

УДК [629.78.048.7 + 621.311.25]:532.529

Д-р техн. наук В. Н. Блинков

Д-р техн. наук Г. А. Горбенко

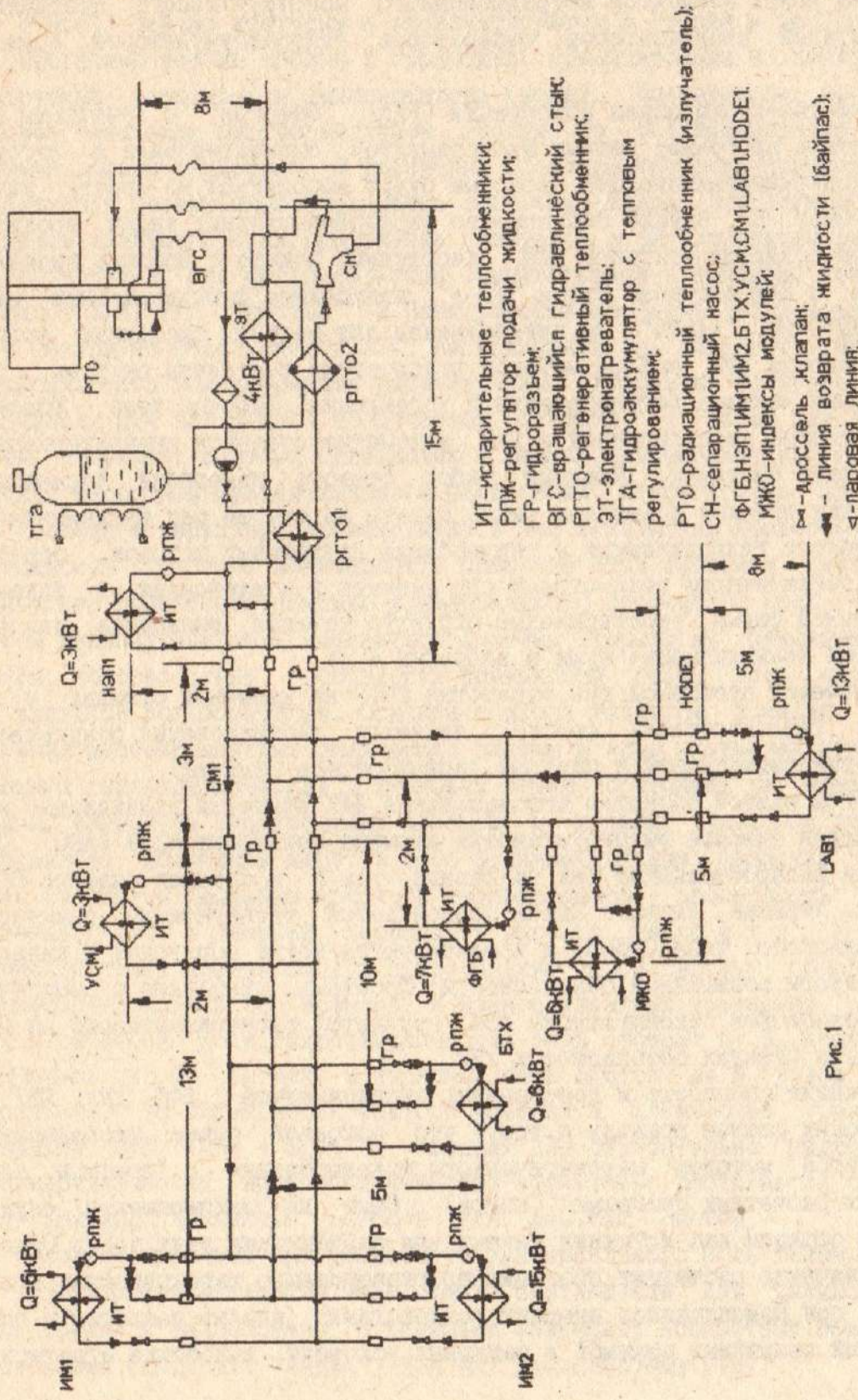
ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПЕРЕНОСА С ДВУХФАЗНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ.

Теплоперенос с использованием двухфазных теплоносителей в последние десятилетия находит все более широкое применение в ракетно-космической технике, в энергетике, в химической и биотехнологиях, в криогенной технике. Двухфазный (кипящий) теплоноситель, в котором отводимая теплота аккумулируется в виде скрытой теплоты парообразования, позволяет переносить значительно большее количество теплоты на единицу массового расхода, чем однофазный теплоноситель. За счет очень высоких коэффициентов теплоотдачи при кипении можно поддерживать температуру источников теплоты близкой к температуре насыщения теплоносителя.

В российском сегменте Международной Космической Станции (МКС) "АЛЬФА", разрабатываемой на основе российского проекта "МИР-2" и американского "FREEDOM" /1/, задача сбора низкопотенциальной теплоты от большого числа модулей и переноса ее на излучающие панели радиатора будет решаться центральной системой теплоотвода (ЦСТО, рис 1). Основные технические данные ЦСТО МКС "АЛЬФА": отводимая от пользователей тепловая нагрузка - от 0 до 30 кВт; максимальное расстояние теплопереноса - до 100 м; температура кипения аммиака в испарительных теплообменниках - $10^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$; разность между температурой кипения аммиака в испарительных теплообменниках связи и температурой конденсации аммиака в радиационном теплообменнике при тепловой нагрузке 30 кВт - не более 3°C .

Новизна разработки требует мощной научной поддержки процесса проектирования, а также экспериментальной проверки принимаемых конструктивных решений. В последние десятилетия в мире выполнен большой объем фундаментальных исследований по гидродинамике и теплообмену двухфазных потоков в связи с проблемой создания теплообменных контуров с двухфазным теплоносителем (ДФК) для ядерных энергоустановок (ЯЭУ). Однако возможность непосредственного использования этих результатов для космических систем ограничена следующими особенностями: нулевой гравитацией; видом теплоносителя (аммиак, фреоны); характер-

ЦСТО МКС "АЛЬФА".



ИТ-испарительные теплообменники;
 РПЖ-регулятор подачи жидкости;
 ГР-гидроразъем;
 ВГС-вращающийся гидравлический стык;
 РГТО-регенеративный теплообменник;
 ЭТ-электронагреватель;
 ТГА-гидроаккумулятор с тепловым регулированием;
 РТО-радиационный теплообменник (излучатель);
 СН-сепарационный насос;
 ФГБ,НЭП1,ИМ1,ИМ2,БТХ,УСМ1,СМ1,ЛАВ1,НОДЕ1,
 ИЖО-индексы модулей;
 —Ароссель, клапан;
 — линия возврата жидкости (байпас);
 <- паровая линия;
 <- линия нагнетания жидкости.

Рис.1

ным диапазоном параметров ("комнатные" температуры кипения); использованием новых элементов нетрадиционного конструктивного исполнения (испарителей, конденсаторов, сепараторов, гидроаккумуляторов, арматуры).

Ракетно-космическая корпорация (РКК) "Энергия" с участием ХАИ разработала программу летных экспериментов, спроектировала и изготовила экспериментальные ДФК, которые будут выводиться на орбиту начиная с 1995г /2/. Однако большинство экспериментальных задач, возникающих при создании штатного ДФК, необходимо решать с помощью наземных стендов. В ХАИ построен стенд "ФВ-А", являющийся функциональным аналогом ЦСТО МКС "АЛЬФА". Он предназначен для решения системных вопросов отработки ДФК, выбора методов диагностики состояния системы, рациональных методов регулирования и управления. Рабочие тела - фреоны. Стенд оснащен изготовленной в ХАИ автоматизированной измерительной и управляющей системой. Широкий набор средств измерений параметров двухфазных потоков позволяет также решать на стенде ряд фундаментальных вопросов гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков: определение коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации в каналах специальной формы, идентификация структур течения, выявление закономерностей возникновения шума и вибраций и др.

Ключевой проблемой при отработке СОТР на наземных стендах и на удобных теплоносителях (фреонах) является экстраполяция результатов на условия невесомости и штатный теплоноситель (аммиак).

Другой важной областью использования ДФК являются охлаждаемые кипящей водой ядерные энергоустановки атомных электростанций (АЭС). Они получили распространение как на Западе, так и в странах бывшего СССР (Россия, Украина, Литва). Здесь продолжается эксплуатация реакторов Чернобыльского типа (РБМК) и проектируются новые корпусные и каналные реакторы повышенной безопасности. Проблемы, связанные с обеспечением безопасной эксплуатации АЭС, изучаются экспериментально на Интегральных Стендах Безопасности /3/.

Крайняя сложность и дороговизна экспериментов с ДФК для ЯЭУ и космических систем привели к тому, что основной объем исследований выполняется методом математического моделирования с помощью специальных расчетных программ (кодов). Сами же эксперименты служат главным образом как источник данных для верификации этих кодов. Основное назначение расчетных программ - прогнозирование характеристик штатных ДФК при изменяющихся внешних воздействиях, анализ развития и последствий аварийных режимов в натуральных условиях, выработка стратегии

противоаварийных действий. Часть Западных системных кодов (TRAC, RELAP, ATHLET) сейчас доступны и эксплуатируются в России и на Украине. Эти программы весьма сложны и громоздки, ориентированы на конкретные конструкции реакторов и теплоноситель (вода). Большинство программ обладает невысоким быстродействием. Работы по модифицированию этих программ весьма трудоемки. В различных исследовательских центрах мира продолжают независимые разработки системных кодов, что иллюстрирует трудности адаптации этих программных продуктов и интерпретации расчетных результатов. Эти обстоятельства стимулировали и комплекс совместных работ ХАИ, РКК "Энергия" и Электрогорского Научно-Исследовательского Центра по Безопасности АЭС, направленных на разработку методов математического моделирования разветвленных двухфазных контуров теплопереноса. ДФК ЯЭУ и ЦСТО космической станции, а также ряд других систем, например, системы охлаждения и смазки авиационных двигателей, обладают сходством функционального назначения, конфигурации, элементного состава и характера происходящих в них физических процессов. Такая общность позволяет моделировать присущие этим системам теплогидравлические процессы с помощью универсального системного кода /4/, в котором индивидуальность конкретной системы (топология, режимные параметры, теплоноситель, особенности элементной базы, поле массовых сил) задается пользователем. Основой подхода является принцип представления многоэлементных физических систем в виде эквивалентных сопряженных гидродинамических и тепловых сетей, состоящих из идеализированных элементов (контрольных объемов и ветвей, тепловых узлов и проводников). Последние несут в себе фундаментальные свойства физических элементов реальных контуров теплопереноса - способность аккумулировать массу и энергию, переносить импульс, тепло и т.д. С математической точки зрения модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных (по времени) и трансцендентных уравнений сохранения и переноса. Если гидродинамическая сеть состоит из N_v контрольных объемов и N_p ветвей, а тепловая сеть состоит из N_N узлов и N_c проводников, то размерность вектора решения и количество уравнений составляют $2 \cdot N_v + N_p + N_N + N_c$. Решения для относительно "медленных" теплогидравлических процессов наиболее эффективно достигаются с помощью неявных численных методов для жестких систем.

Ключевые проблемы при разработке универсального кода таковы:

- формирование пакетов замыкающих соотношений для режимов течения, трения и теплообмена, отражающих специфику конкретных объектов исследований (ЦСТО МКС "АЛЬФА", ДФК ЯЭУ, маслосистема ГТД);

- разработка программного модуля для моделирования подсистем управления и регулирования;
- выработка методики и проведение верификации конкретных версий кода на основе данных физических наземных и летных экспериментов;
- выработка методов моделирования некоторых оригинальных сложных элементов (струйных насосов, сепараторов фаз, гидроаккумуляторов) с помощью локальных термогидродинамических цепей;
- разработка пользовательского интерфейса, позволяющего легко менять версию кода, топологию, теплоноситель и другие индивидуальные особенности моделируемой системы.

По степени детализации моделируемых процессов и доступности для широкого круга пользователей разрабатываемая программа пока не может конкурировать с объектно-ориентированными суперкодами TRAC, RELAP, ATHLET, FLUENT. Однако, она имеет нишу как многоцелевой гибкий инструмент для оперативных "быстрых" инженерных расчетов теплогидравлических систем, относящихся к различным областям техники (космос, авиация, энергетика и т.д.).

Изложенные в настоящей статье подходы и заделы будут использованы в дальнейшем для разработки методики моделирования и синтеза любых сложных теплоэнергетических систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Никонов А. А., Цихоцкий В. М., Горбенко Г. А., Блинков В. Н. Исследования теплопереноса в контурах с двухфазным теплоносителем систем терморегулирования космических аппаратов. - В кн.: Труды Первой Российской Национальной Конференции по Теплообмену. Том 6, Москва, МЭИ, 1994. С. 171-177.
2. Chernyi G. G., Leontiev A. I., Blinkov V. N., Diev M. D., Gorbenko G. A., Nikonov A. A., Cykhotsky V. M. Survey of CIS Studies of Hydromechanics and Heat Transfer in Zero-Gravity in Application to Thermal Control Systems for Spacecraft Design. Problem and Review of Experimental Facilities. Technical Report of Russian Academy of Sciences on Subcontract 93664081 H, Moscow, 1993.
3. Нигматулин Б. И. Современные методы обоснования теплогидравлических аспектов безопасности атомных станций на крупномасштабных экспериментальных стендах. - Теплоэнергетика, 1990, №8. С. 21-27.
4. Блинков В. Н. Моделирование нестационарных термогидродинамических процессов в теплообменных контурах с двухфазным теплоносителем. - Атомная энергия. 73, 1992. Вып. 6. С. 439-442.