

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Харьковский авиационный институт

им. Н.Е.Жуковского

На правах рукописи

Брус Николай Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
РАЗВЕТВЛЕННЫХ КОНТУРАХ ТЕПЛОПЕРЕНОСА
С ДВУХФАЗНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

05.14.05 - теоретическая теплотехника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Харьков-1996.

АВ 35.795

Диссертация является рукописью.
Работа выполнена на кафедре теплообмена и теплообменного оборудования Харьковского государственного университета им. Н.Е. Жуковского.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00754029 (R)

Научные руководители - доктор технических наук, ст.научн.сотр.

Блинков Владимир Николаевич,
доктор технических наук, доцент
Горбенко Геннадий Александрович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Симбирский Дмитрий Федорович,
кандидат технических наук, доцент
Элькин Борис Соломонович.

Ведущая организация-Одесская государственная академия холода
(г.Одесса).

Защита состоится 21.06.96г. в 14 часов в ауд. № 202л.к. на заседании специализированного совета Д 02.27.04 при Харьковском авиационном институте по адресу: 310070, г.Харьков, ул.Чкалова 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского авиационного института по адресу: 310070, г.Харьков, ул.Чкалова 17.

Автореферат разослан "20" 05

ЛНБ ім. В. Стефаніка
1996г.
АН України

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат технических наук, доцент

В.Ю.Незым

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Системы терморегулирования (СТР) космических аппаратов (КА) на основе контуров с двухфазным теплоносителем (ДФК), в которых тепло аккумулируется в виде скрытой теплоты парообразования, имеют существенные преимущества в сравнении с однофазными СТР по массе, энергопотреблению и точности термостабилизации. ДФК являются сложными техническими системами, синтез которых становится существенно более продуктивным при использовании адекватных математических моделей. Необходимость в математическом моделировании возникает при анализе работоспособности и при выработке рекомендаций по улучшению функциональных характеристик схем ДФК СТР, которые разрабатываются в рамках российско-американского проекта международной космической станции (МКС) "АЛЬФА", выполняемого с участием Национального Космического Агентства Украины.

Ядерные энергоустановки (ЯЭУ), которые охлаждаются кипящей водой, получили распространение как на Западе (реакторы типа ВВР), так и в странах бывшего СССР (Россия, Украина, Литва), где продолжается эксплуатация реакторов типа РБМК и, по-видимому, будет продолжаться вплоть до истечения расчетного срока их службы.

Главной задачей на этот период времени является повышение и поддержание безопасности РБМК до международно-приемлемого уровня. Характеристикой этого уровня служит расчетное доказательство безопасности на основе использования системных теплогидравлических программ (кодов) улучшенной оценки. Такие математические модели и программы создаются либо как отечественные разработки, либо в результате верификации и адап-

тации к РБМК кодов RELAP, TRAC и ATHLET, уже освоенных в СНГ.

Работа выполнена с 1991г. по 1995г. на кафедре Теплофизических основ двигателестроения Харьковского авиационного института в соответствии с х/д № 3-ЦТФ/94 с Ракетно-Космической Корпорацией "ЭНЕРГИЯ"; х/д № 205-75/94 с Электрогорским Научно-Исследовательским Центром по Безопасности Атомных Станции (ЭНИЦ); ГК №7-27/95 с Национальным Космическим Агентством Украины.

Необходимость приглашения ГорбенкоГ.А. в качестве соруководителя определяется тем, что второй раздел диссертации, посвященный анализу нестационарных термогидродинамических процессов в разветвленных контурах теплопереноса орбитальной станции, выполнялся на основе консультаций с ГорбенкоГ.А., который является руководителем совместных НИР ХАИ и РКК "ЭНЕРГИЯ"

Цели работы:

- разработка математических моделей и программ для анализа работоспособности двухфазного контура центральной системы теплоотвода (ЦСТО) международной космической станции "АЛЬФА" в нестационарных режимах, выработка рекомендаций по улучшению функциональных динамических характеристик ДФК ЦСТО;

- верификация системной программы ATHLET (Германия) на экспериментальных данных, полученных на интегральном стенде 108 ЭНИЦ, моделирующем контур циркуляции теплоносителя реактора типа РБМК;

- разработка сценария проведения эксперимента на интегральном теплогидравлическом стенде для исследования максимальной проектной аварии (МПА) в канальном реакторе типа РБМК.

Основные задачи исследования:

-разработка математических моделей и алгоритмов, которые позволяют моделировать нестационарные термогидродинамические процессы в разветвленных контурах теплопереноса с двухфазным теплоносителем, анализ работоспособности ДФК ЦСТО, регулируемого с помощью регулятора подачи жидкости (РПЖ) и гидроаккумулятора с тепловым регулированием (ТГА);

-верификация расчетной программы (кода) ATHLET (GRS, Германия) для исследования неустойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) РБМК;

- разработка сценария проведения эксперимента по моделированию максимальной проектной аварии (МПА) в канальных реакторах типа РБМК на стенде 108 ЭНИЦ. Одна из целей проведения эксперимента -накопление экспериментальных данных для проведения верификационных расчетов.

Методология исследования. Моделирование ДФК ЦСТО базируется на принципе представления многоэлементных разветвленных теплогидравлических систем в виде эквивалентных термогидродинамических цепей, идеализированные элементы которых несут в себе внутренне присущие свойства и особенности конструктивных элементов реальных систем. Идеализированные элементы включают контрольные объемы и ветви для гидродинамической подмодели, тепловые узлы и проводники для тепловой подмодели. Особенности, которыми характеризуются элементы реальных систем, в идеализированных элементах проявляются через соответствующие источниковые члены в дифференциальных уравнениях сохранения массы, энергии, импульса. В математическом плане задача сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений.

Для верификации расчетной программы ATHLET использована формализованная процедура верификации и количественной оценки системных программ Подсистема ДФК ЯЭУ-сборка параллельных парогенерирующих каналов, исследована путем моделирования течения в одиночном канале при граничных условиях, которые характерны для параллельно-канальной сборки ($\Delta P = \text{const}$).

Программа ATHLET применена для обоснования эксперимента (включая доработку стенда) по исследованию МПА РБМК. Сценарий проведения эксперимента разработан на основе моделирования всех явлений, имеющих место при МПА и последующем аварийном охлаждении в реальном реакторе.

Обоснование теоретической и практической ценности исследований и его научная новизна. В диссертационной работе предложено дальнейшее развитие математических моделей расчета и анализа нестационарных гидродинамических и тепловых процессов в разветвленных многоэлементных ДФК, разработана модель гидроаккумулятора с тепловым регулированием. На основе моделирования различных нестационарных и переходных режимов проанализирована работоспособность ДФК ЦСТО "АЛЬФА", выработаны предложения по улучшению функциональных характеристик. Показано, что система работоспособна во всех исследованных режимах (при ступенчатом изменении тепловой нагрузки и падающего на радиационный теплообменник (РТО) теплового потока, при задании нового опорного давления в логике управления ТГА, при работе ЦСТО в условиях циклически изменяющихся условиях теплоотвода). Значения режимных параметров ДФК удовлетворяют требованиям техзадания при использовании в контуре ЦСТО гидроаккумулятора с тепловым регулированием

(ТГА) и регулятора подачи жидкости (РПЖ). Предложена логика управления параметрамиДФК с помощью этих элементов.

На основе формализованной процедуры верификации системных программ и количественной оценки кодов была проведена верификация системной программы ATHLET по данным экспериментального исследования неустойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах КМПЦ РБМК. Сделано заключение о том, что системная программа ATHLET адекватно моделирует данное явление.

Разработан сценарий проведения эксперимента по моделированию МПА в канальных реакторах типа РБМК на стенде 108 ЭНИЦ. Выработаны рекомендации по внесению изменений в конструкцию стенда (было предложено установить в канале четыре обогреваемых стержня и один необогреваемый, имитирующие тепловыделяющую сборку (ТВС) канала РБМК).

Реализация научных разработок. Математическая модель и реализующая ее расчетная программа, а также выработанные с их помощью рекомендации по выбору схемных решений и проектированию элементов двухфазных контуров теплопереноса (гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА), регулятор подачи жидкости (РПЖ)), используют в НИР и ОКР ракетно-космической корпорации (РКК) "ЭНЕРГИЯ" им. С.П.Королева (Российская Федерация) при разработке Центральной системы теплоотвода (ЦСТО) российского сегмента МКС "АЛЬФА".

Предложенная формализованная процедура верификации системных программ используется в Электрогорском Научно-Исследовательском Центре по Безопасности АЭС-филиале ВНИИ по эксплуатации атомных станций (Российская Федерация г. Электрогорск Московская область) при верификации системных программ для реакторов типа ВВЭР и РБМК. Полученные резуль-

таты решения верификационной задачи использованы в обосновании применения системной программы ATHLET для исследования неустойчивости течения кипящего теплоносителя в КМПЦ РБМК и определения запасов устойчивости для РБМК-1000 и РБМК-1500.

Разработанный сценарий проведения эксперимента на стенде 108 ЭНИЦ использован при подготовке эксперимента, моделирующего МПА КМПЦ РБМК.

Личный вклад диссертанта в работы, опубликованные совместно с соавторами. В совместных работах /1-6/ диссертант принимал участие в разработке новых и в дальнейшем развитии уже предложенных научным руководителем математических моделей, в выработке заключительных выводов. Диссертант лично разрабатывал вычислительные программы и провел расчетно-теоретические исследования.

Основные научные и прикладные результаты прошли апробацию на Межотраслевом семинаре-совещании "Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов" (Крым, 1991г); Международном симпозиуме "Неустойчивость в многофазных потоках" (Пиза, 1994г); Первой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1994г), Международном симпозиуме по вопросам улучшения теплообмена в энергетическом оборудовании (Москва, 1995г).

По теме диссертации опубликовано 6 печатных трудов, среди них три статьи, препринт и два доклада на международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 106 наименований. Основное содержание диссертации изложено на 113 страницах, 51 рисунке и 6 таблицах, всего 192 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе анализируется проблема математического моделирования рабочих процессов в теплообменных контурах с двухфазным теплоносителем систем терморегулирования космических аппаратов (КА) и ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Рост тепловыделения ($Q \geq 10$ кВт) на перспективных КА с одновременным увеличением до $L \approx 10^2$ м их линейных размеров ставят проблему разработки СТР, использующих двухфазный кипящий теплоноситель. Преимуществами ДФК по сравнению с традиционными однофазными жидкостными системами являются квази-изотермичность участков сбора и сброса теплоты, существенно меньшие потребные расход теплоносителя и мощность прокачивающих насосов, габариты и массы трубопроводов, арматуры и теплообменных аппаратов. Для математического моделирования ДФК СТР КА в США и Западной Европе разработаны программные комплексы SINDA, FLUINT, BETA, MITAS, FLOSIN, FLUIDNET. Представленные в диссертации математическая модель и расчетная программа являются результатом сотрудничества ХАИ и РКК "Энергии" по разработке собственного программного комплекса, необходимого для проектирования и сопровождения эксплуатации СТР МКС "АЛЬФА".

Зарубежный опыт и отечественные исследования квалифицируют изучение возможных аварийных режимов на АЭС с помощью экспериментальных стендов и расчетных программ как важную часть проблемы обеспечения безопасности ядерных энергетических реакторов. Большинство имеющихся экспериментальных стендов и системных расчетных программ на Западе и в бывшем СССР относятся к корпусным реакторам типа PWR, BWR и ВЭР. Водо-графитовые каналные реакторы типа РБМК обла-

дают важными специфическими особенностями конструкции и теплогидравлики рабочего процесса, которые определяют необходимость создания экспериментальных стендов и системных расчетных программ (кодов), учитывающих эти особенности. Одним из существенных и специфических для РБМК явлений является термогидродинамическая колебательная неустойчивость кипящего теплоносителя в параллельных технологических каналах (ТК). К настоящему времени данное явление хорошо изучено и по нему имеется обширная база экспериментальных данных. Эти обстоятельства послужили основанием для использования данных по развитию колебательной неустойчивости кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах стенда 108 ЭНИЦ для постановки и решения задачи верификации системного кода ATHLET в контексте работ по его адаптации к реакторам типа РБМК.

Вторая глава посвящена анализу работы двухфазной центральной системы теплоотвода (ЦСТО) международной космической станции (МКС) "АЛЬФА" в нестационарных и переходных режимах. Представлен обобщенный подход к моделированию двухфазных контуров теплопереноса в терминах "идеализированных элементов". Основой подхода является принцип представления многоэлементных двухфазных разветвленных контуров в форме эквивалентных гидравлических и тепловых сетей (рис.1). Сопряжение гидравлических и тепловых сетей осуществляется с помощью законов теплообмена. Реальные физические элементы системы представляются идеализированными элементами, моделирующими свойства и процессы, характерные для физических элементов. Эти фундаментальные свойства и процессы таковы: перенос массы, импульса и энергии с потоком теплоносителя; накопление массы и энергии в нестационарных условиях; механиче-

Идеализированные элементы гидравлической и тепловой сети.

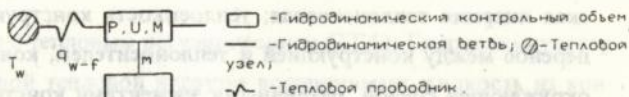


Рис. 1

Схема гидроаккумулятора с тепловым регулированием (ТГА).

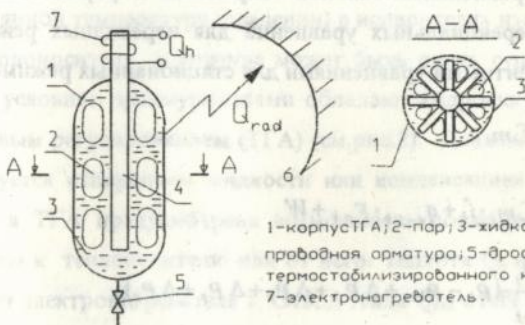
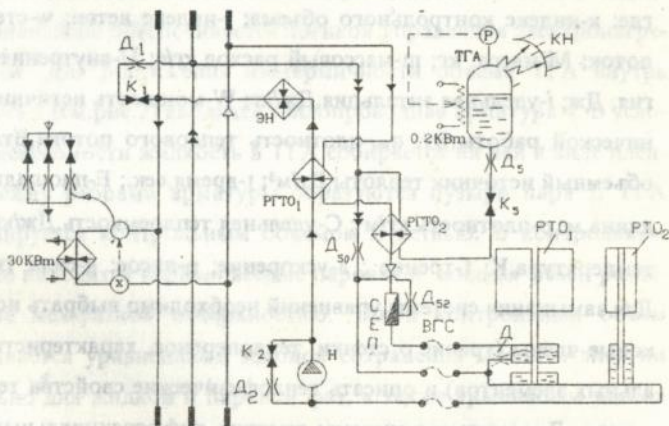


Рис. 2

Упрощенная схема двухфазного контура теплопереноса российского сегмента станции "АЛЬФА"



PTO - радиационный теплообменник; ТГА - тепловой гидроаккумулятор;
 КН - стенка контейнера; Н - насос; ВГС - вращающийся гидравлический стержень;
 PTO - регенеративный теплообменник; СЭП - сепаратор; ЭН - электронагреватель;
 □ - гидравлический узел; ◀ - клапан; ▶ - дроссель;
 ○ - регулятор подачи жидкости; ◊ - паровая магистраль; ◊ - испарительный теплообменник; ◊ - жидкостная магистраль;
 B = 12mm; → - вальпаясная магистраль D = 12mm.

Рис. 3

ская инерция теплоносителя; теплоемкость конструкции; теплоперенос между конструкцией и теплоносителем, конструкцией и окружающей средой, различными элементами конструкции; действие источников импульса и энергии; характеристики системы управления. Свойства и процессы в идеализированных элементах описаны уравнениями законов сохранения в форме обыкновенных дифференциальных уравнений для переходных режимов и трансцендентными уравнениями для стационарных режимов:

$$\frac{dM_k}{dt} = \sum m_j,$$

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

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

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

где: к-индекс контрольного объема; j-индекс ветви; w-стенка; f-поток; М-масса, кг; m-массовый расход, кг/с; U-внутренняя энергия, Дж; i-удельная энтальпия, Дж/кг; W-мощность источника технической работы, Вт; q_{w-f} -плотность теплового потока, Вт/м²; q_k -объемный источник теплоты, Вт/м³; t-время, сек.; F-площадь, м²; L-длина, м; ρ -плотность, кг/м³; C-удельная теплоемкость, Дж/кг·К; T-температура, К; f-трение; а-ускорение; p-насос; g-сила тяжести. Для замыкания системы уравнений необходимо выбрать источники члены (трение о стенки, теплоперенос, характеристики реальных элементов) и описать теплофизические свойства теплоносителя. Для решения системы жестких дифференциальных уравнений был применен неявный метод М.С.Gear.

Для регулирования давления в контуре а, следовательно, температуры в испарителях, было предложено использовать гидроак-

кумулятор с тепловым регулированием (ТГА). Гидроаккумулятор при большой тепловой нагрузке воспринимает жидкость из контура, а при малой — подает ее в контур, стабилизируя тем самым температуру кипения теплоносителя в ДФК. Особенность двухфазных контуров в том, что при различных тепловых нагрузках и постоянной температуре (давлении) в испарителях изменение массы теплоносителя в контуре может быть очень существенно. В этих условиях преимуществами обладают гидроаккумуляторы с тепловым регулированием (ТГА) (см. рис. 2). Давление в ТГА регулируется испарением жидкости или конденсацией пара. Для этого в ТГА предусмотрена возможность подвода или отвода теплоты к теплоносителю или от него. Теплота Q_b подводится к ТГА от электронагревателя 7. Отвод тепла $Q_{\text{отд}}$ от ТГА осуществляется за счет лучистого теплообмена между поверхностью корпуса ТГА 1 и стенкой отвакуумированного контейнера 6, в котором располагается ТГА. Стабилизация давления в ТГА в заданном диапазоне обеспечивается логикой управления электронагревателем. Для достижения изотермичности объема ТГА внутри корпуса 1 (см. рис. 2) вводится теплопроводная арматура 4. В условиях невесомости жидкость в ТГА собирается на ней в виде пленки, между ребрами арматуры образуются пузыри пара 2. ТГА моделируется контрольным объемом и ветвью. В контрольном объеме находятся неравновесные паровая и жидкая фазы, разделенные межфазной поверхностью. Такой контрольный объем описывается уравнениями законов сохранения массы и энергии отдельно для жидкой и паровой фаз, а также уравнением закона сохранения энергии для межфазной поверхности, параметры которой находятся на линии насыщения. Входить и выходить из ТГА может только чистая жидкость.

Для обеспечения высокого массового паросодержания на выходе из испарительного теплообменника (ИТ) ЦСТО ($x=0.75...0.85$) было предложено использовать регулятор подачи жидкости (РПЖ), который представляет собой набор дроссельных клапанов и позволяет дискретно изменять расход, подключая различные дроссели.

На основе представленного выше подхода была разработана модель и проанализирована работа двухфазного контура ЦСТО МКС "АЛЬФА" с ТГА и РПЖ. Упрощенная конфигурация контура представлена на рис.3, а эквивалентная термогидродинамическая цепь - на рис.4. Анализ проведен при переменных тепловой нагрузке и падающем на радиационный теплообменник (РТО) тепловом потоке. На рис.5 в качестве примера приводятся расчетные графики динамических характеристик ЦСТО при циклическом изменении падающего на РТО теплового потока. Это изменение связано с движением станции по околоземной орбите. Закономерности теплоотвода на РТО были изучены учеными Johnson Space Center NASA. Численный эксперимент проводился следующим образом. Орбита была смоделирована синусоидальным изменением $T_{\infty}(t)$ (рис.5а). Через каждые 2 периода тепловая нагрузка ступенчато увеличивается на 1 кВт. Расчеты проводились до момента начала кавитации насоса. Аналогичные расчеты были проведены в JSC NASA. Установлено, что в результате циклического изменения условий теплоотвода кавитационный режим наступает при $Q_{\Sigma} = 21...23$ кВт. Из выполненных автором расчетов видно, что температура кипения теплоносителя в ИТ удерживается в заданном диапазоне $10^{\circ} \pm 2.5^{\circ} \text{C}$ (рис.5б). РПЖ поддерживает паросодержание (рис. 5б) на выходе из ИТ за счет периодических изменений гидросопротивления РПЖ. Расчетный анализ показал, что ЦСТО сохраняет работоспособность на рас-

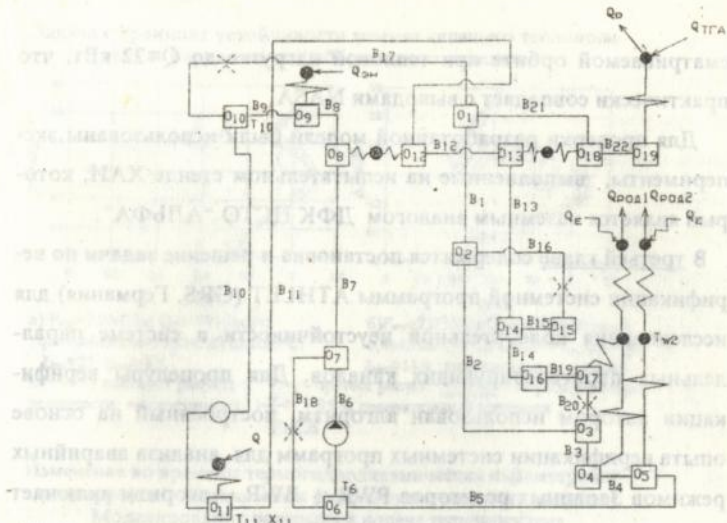
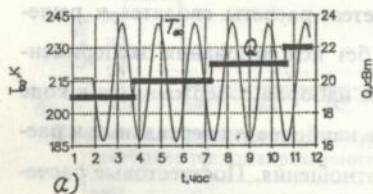


Рис. 4

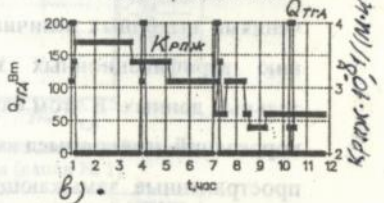
Динамические характеристики ЦСТО

Изменение во времени температуры окружающей среды и тепловой нагрузки



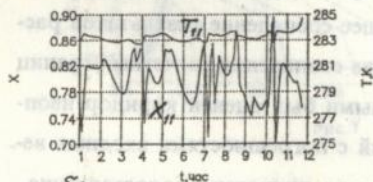
а)

История о включении нагревателя ТГА и переключении РТК



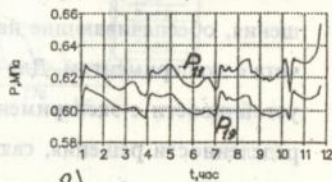
б)

Температура в ИГ и массовое расхождение паросодержание за ИГ



в)

Изменение во времени давления в ИГ и ТГА



г)

Рис.5

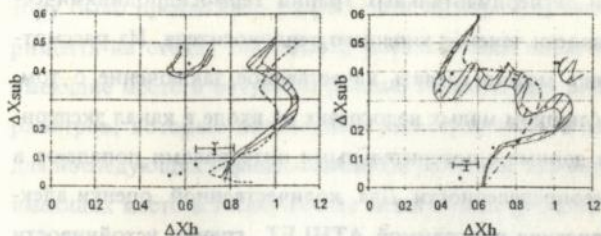
Кривая $Q_{ТГА}$ и $Q_{ТГА}$ (кВт)

смаатриваемой орбите при тепловой нагрузке до $Q=22$ кВт, что практически совпадает с выводами NASA.

Для проверки разработанной модели были использованы эксперименты, выполненные на испытательном стенде ХАИ, который является наземным аналогом ДФК ЦСТО "АЛЬФА".

В третьей главе содержится постановка и решение задачи по верификации системной программы ATHLET (GRS, Германия) для исследования колебательной неустойчивости в системе параллельных парогенерирующих каналов. Для процедуры верификации автором использован алгоритм, построенный на основе опыта верификации системных программ для анализа аварийных режимов Западных реакторов PWR и BWR. Алгоритм включает стадии постановки верификационной задачи, претестовых расчетов, посттестовых расчетов и анализа чувствительности выходных величин к погрешностям и неопределенностям входных величин, и завершается количественной оценкой адекватности программного средства с использованием коэффициента множественной корреляции между расчетными и экспериментальными значениями выходных величин. Претест-расчеты сводятся к решению верификационных задач без использования экспериментальных данных. В этом случае из наборов содержащихся в коде корреляций имеет смысл выбрать наиболее универсальные и пространенные замыкающие соотношения. Посттестовые расчеты выполняются уже с использованием экспериментальных данных. В посттестовых расчетах подбираются замыкающие соотношения, обеспечивающие наилучшее совпадение результатов расчета с экспериментом. Для анализа совпадения расчетных границ устойчивости с экспериментальными был оценен коридор неопределенности решения, связанный с погрешностями входных величин. На рис.6 в качестве примера приведено сопоставление

Задача о границах устойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах.

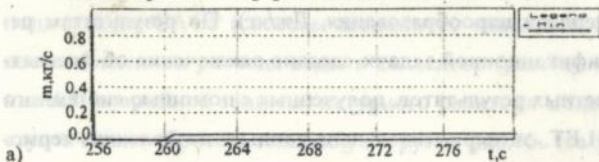


- а) $P_{\text{кр}}=7,0 \text{ МПа}$; $Q_{\Sigma}=791,0 \text{ кВт}$;
 $q_w=0,6 \text{ МВт/м}^2$; $130^\circ\text{C} \leq T_{\text{отс}} \leq 280^\circ\text{C}$;
 $\xi_{\text{кр}}=25$; $\xi_{\text{кр}}=3,5$.
- б) $P_{\text{кр}}=7,0 \text{ МПа}$; $Q_{\Sigma}=440,0 \text{ кВт}$; $q_w=0,4 \text{ МВт/м}^2$; $94^\circ\text{C} \leq T_{\text{отс}} \leq 277^\circ\text{C}$; $\xi_{\text{кр}}=25$;
 $\xi_{\text{кр}}=14,0$; пятиканальная сборка.
- постгетт расчет; претгетт расчет; - коридор неопределенности; • - эксперимент; - 95% доверительный интервал.

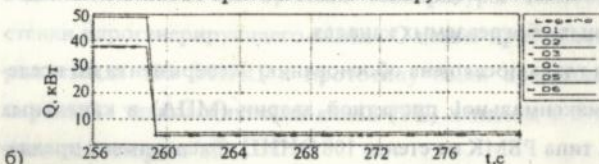
Рис.6

Изменение во времени термогидродинамических параметров в моделируемом эксперименте (подключены все шесть каналов)

Моделирование перерыва в подаче теплоносителя



Изменение во времени тепловой нагрузки по каналам



Изменение во времени температуры тепловыделяющей стенки наиболее теплонапряженного канала (канал № 1)

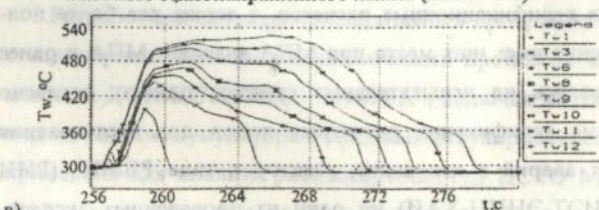


Рис.7

расчетных и экспериментальных границ термогидродинамической устойчивости течения кипящего теплоносителя. Из рассмотрения рисунка можно сделать качественное заключение о том, что при не слишком малых недогревах на входе в канал экспериментальные данные с доверительными интервалами попадают в коридоры неопределенности. Для количественной оценки адекватности описания программой ATHLET границ устойчивости течения кипящего теплоносителя в обогреваемых параллельных каналах автором был использован коэффициент множественной корреляции между расчетными и экспериментальными значениями безразмерной тепловой нагрузки $\Delta x_b = Q / (m_1 \cdot l)$ при одинаковых относительных недогревах на входе $\Delta x_{sub} = (i_{sat} - i_{co}) / l$ (где l — удельная теплота парообразования, Дж/кг). По результатам решения верификационной задачи сделано заключение об адекватности расчетных результатов, полученных с помощью системного кода ATHLET, экспериментальным данным по явлению термогидродинамической неустойчивости кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах.

Четвертая глава посвящена обоснованию эксперимента по исследованию максимальной проектной аварии (МПА) в канальных реакторах типа РБМК на стенде 108 ЭНИЦ. Эксперимент предлагается проводить с целью накопления данных для проведения последующих верификационных расчетов, а также для более полного изучения имеющих место при МПА явлений. МПА и ранее моделировалась на испытательных стендах, однако, согласно "Программе верификации расчетных кодов для исследования проектных аварий в канальных реакторах типа РБМК" (РНЦ КИ-НИКИЭТ-ЭНИЦ-ХАИ) ни один из проведенных экспериментов не моделирует полностью все имеющие место явления и ни по одному из проведенных экспериментов нет достаточно дан-

ных для проведения верификационных расчетов. Вот почему автору было предложено разработать сценарий проведения эксперимента на стенде 108 ЭНИЦ, позволяющий смоделировать все имеющие место в натурном режиме явления. Для выбора тех параметров, которые необходимо регистрировать в эксперименте для последующих верификационных расчетов, демонстрации всех имеющих место в эксперименте явлений и выработки рекомендаций экспериментаторам автором были выполнены демонстрационные расчеты с использованием системной программы АТН-LET. На рис.7 в качестве примера приведен демонстрационный расчет по одному из предлагаемых экспериментов. Разрыв напорного коллектора контура КМПЦ РБМК моделировался прекращением подачи воды в коллектор испытательного стенда, а подача воды САОР (системы аварийного охлаждения реактора) - восстановлением расхода воды в коллектор (рис.7а). Срабатывание АЗ (аварийной защиты) натурального реактора моделировалось ступенчатым сбросом тепловой нагрузки рис.7б. На рис.7в приведено изменение во времени температуры тепловыделяющей стенки парогенерирующего канала. С целью приближения геометрии стенда 108 ЭНИЦ к прототипу были предложено моделировать технологический канал (ТК) каналом с 5-ти стержневым имитатором ТВС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель и программа расчета нестационарных термогидродинамических процессов в многоэлементном ДФК ЦСТО МКС "АЛЬФА", включая математическую модель гидроаккумулятора с тепловым регулированием. Модель применена для анализа работоспособности ЦСТО МКС "АЛЬФА" в различных переходных режимах, выбора рациональных процедур регулирования, анализа устойчивости системы.

2. Проведен комплекс расчетов по анализу работоспособности и выработаны рекомендации по улучшению функциональных характеристик ДФК ЦСТО МКС "АЛЬФА". Расчетным путем было установлено что:

- для стабилизации давления в двухфазном контуре ЦСТО наиболее целесообразно использовать гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА);

- поддержание высокого массового паросодержания на выходе из испарительного теплообменника (ИТ) обеспечивается регулятором подачи жидкости (РПЖ), представляющим собой набор гидросопротивлений, подключение которых осуществляется по заданной автором логике управления;

- значения режимных параметров ДФК ЦСТО удовлетворяют требованиям технического задания в проанализированных нестационарных режимах.

3. Проведена верификация программы ATHLET (GRS, Германия) путем решения задачи о неустойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах КМПЦ РБМК. Реализована формализованная процедура верификации, сделан вывод об адекватности моделирования и о возможности применения данной программы для расчетов запасов устойчивости реакторов РБМК-1000 и РБМК-1500.

4. С целью углубления понимания режимов МПА и накопления экспериментальных данных для верификационных расчетов был разработан сценарий проведения эксперимента, моделирующего максимальную проектную аварию (МПА) в канальных реакторах типа РБМК на стенде 108 ЭНИЦ. По предложенному сценарию были выполнены демонстрационные расчеты с использованием системной программы ATHLET. С целью приближения геомет-

рии стенда 108 ЭНИЦ к прототипу были предложены мероприятия по его модифицированию.

Индексы: col (collector)- коллектор; l (liquid)-жидкость; v(vapor)-пар; sat (saturated)-параметры на линии насыщения; w (wall)-стенка, омываемая поверхность; sep (separator)-барaban-сепаратор; lwc (low water communications)-нижние водяные коммуникации; vwc (vapor water communications)-пароводяные коммуникации, f (flow)-поток.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.Н.Блинков, Н.А.Брус, Г.А.Горбенко, Н.И.Иваненко, Ю.В.Файрузов, А.А.Никонов, О.В.Сургучев. Математическое моделирование интегрированных многоэлементных контуров с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. В книге: Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов. Сер. Ракетно-космическая техника, машиностроение. / Труды межотраслевого семинара-совещания "Системы терморегулирования с двухфазным теплоносителем для космических аппаратов" (Крым. 1991).-Москва. Центр НТИ Поиск, 1992. С.10-21.

2. В.И.Nigmatulin, О.И.Melikhov, V.N.Blinkov, P.G.Gakal, N.A.Brus. The Experimental and Numerical Analyses of Boiling Flow Instability in Parallel Heated Channels. International Conference on "New Trends in Nuclear System Thermohydraulics", Pisa, Italy, 30 May - 2 June, 1994. P.779-791.

3. Ю.И.Григорьев, В.М.Цихоцкий, Ю.М.Прохоров, О.В.Сургучев, Г.А.Горбенко, В.Н.Блинков, Н.А.Брус, Е.П.Ганжа. Прогноз параметров двухфазной системы терморегулирования Российского сегмента международной космической станции "АЛЬФА" при различных условиях окружающей среды на орбите. В книге:

Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ, Харьков, 1995. С.12-18.

4.V.M.Cykhotsky, A.A.Nikonov, Y.M.Prokhorov, G.A.Gorbenko, V.N.Blinkov, N.A.Brus, P.G.Gakal. Mathematical and Experimental Modeling of the International Space Station ALPHA Russian Portion Two-Phase Thermal Control System. International Symposium "Heat Transfer Enhancement in Power Machinery"-Moscow, Russia, 25-30 May 1995. Part2. P.218-221.

5.Обоснование процедуры оценки системных кодов. Препринт ЭНИЦ. L15/02-1996.05, Электрогорск, 1996. -25с.

6. Grygoriev Y.I., Cykhotsky V.M., Prokhorov Y.M., Surguchev O.V., Gorbenko G.A., Blinkov V.N., Brus N.A., Ganja E.R. Prediction of Parameters of the International Space Station ALPHA Russian Segment Two-Phase Thermal Control System under Various Orbit Environment Conditions. National Heat Transfer Conference. Houston, Texas, 3-5 August 1996, USA. -8P (accepted for publication).

SUMMARY

Brus N.A. Modeling of Transient Thermo-Hydrodynamic Processes in Branching Two-Phase Heat Transport Loops.

The thesis is a manuscript submitted for a Candidate of Engineering Sciences Degree in the speciality 05.14.05-theoretical heat engineering Kharkov Aviation Institute, Kharkov, 1996.

Being defended are 6 scientific works in which the method of two-phase heat transport loops modeling has been developed and verification of system computer codes has been performed. The essence of method is in presentation of two-phase loops in the form of equivalent hydrodynamic and thermal networks of idealized elements carrying intrinsic properties and processes of real elements. Basing on such an approach mathematical model of Central Two-Phase

Thermal Control System (TPS) of the International Space Station ALPHA Russian Segment (ISSA RS) has been developed. Analysis of transient operational regimes has been conducted and specific ways on performances improvement have been proposed.

Verification of ATHLET (GRS, Germany) computer code with the use of boiling flow instability experimental data has been performed proving out adequacy of the code. The scenario of RBMK Large Break Loss of Coolant Accident on Electrogorsk Research and Eng. Center on Nuclear Plants Safety (EREC) experimental facility has been justified and formulated.

Key words: heat transfer, heat transport loop, two-phase coolant, thermal control system, verification.

Анотація.

Брус М.О. Моделювання нестационарних термогідродинамічних процесів у розгалужених контурах теплопереносу з двофазним теплоносієм.

Дисертація є рукопис, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.05-теоретична теплотехніка, Харківський авіаційний інститут, Харків, 1996.

На захист вноситься 6 наукових праць, в яких отримали подальший розвиток метод моделювання розгалужених контурів теплопереносу з двофазним теплоносієм та верифікація системних програм по експериментальним даним. Метод базується на принципі зображення контуру у вигляді еквівалентних термогідродинамічних ланцюгів, ідеалізовані елементи яких несуть в собі внутрішньо присутні властивості конструктивних елементів реальних систем. На основі методу розроблено математичну модель двофазного контуру (ДФК) центральної системи тепловідводу (ЦСТВ) Міжнародної Космічної Станції (МКС) "АЛЬФА". Проаналізовано роботу ДФК ЦСТВ у різноманітних нестацио-

нарних режимах, отримано рекомендації по поліпшенню функціональних характеристик.

Проведено верифікацію програми ATHLET (GRS, Німеччина) за даними експериментальних досліджень течії киплячого теплоносія у паралельних обігріваних каналах КМПЦ РБМК. Зроблено висновок стосовно адекватності моделювання явища, що досліджується.

Розроблено сценарій моделювання максимальної проектної аварії (МПА) у реакторах типу РБМК на експериментальному стенді (108 ЕНДЦ). Використовуючі запропонований сценарій, було виконано демонстраційні розрахунки.

Ключевые слова: теплообмен, контур теплопереноса, двухфазный теплоноситель, система терморегулирования, верификация.

Ответственный за выпуск-канд.техн.наук, доцент Павленко Г.В.

Подписано к печати 13.05.96.

Формат 60×90 1/16. Бумага типографская №1. Усл. печ. л 1,0.

Уч.-изд.л.0,96. Тираж 100 экз. Заказ № . Бесплатно.

Ротапринт УКРНИИМЕТа. Заказ № 0 5 Тираж 100
Харьков, 2, ул. Дарвина, 20

вирішальних ролях у формуванні особистості та розвитку її психологічних характеристик.

Проведено верифікацію вимірювальних властивостей тесту «Відомості про спорт» у школярів та студентів вищих навчальних закладів. Результати дослідження свідчать про високу надійність та валидність тесту. Також встановлено, що тест добре корелює з іншими тестами, що вимірюють спортивні знання та інтереси.

Розроблено програму навчання з предмету «Фізична культура» (МАН) у школах та університетах. Програма складається з чотирьох рівнів складності та охоплює всі основні види спорту. Також розроблено методичні рекомендації для викладачів та батьків.

Ключові слова: фізична культура, спорт, здоров'я, розвиток, освіта, молодіжні ініціативи.

Одрук: 100 екз. Ціна: 100 грн. Друк: 2000 рр.
Відповідальний за випуск: Ірина Іванівна
Відповідальний за редакцію: Олександр Петрович
Відповідальний за дизайн: Анастасія Коваленко

Відповідальний за випуск: Ірина Іванівна
Відповідальний за редакцію: Олександр Петрович
Відповідальний за дизайн: Анастасія Коваленко

AB 35.193