выводы работы:

1. Использование принципа представления сложных многоэлементных систем в виде набора идеализированных элементов позволяет создавать адекватные математические модели двухфазных контуров теплопереноса, реализующиеся в виде экономичных алгоритмов для персональных ЭВМ.

2. Термоциркуляционный контур со струйными преобразователями энергии может быть рекомендован для использования в пассивных системах терморегулирования с достаточно стабильным тепловыделением. Диапазон работоспособности ТЦК по тепловой нагрузке составляет $\pm 30\%$ от номинальной.

3. В двухфазных контурах теплопереноса с механическим

насосом для больших космических платформ целесообразна установка регенеративного теплообменника. Диапазон работоспособности определяется объемом гидроаккумулятора с газовой полостью.

4. Характер переходных процессов в двухфазных контурах теплопереноса систем терморегулирования летательных аппаратов и энергоустановок в большинстве случаев определяется гидродинамическими процессами, а длительность - тепловыми. Для обеспечения надежного запуска контура необходим запас почти насыщенной жидкости в предвключенных к сети термоплат жидкостных магистралях.

Предложенная методика расчета ориентирована в основном на системы терморегулирования космических аппаратов, но после незначительной доработки, замене уравнения состояния теплоносителя применима и для моделирования пневматических и маслянных систем авиадвигателей.

Работа использована в НПО "Энергия" (г. Калининград Московской области) при составлении проектов систем терморегулирования больших космических платформ МИР-2 и УКП, прогнозировании характеристик штатной системы, проектировании наземного стенда сопровождения, на аммиаке, планировании экспериментов на наземных стендах.

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

Основные обозначения: F-площадь, m^2 ; i- удельная энтальпия, Дж/кг; L-длина, м; M-масса, m- секундный массовый расход, кг/с; P-давление, Па; Q-тепловая мощность, Вт; q_{w-f} -тепловой поток от поверхности, Вт/ m^2 ; T-температура, К; t-время, с; U-внутренняя энергия, Дж; u-удельная внутренняя энергия, Дж/кг; V-объем, m^3 ; x-массовое паросодержание (степень сухости); z-осевая координата, м; ρ -плотность, кг/ m^3 .

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Бредихин В.В., Горбенко Г.А., Никонов А.А., Файрузов Ю.В. Теоретическое исследование термоциркуляционных контуров со струйными насосами. -В кн.: Тез. докл. Восьмой всесоюзной конф. "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". 23-25 окт., 1990, Ленинград, НПО ЦКТИ. ТЗ. С. 263-266.
2. Бредихин В.В., Горбенко Г.А., Никонов А.А., Файрузов Ю.В. Математическое моделирование термоциркуляционных контуров со струйными преобразователями энергии. В сб.: "Газотермодинами-

ческие процессы в энергоустановках с многофазным рабочим телом" Харьков, ХАИ, 1990. С.3-10.

3. Математическое моделирование интегрированных многоэлементных теплообменных контуров с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов / В.Н.Блинков, Г.А.Горбенко, Ю.В.Файрузов и др. В кн.: Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов. -М.: Центр НТИ Поиск, 1992. С.

4. Замкнутый теплогидравлический стенд ФВ для исследования струйных насосов и их элементов. Методика измерений. Расчет погрешностей. (Отчет о НИР)/ Харьковский авиац. ин-т; Горбенко Г.А., Беспятов М.А., Файрузов Ю.В. и др. - Г.Р. N01860136238, Инв. N0287.0062675, Харьков, 1987, -94с.

5. Расчет характеристик термоциркуляционного контура со струйным преобразователем энергии. (Отчет о НИР)/ Харьковский авиац. ин-т; Горбенко Г.А., Блинков В.Н., Файрузов Ю.В. и др. - Г.Р. N 0287.0662675, Харьков, 1987. -136с.

6. Математическое моделирование термоциркуляционного контура со струйным преобразователем энергии. (Отчет о НИР)/ Харьк. авиац. ин-т; Горбенко Г.А., Бредихин В.В., Файрузов Ю.В. и др. - Г.Р. N 01880089455; инв. N 0290.0044442, Харьков, 1990, -125с.

7. Экспериментальное исследование сепарационных насосов в составе контура ЭУ-626. (Отчет о НИР) / Харьк. авиац. ин-т; Горбенко Г.А., Бредихин В.В., Файрузов Ю.В. и др. -Г.Р. N01.86.0136238, Харьков, 1989, -66с.

8. Анализ характеристики штатного двухфазного контура теплопереноса универсальной космической платформы (Отчет о НИР по теме 4-3/91)/ Харьковский авиац. ин-т, Харьков, 1991, -128с.