

РГБ ОД

19 июля 2000

На правах рукописи

КОМОВ АЛЕКСАНДР ТИМОФЕЕВИЧ

ТЕПЛООБМЕН В ПРИЕМНИКАХ ПУЧКОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ

Специальность – 05.14.05

Теоретические основы теплотехники

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



Москва – 2000

Работа выполнена на кафедре общей физики и ядерного синтеза
Московского энергетического института
(технического университета)

Официальные оппоненты – доктор технических наук

Ю.А. Зейгарник

– доктор технических наук,

профессор Ю.М. Павлов

– доктор технических наук,

профессор Г.Л. Саксаганский

Ведущая организация – Российский научный центр

«Курчатовский институт»

Защита состоится «19» мая 2000 г. в 10⁰⁰ часов

в Малом актовом зале на заседании диссертационного совета Д 053.16.02

в Московском энергетическом институте (техническом университете)

по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная 14,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу:

111250, Москва, Красноказарменная 14, Ученый совет МЭИ

Автореферат разослан «10» апреля 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



В.Я. САСИН

3 496-011, 0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На современном этапе термоядерных исследований перед содружеством ученых ведущих стран мира поставлена задача разработки технического проекта международного термоядерного экспериментального актора (ИТЭР), цель которой – сооружение и начало эксплуатации уже в первом десятилетии следующего века. При осуществлении проекта ИТЭР должен быть здан инженерно-физический фундамент для ДЕМО– коммерческого энергетического реактора, концептуальное рассмотрение которого в России начато в 1992 году. Актуальной проблемой в создании термоядерных реакторов является разработка теплообменных устройств для рекуперации энергии пучков заряженных и нейтральных частиц в диверторном устройстве разрядной камеры реактора и в системе дополнительного нагрева плазмы – инжекторе быстрых нейтральных атомов. Проблема разработки подобных теплообменных устройств – приемников пучков заключается в обеспечении теплосъема экстремально высоких плотностей энергии, достигающих уровня 120 МВт/м^2 в инжекторе и 400 МВт/м^2 в диверторе. Стойчивый, бескризисный теплообмен при столь высокой плотности энергии является тривиальной задачей. Одним из наиболее эффективных способов достижения критических тепловых нагрузок, превышающих 30 МВт/м^2 , является кипение в недогретом закрученном потоке. Однако экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам в этих условиях явно недостаточно для уверенных обобщений и выработки надежных рекомендаций для создания приемников мощных пучков. Известные экспериментальные данные по критическим тепловым нагрузкам, как правило, не выходят за пределы $20\text{--}30 \text{ МВт/м}^2$ либо получены при чрезвычайно высоких скоростях потока или высоких давлениях.

Данная работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой научно-технической программой «Международный термоядерный реактор ИТЭР и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в его поддержку на 1996-98 гг.», утвержденной Постановлением Правительства РФ № 1119 от 19 сен-

тября 1996 года и продленной на 1999-2001 гг. Постановлением Правительства РФ № 1417 от 1 декабря 1998 года.

Цель работы.

1. Создать массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам в области рабочих параметров (давление $p = (0,5 \div 2,0)$ МПа, массовая скорость теплоносителя $\rho w \leq 10000$ кг/(м²·с)), актуальной для приемников мощных пучков в инжекторах быстрых нейтральных атомов термоядерных реакторов.
2. Дать физическое обоснование возможности рекуперации энергии мощных длинно-импульсных и стационарных пучков с плотностью снимаемых тепловых потоков, достигающей 80 МВт/м².
3. Разработать расчетную модель приемника с замкнутым математическим описанием теплогидравлических процессов в теплосъемном элементе приемника с численной реализацией, позволяющей выполнять инженерные расчеты тепловых физических параметров приемника и быть исходной базой для решения термодинамической задачи теплосъемного элемента.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получено семейство из 69 кривых кипения воды в недогретом закрученном потоке в актуальном для приемников пучков диапазоне режимных параметров. Всего в обработку вошло 1259 экспериментальных точек. Выполнен анализ влияния скорости, закрутки, недогрева на интенсивность теплоотдачи. Основными моментами анализа являются следующие положения:

установлено, что в докризисных режимах кипения теплоотдача возрастает с ростом массовой скорости при ее значениях, превышающих 4000 кг/(м²·с);

влияние закрутки потока на интенсивность теплоотдачи при кипении весьма заметно при относительно невысоких тепловых нагрузках. С ростом плотности тепловых потоков отчетливо наблюдается тенденция к снижению эффекта закрутки при сохранении некоторого превышения теплоотдачи в закрученном потоке по сравнению с прямым потоком в области $\rho w > 4000$ кг/(м²·с);

зависимость плотности тепловых потоков от температурного напора при кипении в недогретом потоке заметно более слабая $q \sim \Delta T_c^{1,8}$, чем при кипении на

щенной жидкости. Получено в безразмерном виде соотношение для расчета коэффициента теплоотдачи при развитом кипении в недогретом потоке для широкого диапазона массовых скоростей.

Впервые получен систематизированный массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при кипении воды в недогретом закрученном потоке и одностороннем обогреве труб с цилиндрическим внутренним каналом диаметром 8 мм и внешним периметром в форме кольца и прямоугольника для области режимных параметров, актуальной для приемников мощных пучков.

Экспериментально установлено, что в условиях неоднородного обогрева появление локальной паровой пленки в окрестности «лобовой» точки при кипении в недогретом закрученном потоке не приводит к быстрому росту температуры стенки с последующим ее пережогом. В режимах кипения с сильным недогревом и высокими массовыми скоростями при неоднородном обогреве по периметру канала могут одновременно устойчиво существовать три режима теплообмена: конвективный, пузырьковое и пленочное кипение. Установлено, что после достижения критической тепловой нагрузки возможен квазистационарный режим теплообмена в течение времени (10^1 – 10^2) с, по истечении которого наблюдается медленный рост температуры стенки с одновременным ростом амплитуды ее колебаний.

Выполнен критический анализ наиболее известных эмпирических и полуэмпирических соотношений. На основе сравнения расчетов по этим соотношениям с данными скелетных таблиц выявлена оптимальная функциональная зависимость критической тепловой нагрузки при кипении в условиях прямого недогретого потока от таких режимных параметров как массовая скорость, недогрев, давление, диаметр. Получены эмпирические расчетные соотношения для $q_{кр}$ при кипении недогретого закрученного потока для значений массовых скоростей $\rho w < 2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, относительных энтальпий потока (недогрева) $x > -0,1$ и $\rho w > 2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, $x < -0,1$ с удовлетворительным соответствием известным экспериментальным данным для прямого и закрученного потоков.

5. Разработана физическая модель кризиса кипения в недогретом закрученном потоке при одностороннем обогреве, на основе которой получено полуэмпирическое соотношение для $q_{кр}$, удовлетворительно согласующееся со всеми экспериментальными данными по критическим тепловым нагрузкам (при $x < 0,1$ и $\rho_w > 2000$ кг/(м²·с).
6. Разработан метод адиабатических сечений, который позволяет редуцировать пространственную краевую задачу в плоскую, на базе которого создана модульная компьютерная программа ACS-код, позволяющая выполнять расчеты теплогидравлических и термодинамических параметров теплосъемных элементов приемников.
7. Получено приближенное аналитическое решение краевой задачи теплопроводности при неоднородных граничных условиях, позволяющее производить инженерную оценку распределения температурного поля в стенке трубы при одностороннем обогреве с внешней стороны и смешанном теплообмене по внутреннему периметру теплосъемного элемента, а также оценку времени установления стационарного режима теплообмена, по длительности которого можно судить о характере действующих на приемник пучков (короткоимпульсный, или стационарный).
8. Создан оригинальный экспериментальный стенд для исследования теплообмена и кризиса кипения в условиях, идентичных имеющим место в приемниках мощных пучков. Стенд оснащен автоматизированной системой управления сбора и обработки данных теплофизических измерений.

Практическая ценность и апробация работы

1. Полученные экспериментальные данные по теплообмену и критическим тепловым нагрузкам могут быть непосредственно использованы при проектировании и разработке приемников мощных пучков, они существенно расширяют существующие представления о физике процессов теплообмена при кипении недогретом закрученном потоке в условиях одностороннего обогрева.
2. Разработанный в работе метод адиабатических сечений позволяет проводить оптимизацию параметров режима охлаждения тепловоспринимающих трубок

приемников пучков нейтральных атомов–калориметров и отклоненных ионов импульсной системы инжекции.

Разработанная на основе метода адиабатических сечений модульная компьютерная программа ACS-код официально принята Международной рабочей группой по проектированию инжекторов в качестве рабочего инструмента для расчета теплогидравлических и термочностных параметров калориметра и приемника отклоненных ионов ИТЭР. Результаты соответствующих расчетов содержатся в технической документации проекта ИТЭР.

Приближенное решение краевой задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями позволяет выполнять оценочные инженерно-технические расчеты стационарных температурных полей и времени установления стационарного теплообмена, которое важно знать при проектировании теплообменных устройств, работающих в импульсном режиме, для определения характера теплообмена. Время установления стационарного теплообмена можно рассматривать как объективный критерий для временной классификации импульсных воздействий (короткоимпульсный, длинноимпульсный, стационарный).

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены и обсуждены на VI Всероссийской конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (ИПТР) в Санкт-Петербурге 27-29 мая 1997 г.; на второй Российской национальной конференции по теплообмену в Москве 26-30 октября 1998 г.; на Международной конференции «Информационные средства и технологии» в Москве 20-22 октября 1998 г.; на XII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов в Москве 25-28 мая 1999 г.; на первой научно-технической конференции «Моделирование технологических процессов в энергетике» в г.Волжском 26-28 сентября 1999 г.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- тщательной проработкой методики измерений и обработки первичных экспериментальных данных;

- воспроизводимостью полученных результатов исследований и согласованностью их с имеющимися в литературе опытными данными в перекрывающихся диапазонах параметров режимов;
- использованием хорошо зарекомендовавшей себя в отношении корректности теплофизических измерений автоматизированной системы измерений стандарте приборного интерфейса МЭК 625.1, установленной и отлаженной Центром автоматизированных теплофизических исследований;
- достоверность представленных в работе теоретических положений подтверждается сопоставлением результатов расчетов по полученным соотношениям с экспериментальными данными или точным численным решением.

Автор защищает:

- экспериментальные данные по теплообмену и критическим тепловым нагрузкам при кипении в недогретом закрученном потоке в условиях неоднородного обогрева;
- расчетную модель приемников пучков с замкнутым математическим описанием процессов в теплосъемном элементе, основанную на методе адиабатических сечений и позволяющую с использованием модульной компьютерной программы ACS-код выполнять расчеты теплогидравлических и термopрочностных параметров теплосъемных элементов приемников мощных пучков;
- физическую модель возникновения кризиса теплообмена при кипении в недогретом закрученном потоке при неоднородном обогреве и полученное на его основе расчетное соотношение для критических тепловых нагрузок;
- приближенное решение краевой задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями, позволяющее выполнять оценочные инженерно-технические расчеты стационарного теплообмена и времени выхода на стационарный режим теплообмена.

Публикации.

Основное содержание диссертационной работы изложено в 26 публикациях.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения (основные результаты и выводы). Общий объем 402 страниц компьютерного текста, одержажих 146 рисунка, 12 таблиц. Список использованной литературы ключает 225 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ принципов разработки приемников пучков

В главе выполнены обзор и анализ существующих подходов к созданию приемников мощных пучков в системах инъекции термоядерных установок.

При разработке и создании приемников мощных пучков в инъекционных системах термоядерных установок могут быть использованы два типа приемников:

- термоинерционные – в системах инъекции с короткоимпульсными пучками ($\tau_n \leq 0,5$ с);
- с активной системой охлаждения в системах инъекции с длинноимпульсными и стационарными пучками.

В качестве базовых теплосъемных элементов в приемниках пучков с активной системой теплоотвода в настоящее время используются либо HV-модули с максимумом плотности воспринимаемых тепловых потоков до 30 МВт/м^2 в импульсном режиме с ограниченным числом импульсов, либо трубчатые теплосъемные элементы с интенсификацией теплообмена спиральными вставками.

В обзоре приведены результаты основных работ Gambill и Bergles по интенсификации теплообмена и критическим тепловым нагрузкам при использовании закрученных лент. В качестве основного вывода этих фундаментальных работ приводится следующее:

- применение закрутки заметно увеличивает теплоотдачу при конвективном теплообмене;
- критические тепловые потоки в закрученных потоках приблизительно вдвое выше, чем в прямом потоке при сопоставимых условиях измерений.

Приводится краткое описание некоторых приемников пучков, в том чис приемника, разработанного лабораторией ORNL. Описаны концептуальная схе модульного приемника пучков, приемник пучков термоядерной установки JET вращающимися теплосъемными панелями, набранными из HV-модулей, а так приемник пучков системы инъекции T-15.

Обзор литературных источников по принципам разработки приемник мощных пучков показал, что в настоящее время отсутствует единый расчетн теоретический подход к анализу теплогидравлической и термпрочностной зада позволяющий выполнять замкнутые расчеты обобщенной модели приемник пучков.

Глава 2. Критические тепловые нагрузки при кипении в недогрето потоке с неоднородным обогревом

Во второй главе автором выполнен сравнительный анализ 17 наиболее и вестных эмпирических и полуэмпирических соотношений по критическим тепл вым нагрузкам. На основе сравнения приведенных в главе 2 результатов расчето по этим соотношениям с данными скелетных таблиц для кипения воды в условия прямого недогретого потока была выявлена оптимальная функциональная зави симость критического теплового потока от следующих параметров: давлени массовой скорости, недогрева, диаметра канала.

Автором получены эмпирические соотношения для критических тепловы нагрузок при кипении в условиях прямого и закрученного потока недогрето жидкости с поправкой на учет влияния закрутки потока, описывающие экспери ментальные данные с удовлетворительным согласием (среднеквадратичное от клонение вошедших в обработку данных не выше $\pm 30\%$):

при $\rho w \geq 2000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $x < -0,1$

$$q_{\text{кр}} = 0.0004r \cdot \left(\frac{\rho_v \sigma}{d} \right)^{1/2} \text{Re}_r^{0.44} [1 + 0.16x] \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.45} \left(\frac{d_r}{d_0} \right)^{-0.25} \left(1 + \frac{30,5}{y^2} \right)^{1/3} k_n, \quad (1,а)$$

при $\rho w < 2000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $x > -0,1$

$$q_{кр} = 0.02q_{кр,0} \text{Re}^{0.44} \left[1 + 4.22x \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.45} \left(\frac{d_r}{d_0} \right)^{-0.25} \left(1 + \frac{3,2}{y^2} \right)^{1/3} \right] k_n, \quad (1,6)$$

е $d_0 = 8$ мм, x – недогрев, y – степень закрутки потока, $q_{кр,0}$ – критический тепловой поток, рассчитанный по соотношению гидродинамической теории, k_n – коэффициент неоднородности распределения теплового потока по периметру лажаемого канала.

Сравнение результатов расчетов $q_{кр}$ по (1,а) и (1,б) при кипении в условиях ямого и закрученного потока недогретой жидкости приведено на рис.1,а и 1,б.

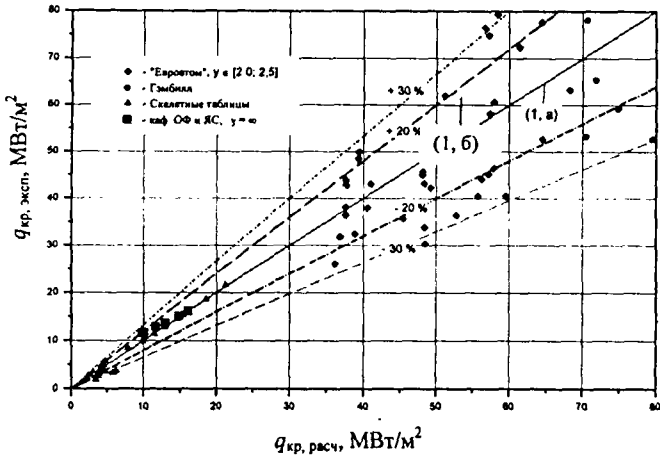
Глава 3. Описание экспериментальной установки для исследования критического теплообмена

На кафедре общей физики и ядерного синтеза создан и успешно работает оригинальный экспериментальный стенд по исследованию теплообмена и кри-са кипения.

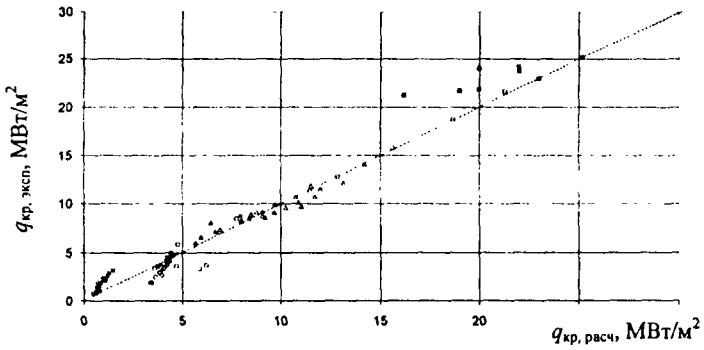
Экспериментальный стенд включает в себя вакуумную камеру, в которую помещается рабочий участок – фрагмент теплосъемного элемента приемника ионных пучков. Давление в вакуумной камере $p \leq 1 \cdot 10^{-3}$ Па создается вакуумной истемой, включающей в себя два диффузионных и три форвакуумных насоса. нагрев рабочего участка осуществляется электронным пучком, генерируемым лектронно-лучевым агрегатом ЭЛА–60/15Т. Циркуляция теплоносителя в гид-влическом контуре со стабилизацией давления обеспечивается двухплунжер-ым насосом, а его охлаждение после нагрева в рабочем участке – в типовом те-тообменнике. Измерения электротехнических, теплофизических параметров полняются АСНИ в стандарте КАМАК и приборного интерфейса МЭК 625.1.

Схема рабочего участка представлена на рис. 2. Рабочий участок представ-ет собой мишень 1, являющуюся фрагментом приемника пучков в системе ин-екции токамака Т–15 (рис.2,а) и реактора ИТЭР (рис.2,б), изготовленную из ме-я, к которой приварены трубки–держатели 2 (они же тепловые мосты) из нержа-ющей стали Х18Н10Т.

а)



б)



Источник данных	Давление теплоносителя p , МПа	$-x$	ρ_w , кг/(м ² ·с)	y
○ Скелетные таблицы	0.12 + 1.3	0.01 + 0.14	220 + 8000	∞
△ Оводов Кузма-Кичта	0.12 + 1.3	0.01 + 0.14	220 + 8000	1.875
□ Suzuki	0.6 + 1.5	0.12 + 0.20	5000	3.47
× Kinoshita	0.2	0.20	1200 + 3600	1.8 + ∞

Рис. 1. Сравнение критических тепловых нагрузок, рассчитанных по соотношению (1, а) и (1, б), с экспериментальными

Для интенсификации теплообмена поток теплоносителя закручивается крученной лентой 3, установленной внутри канала, изготовленной из стальной ленты (X18H10T) толщиной 0,5 мм с шагом закрутки 28 мм.

Односторонний нагрев рабочего участка осуществляется вертикально ориентированным электронным пучком с энергией электронов (40–60) кэВ и токами о 250 мА. Рабочий участок, служащий анодом и находящийся под нулевым потенциалом, изолировался от гидравлического контура фторопластовыми втулками, что позволяло достаточно точно производить измерения анодного тока и рассчитывать подводимый к теплоносителю тепловой поток.

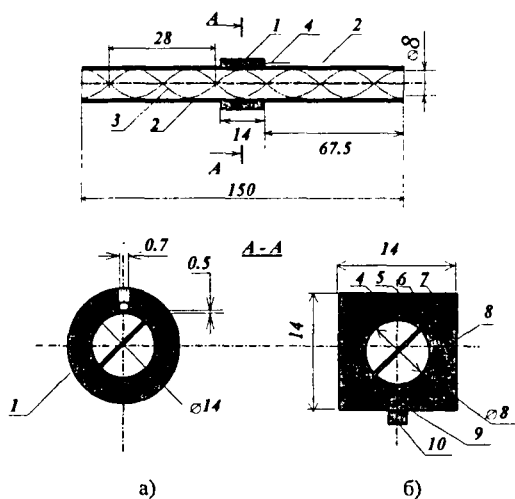


Рис. 2. Схема рабочего участка:

1 — фрагмент штатной теплосъёмной трубки приёмника пучков (медь) Т-15 и ИТЭР; 2 — термомосты-держатели фрагмента; 3 — скрученная лента с шагом 28 мм; 4 — управляющая хромель-алюмелевая микротермопара; 5–9 — хромель-алюмелевые термопары, 10 — пьезоэлектрический датчик

Схема размещения исследуемого фрагмента приемника в вакуумной камере приведена на рис. 3.

В этой же главе приведен тщательный анализ погрешности прямых и косвенных измерений, выполняемых на экспериментальном стенде.

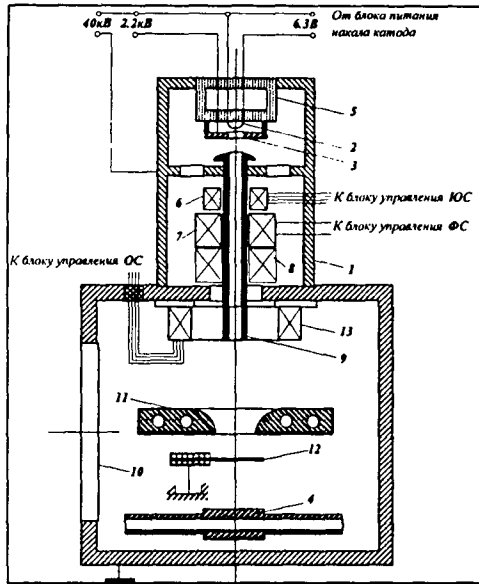


Рис.3. Схема размещения фрагмента приёмника в вакуумной камере теплофизического стенда ЭЛА-60/15Т:

- 1 — электронная пушка электронно – лучевого ЭЛА-60/15Т; 2 — катод;
 3 — управляющий электрод; 4 — испытуемый фрагмент (анод); 5 — высоковольтный изолятор; 6 — катушки юстирующей системы (ЮС); 7 — катушки фокусирующей системы (ФС); 8 — катушки отклоняющей системы (ОС);
 9 — лучепровод; 10 — вакуумная камера; 11 — охлаждаемая диафрагма калибровки пучка электронов; 12 — вращающийся зонд; 13 — дополнительные катушки отклоняющей системы

Глава 4. Расчетная модель теплогидравлических процессов в приемнике пучков с интенсификацией теплообмена закрученными лентами

В данной главе разработана расчетная модель приемника с замкнутым математическим описанием и численной реализацией в модульной компьютерной программе ACS-код, позволяющая выполнять теплогидравлические расчеты, быть исходной базой для расчетов термпрочностных параметров приемников мощных пучков.

Определение полей температуры в теплосъёмных элементах в виду нелинейности граничных условий теплообмена на границе контакта жидкость – стенка з-за наличия в общем случае смешанных зон кипения и однофазного конвективного теплосъёма как при импульсном, так и стационарном воздействии внешнего эплового потока пучка, находится численно. Решение указанной задачи совместно с термopрочностным анализом теплосъёмной трубки может быть реализовано помощью известного специализированного компьютерного пакета ANSYS. Однако высокая стоимость этого пакета, сложность подготовки исходных данных о описанию специфики теплофизических и термopрочностных моделей процессов с последующей конечно-элементной дискретизацией геометрической области исследования общего вида приводят на практике к необходимости разработки отдельной расчётно-теоретической модели теплогидравлического, термopрочностного расчётов и анализа параметров охлаждения трубчатых теплосъёмных элементов.

Метод адиабатических сечений

Для класса длинных $L \gg r_e$ трубок общая трёхмерная задача по определению поля температуры может быть редуцирована в двухмерную. В безразмерных цилиндрических координатах $\tilde{r} \equiv r/r_i$, $\tilde{z} \equiv z/L$ и при фиксированных теплофизических свойствах материала краевая задача теплопроводности примет вид:

$$\mathfrak{A}T_c + \left(\frac{r_i}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 T_c}{\partial \tilde{z}^2} = 0 \quad (2)$$

люс соответствующие граничные условия, где $\mathfrak{A} = \Delta_{\tilde{r},\theta} - \frac{\partial}{\partial \tilde{t}}$ — плоский оператор уравнения теплопроводности.

Уравнение (2) содержит квадрат малого параметра $r_i/L \ll 1$, соответствующего условию, выделяющему класс длинных трубок. Очевидно представление

$$\left(\frac{r_i}{L}\right)^2 \equiv \frac{\tau_i}{\tau_L} \ll 1, \text{ где } \tau_i = \frac{r_i^2}{a_c}, \quad \tau_L = \frac{L^2}{a_c}, \quad (3)$$

десь τ_i , τ_L — характеристические масштабы времени диффузии теплового потока вдоль периметра сечения трубки и вдоль продольной оси соответственно. Физи-

чески условие (3) указывает на преобладание процессов теплообмена с теплоносителем при растекании теплового потока по периметру сечения трубки в сравнении с кондуктивным теплообменом между сечениями, взаимно расположенными вдоль оси трубки. Для таких сечений поле температуры может быть представлено в виде:

$$T_c(t, \tilde{r}, \varphi; \tilde{z}) = T_{c0}(t, \tilde{r}, \varphi; \tilde{z}) + \left(\frac{r_i}{L}\right)^2 T_{c1}(t, \tilde{r}, \varphi; \tilde{z}) + \dots, \quad (4)$$

где в членах ряда справа координата z рассматривается в качестве параметра идентификатора расположения сечения в z -направлении.

Все изложенные далее результаты теплогидравлических исследований основаны на применении этого метода, названного нами как метод «адиабатических сечений». Соответствующая компьютерная реализация числовых схем названа как ACS-код (Adiabatic Cross Section Code).

При расстояниях между сечениями, меньших Δx , представление поля температуры в виде (4) неприемлемо из-за влияния процессов кондуктивного теплообмена между сечениями трубки в конструкционном материале. Поле температуры в отрезках трубки длиной, меньшей Δx , определяется из решения общей задачи краевой теплопроводности с учётом кондуктивного перетекания тепла по материалу в направлении продольной оси трубки. Параметр адиабатичности теплосъёмной трубки Δx может быть определён из сравнения теплового потока за счёт теплопроводности конструкционного материала λ_c между прилегающими сечениями фрагмента трубки длиной Δx в z -направлении и радиально направленного теплового потока, отводимого теплоносителем через стенки канала охлаждения той же длины за счёт локального процесса теплообмена с коэффициентом теплоотдачи α между рассматриваемыми сечениями:

$$\Delta x = \left[\frac{\lambda_c \delta_c}{\alpha}\right]^{1/2} \ll L. \quad (5)$$

Из анализа (5) следует, что метод адиабатических сечений тем точнее описывает поле температуры в длинных тонких трубках, чем выше теплоотдача. Например, при поверхностном кипении в высокорасходном недогретом потоке схе-

а идеальной адиабатичности реализуется практически полностью за исключением кондуктивного теплообмена между сечениями в z -направлении трубки с остаточным малым значением параметра адиабатичности, $\Delta x \sim 10^{-3}$ м.

Математическая формулировка основных уравнений и граничных условий

1. Общая постановка.

Уравнение нестационарной теплопроводности, определяющее поле температуры в конструкционном материале без внутренних источников тепла, имеет вид:

$$\rho_c c_{pc} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_c r \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial \varphi} \right). \quad (6)$$

При изменении параметров в области $\varphi \in [-\pi, \pi]$, $r \in [r_i, r_e]$, $z \in [0, L]$ и граничных условий в виде:

• начальные условия:

$$T_c(0, r, \varphi, z) = T_{c,0}(r, \varphi, z), \quad (7)$$

• граничные условия:

1) на внешней поверхности

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r}(t, r_e, \varphi, z) = q_e(t, \varphi, z) \equiv q_m q_r(z) q_\varphi(\varphi) q_t(t), \quad (8)$$

2) на внутренней стенке канала охлаждения

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r}(t, r_i, \varphi, z) = q_i(t, r_i, \varphi, z) \equiv \alpha(t, \varphi) (T_{c,i}(t, r_i, \varphi, z) - T_f(t, z)), \quad (9)$$

3) на концевых сечениях:

$$\frac{\partial T_c}{\partial z}(t, r, \varphi, 0) = \frac{\partial T_c}{\partial z}(t, r, \varphi, L) = 0, \quad (10)$$

с дополнительным условием угловой симметрии поля температуры относительно оси пучка

$$\frac{\partial T_c}{\partial \varphi}(t, r, \varphi) = \frac{\partial T_c}{\partial \varphi}(t, r, -\varphi). \quad (11)$$

Для получения поля температуры из решения краевой задачи (6)–(11) необходимо найти распределение среднемассовой температуры в потоке теплоносителя по длине трубы, которое определяется из уравнения теплового баланса:

$$\rho_f c_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + w_z \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{f,t} \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + \frac{2}{r_i} \langle q_i \rangle_\pi, \quad (12)$$

$$z \in [0, L]$$

- начальные условия:

$$T_f(0, z) = T_0, \quad (13)$$

- граничные условия:

$$T_f(t, 0) = T_0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial z}(t, L) = \frac{\partial T_f}{\partial z}(t, 0) = 0.$$

Коэффициент турбулентной теплопроводности $\lambda_{f,t}$ в закрученном потоке определяется по эмпирическому соотношению

$$\lambda_{f,t} = \lambda_f (1 + 0.0144 \text{Re}_f \text{Pr}_f \xi_t), \quad (15)$$

здесь ξ_t — коэффициент гидравлического сопротивления канала со скрученной лентой.

- Взаимное влияние поля температуры в стенке и среднемассовой температуры теплоносителя, как это следует из (9), определяется коэффициентом теплоотдачи на границе жидкость-стенка, который рассчитывается по уравнениям А.Берглеса при однофазной конвекции в закрученном потоке, кривой кипения Thom в области докритического кипения и соотношению для пленочного кипения, полученному в данной работе:

$$\alpha = c \left[\frac{\lambda_v r^2 (\rho_f - \rho_v) w_z^2}{y^2 v_v r_i^3 \Delta T_c} \right]^{0.2} \left(\frac{\rho_f w}{(\rho_f w)_0} \right)^{0.34} \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.36}, \quad (16)$$

где $(\rho w)_0 = 500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{с})$, $c = 0.71$.

Глава 5. Результаты экспериментальных исследований теплообмена и ризиса теплоотдачи при кипении в недогретом закрученном потоке

Описана методика обработки первичных данных экспериментальных исследований. Приведены результаты экспериментальных исследований по теплообмену при кипении воды в недогретом закрученном потоке (69 кривых кипения) воды цилиндрической трубе и трубе с внешним периметром в форме квадрата. Диапазоны изменения режимных параметров: $p \in [0,7; 1,5]$ МПа, $\rho_w \in [540; 8800]$ $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; $x \in [-0,2; -0,4]$. В качестве примера на рис. 4 приведены кривые кипения воды при $p = 0,7$ МПа, $x = -0,245$, $\rho_w \in [540; 8800]$ $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

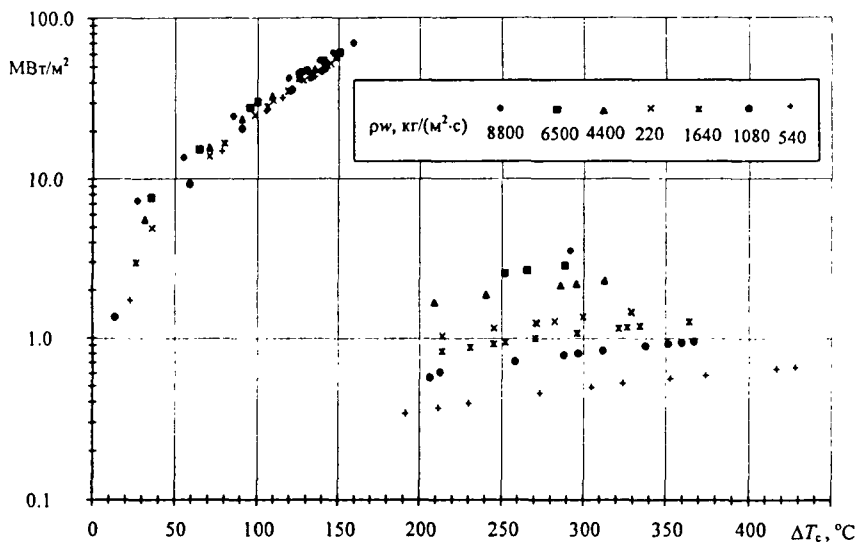


Рис. 4. Кривые кипения воды в недогретом закрученном потоке

С использованием методики решения теплогидравлической задачи, описанной в главе 4, выполнены расчеты по распределению температуры по сечению трубы, плотности тепловых потоков по внешнему и внутреннему периметрам, коэффициентов теплоотдачи к воде (см. рис. 5–7).

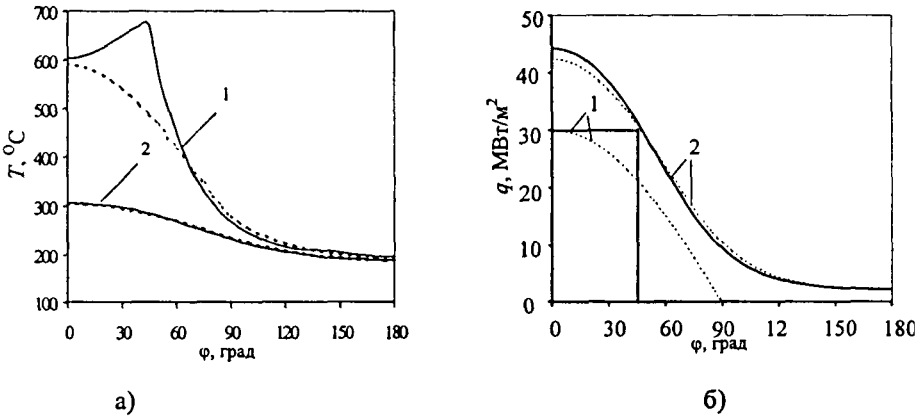


Рис. 5. Распределение температуры (а) и плотности теплового потока (б); 1 – по внешнему, 2 – по внутреннему периметру трубы при $q_e = 30 \text{ MWt/m}^2$; -- внешний периметр в форме квадрата, ---- цилиндрическая труба

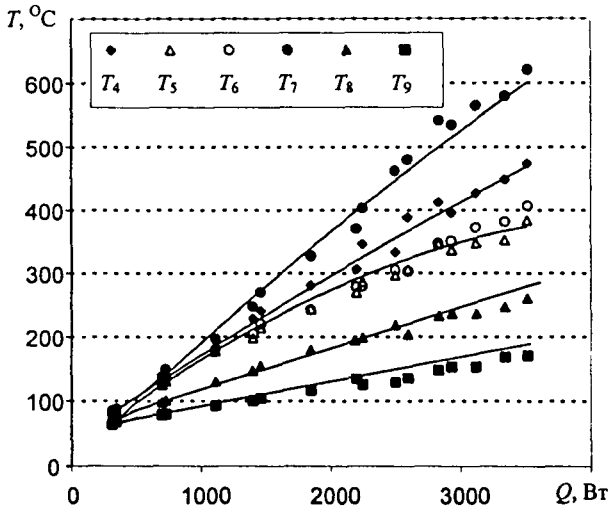


Рис. 6 Сравнение прямо измеренных значений температуры стенки рабочего участка (маркеры) с полученными численным решением (сплошные линии), $p = 1.0 \text{ МПа}$, $\rho_w = 4350 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $x = -0.23$, Q – отводимый тепловой поток
Координаты термопар $T_4 - T_9$

	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
r , мм	4.5	5.2	5.2	7.4	6.0	6.0
φ , градус	0	51	51	42	90	180
z , мм	0	-1.1	1.9	3.5	0	0

* — Начало системы отсчета совмещено с центральным поперечным сечением

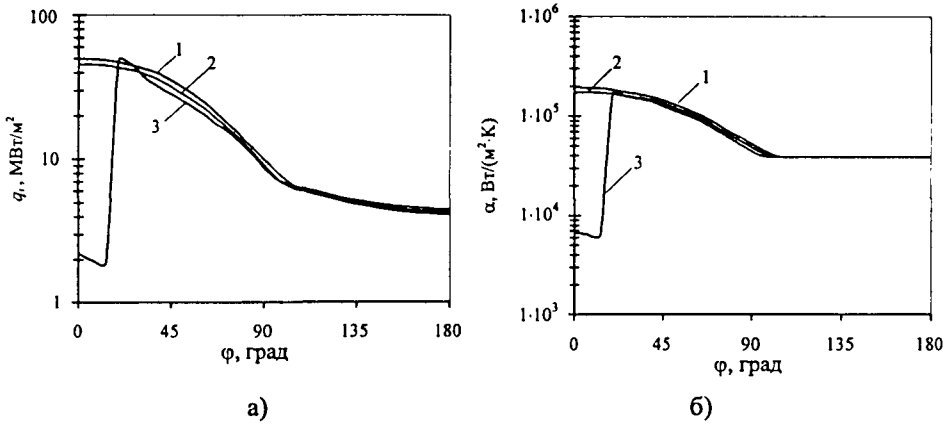


Рис. 7. Изменение плотности теплового потока (а) и коэффициента теплоотдачи (б) по внутреннему периметру трубы, $q_c = 33,7 \text{ МВт/м}^2$, $\rho w = 8800 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$: 1 – $p = 0,7 \text{ МПа}$; 2 – $p = 1,0 \text{ МПа}$; 3 – $p = 1,5 \text{ МПа}$

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

при массовой скорости $\rho w \leq 2500 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ практически отсутствует влияние скорости теплоносителя в ядре потока на теплоотдачу; кривые кипения описываются соотношением

$$q = 4800 \Delta T_c^{1.8} \exp(p/p_0), \quad (17)$$

где $p_0 = 3,0 \text{ МПа}$;

при массовой скорости, превышающей значение $\rho w > 4000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, возникает заметное расхождение кривых кипения по скорости потока, кривые кипения описываются соотношением

$$q = 4570 \left(1 + \frac{0.0283}{y^{0,81}} \frac{\rho w}{(\rho w)_0} \right) \Delta T_c^{1.8} \exp\left(\frac{p}{p_0}\right); \quad (18)$$

при $2500 < \rho w < 4000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

$$q = 4800 \left(0.85 + \frac{\rho w}{(\rho w)_0} \right) \Delta T_c^{1.8} \exp\left(\frac{p}{p_0}\right), \quad (19)$$

здесь $p_0 = 3,0 \text{ МПа}$, $(\rho w)_0 = 500 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$;

недогрев теплоносителя в исследованном диапазоне изменения x не оказывает влияния на теплоотдачу;

влияние закрутки на интенсивность теплоотдачи в области тепловых нагрузок, соответствующих началу кипения весьма заметно;

в области высоких тепловых нагрузок зависимость теплоотдачи от закрутки потока уменьшается;

вблизи кризиса тенденция к сближению кривых кипения при сохранении несколько более высокой теплоотдачи в закрученном потоке по сравнению с прямым очевидна.

В этой главе приводятся также описание методики идентификации кризиса теплоотдачи и массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при кипении в закрученном недогретом потоке. На рис.8 представлена зависимость экспериментальных значений критических тепловых нагрузок от массовой скорости при $p = 0,7$ МПа.

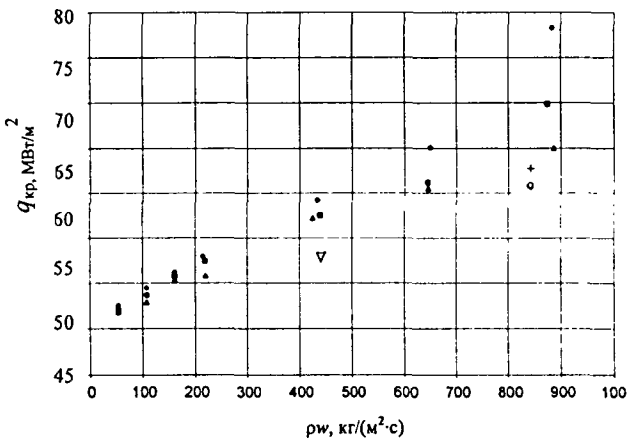


Рис.8. Зависимость экспериментальных значений критических тепловых нагрузок от массовой скорости ($p = 0,7$ МПа; $y = 1.75$ x: ◆ – 0,280; □ – 0,240; Δ – 0,200); ▽, +, ○ – данные «Евроатома», $y = 2,0$

Сравнение собственных экспериментальных данных, а также данных «Евроатома» и Гэмбилла по критическим тепловым нагрузкам с расчетными по (1а) приведено на рис. 9. Отклонение значительной части данных Гэмбилла от расчетных превышает – 30%, что объясняется тем, что эти данные получены при чрезвычайно высоких скоростях потока, достигающих 53 м/с, при которых, по-видимому, происходит вырождение кризиса теплоотдачи при кипении 1-го рода.

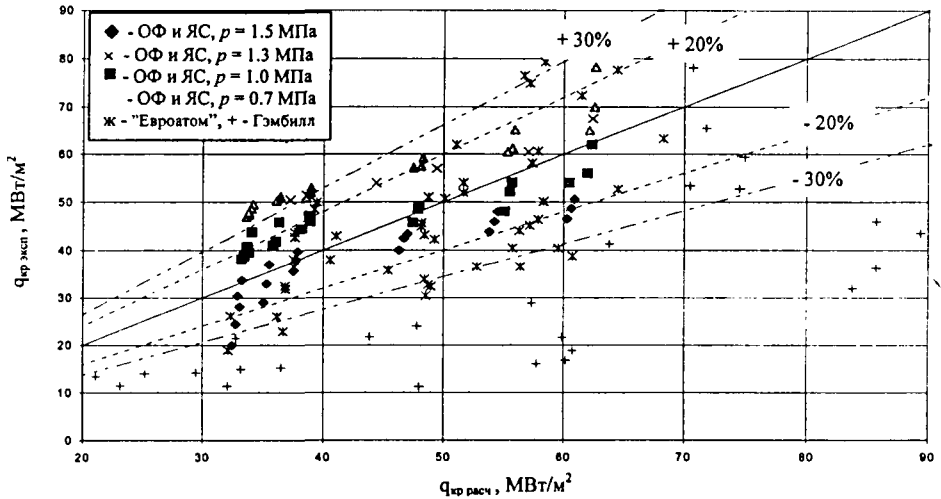


Рис.9.Критические тепловые нагрузки при кипении в недогретом закрученном потоке, $q_{кр,эксп}$ – эксперимент, $q_{кр,расч}$ – расчет по (1а)

Глава 6. Физическая модель кризиса теплообмена при кипении в закрученном недогретом потоке при неоднородном обогреве

Основные положения разработанной автором диссертации физической модели кризиса кипения в сильно недогретом закрученном потоке:

1. Согласно модели высыхания микрослоя жидкости под образовавшимся паровым скоплением – бланкетом (Харамура, Като) кризис при кипении имеет место, когда паровой бланкет изолирует нагреваемую поверхность и тонкий слой

жидкости от ядра потока, при этом испарение жидкости идет интенсивнее, чем поступление жидкости из ядра.

Модель получила достаточно убедительное обоснование в ряде экспериментальных работ, подтверждающих существование микрослоя жидкости под паровым бланкетом.

2. Схема обогрева трубы и характер распределения температуры стенки изображены на рис. 10.

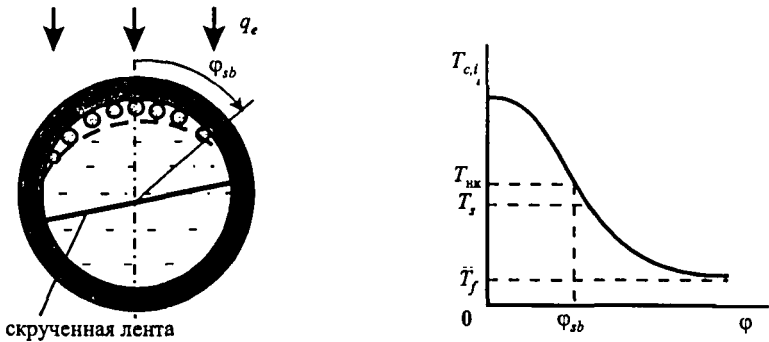


Рис. 10. Схема обогрева трубы и характер распределения температуры стенки

3. При кипении сильно недогретого потока образующиеся на поверхности нагрева паровые пузырьки располагаются внутри части пограничного слоя, ограниченного изотермической поверхностью теплоносителя $T_f = T_s$.

4. В условиях неоднородного обогрева наиболее опасной с точки зрения возникновения кризиса теплообмена является «лобовая» точка, $\varphi = 0^\circ$.

5. С ростом плотности теплового потока q растут плотность центров парообразования n_f и максимальный диаметр парового пузыря в недогретом потоке. При некотором значении q_* начинается процесс слияния паровых пузырьков в миделевом сечении, образуются паровые скопления (бланкеты), имеющие вытянутую форму вдоль оси трубы и в поперечном сечении имеют размер нескольких предотрывных диаметров паровых пузырьков $b_{бл} \sim nD_0$. Толщина парового бланкета имеет порядок максимального диаметра $\delta_{бл} \sim D_0$.

6. Теплоноситель движется по винтовой траектории, тангенциальная составляющая скорости определяется по соотношению

$$w_t = \frac{2\pi r}{t} w_z, \quad (20)$$

где t – шаг закрутки, w_z – осевая скорость в ядре потока.

Под действием импульса жидкости в пристенном слое, направленного по нормали к радиусу, паровые конгломераты (бланкеты) смещаются из горячей зоны в более холодную. При этом происходит замещение парового бланкета жидкостью из холодной зоны, тем самым эффективно затягивается наступление кризиса.

7. Паровой бланкет со скольжением относительно жидкой фазы перемещается в тангенциальном направлении со скоростью $w_{бл,t} = kw_t$, где k – коэффициент скольжения. Кризис теплообмена наступает при условии, если за время перемещения парового бланкета по периметру трубы на ширину бланкета $b_{бл}$ в зону с более низкой температурой, стенки микрослой жидкости испарятся.

Тепловой баланс для указанных условий (рис. 11) имеет вид:

$$q_{кр} b_{бл} \tau l = r^* \rho_f \delta_{мс,0} b_{бл} l, \quad (21)$$

здесь $\tau = b_{бл} / w_{бл,t}$ – время смещения бланкета в холодную зону.

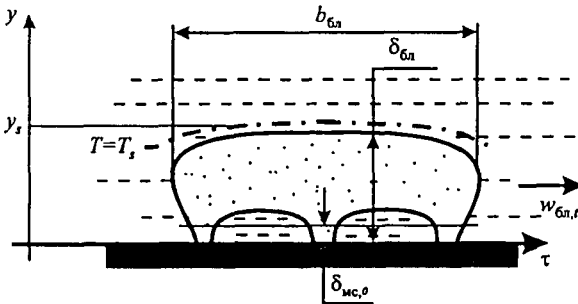


Рис. 11. Схема рассматриваемого процесса теплообмена

Автором выполнен анализ ряда работ по определению толщины микрослоя жидкости под паровым бланкетом и предотрывного диаметра парового пузырька. С учетом аналогии Рейнольдса для неметаллических жидкостей принято, что профиль скорости в пограничном слое подчиняется закону «одной седьмой». Учитывая подобие теплового и динамического пограничных слоев, автор получил расчетное соотношение для критической тепловой нагрузки при кипении в недогретом закрученном потоке:

$$q_{кр} = 12 \left\{ r^* \rho_f \left(\frac{\nu_f \sigma T_s}{\Delta T_{кр}} \right)^{1/2} \left[\left(0.93 + 0.065 \left(\frac{r_i \rho_f w_0 c_p \Delta T_n}{\lambda_f \Delta T_{кр}} \right)^{1/4} \right) (x/x_0)^{1/2} \right]^4 \times \right. \\ \left. \times \left[1 + 6 \left(\frac{(\rho_f w)_0}{\rho_f w} \right)^{\left(1 + \frac{p}{4p_0} \right)} \right] \frac{w_{бл,t}}{r_i} \right\}^{2/3}, \quad (22)$$

в котором r^* – теплота парообразования; ρ_f , λ_f , ν_f , c_p – плотность, теплопроводность, кинематическая вязкость и теплоемкость жидкости соответственно; T_s – температура насыщения при актуальном давлении; w_0 , T_0 – скорость и температура жидкости в ядре соответственно; $\Delta T_n = (T_0 - T_s)$, x – недогрев жидкости; r_i – внутренний радиус канала; $w_{бл,t}$ – скорость парового бланкета в тангенциальном (поперечном) направлении; x_0 – недогрев жидкости при $T_f = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 1.0$ МПа, $(\rho_f w)_0 = 6750$ кг/(м²·с).

В этом соотношении скорость бланкета определяется в соответствии с трехслойной моделью пограничного слоя в зависимости от координаты изотермы насыщения y_s с учетом скольжения фаз.

В соотношение (22) входит $\Delta T_{кр}$ – критический перегрев стенки, значение которого определяется по следующему выражению:

$$\Delta T_{кр} = (T_{нп} - T_s) \left[2.3 |x|^{0.04} \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{\rho w}{\rho w_0} \right)^{0.03} - 1 \right],$$

где $T_{нп}$ – температура предельного перегрева жидкости, $\rho w_0 = 10000$ кг/(м²·с), $p_0 = 0.5$ МПа.

Соотношение для критического перегрева стенки найдено из анализа собственных экспериментальных данных, было использовано при обработке данных других авторов, представленных на рис. 12, что вполне подтверждает ее адекватность.

На рис. 12 приведено сравнение критических тепловых нагрузок, рассчитанных по (22) с собственными экспериментальными данными и данными, полученными Гэмбиллом и в «Евроатоме».

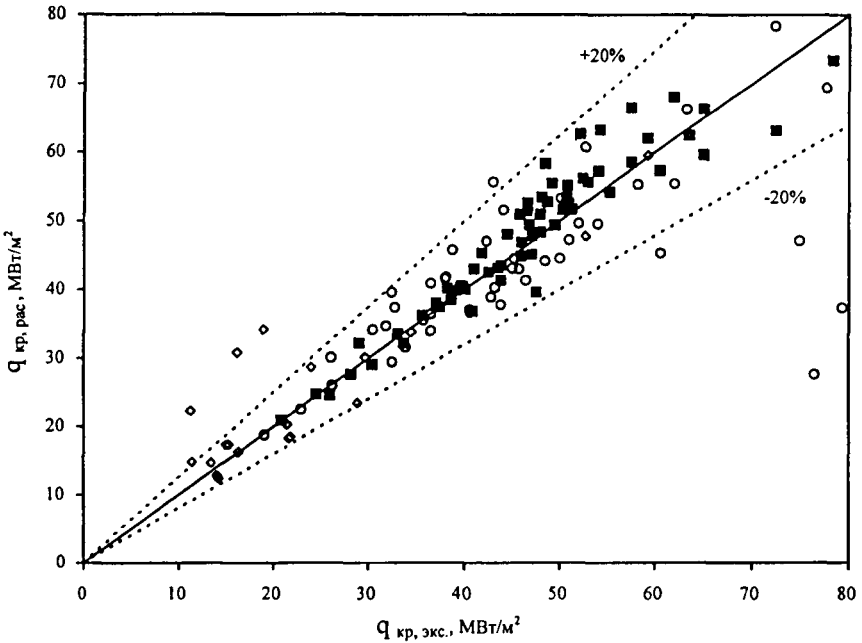


Рис.12. Критические тепловые нагрузки при кипении воды в недогретом закрученном потоке

- – данные настоящей работы, $p \in [0.7; 1.5]$ МПа, \circ – данные «Евроатома», $p \in [0.3; 3.7]$ МПа, $\rho_{w0} \in [2760; 14200]$ кг/(м²с), $x \in [-0.06; -0.49]$, 46 экспериментальных точек;
- ◇ – данные Гэмбилла, $p \in [0.1; 3.75]$ МПа, $\rho_{w0} \in [4500; 53000]$ кг/(м²с), $x \in [-0.006; -0.40]$, 19 экспериментальных точек

Глава 7. Приближенное решение краевой задачи теплопроводности в трубе при импульсном неоднородном обогреве

Точное решение краевой задачи теплопроводности в трубе при одностороннем неравномерном обогреве и неоднородных граничных условиях возможно лишь численными методами. Однако в инженерных расчетах удобно иметь возможность использовать более простой, но приближенный метод получения результата. С этой целью автором получено приближенное аналитическое решение краевой задачи теплопроводности в цилиндрических координатах, достаточно хорошо коррелирующееся с численным решением, которое позволяет быстро проводить расчеты для случая, когда коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубы меняется в пределах одного порядка. Кроме того, с практической точки зрения оказывается полезно оценить время установления стационарного распределения температур с тем чтобы знать, какой характер имеет теплообмен в трубе при воздействии пучков с разными временными параметрами.

Постановка задачи.

К цилиндрической трубе с одной стороны подводится импульсный тепловой поток (рис. 13.).

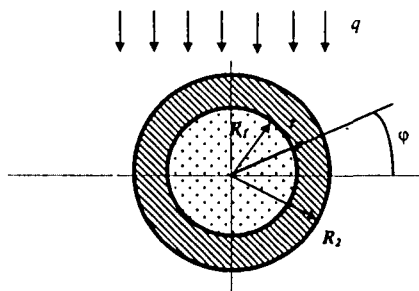


Рис.13. Схема одностороннего подвода теплового потока

«Теневая» часть трубы является адиабатической. Теплоотвод осуществляется циркуляцией теплоносителя по внутреннему каналу. Рассматривается задача для длинных трубок ($L \gg R_2$) с высокоэффективным теплоотводом. В этом случае

характерный масштаб времени диффузии тепла по сечению трубы существенно меньше времени диффузии тепла вдоль продольной оси: теплообмен в поперечном сечении преобладает по сравнению с растечками тепла в осевом направлении.

Для указанного случая описание краевой задачи теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (23)$$

начальное условие:

$$T(t=0, r, \varphi) = 0, \quad (24)$$

граничные условия:

$$r = R_1, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha T, \quad (25)$$

$$r = R_2, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -f(\varphi)\delta(t), \quad (26)$$

где

$$f(\varphi) = \begin{cases} q \sin(\varphi), & 0 \leq \varphi \leq \pi, \\ 0, & \pi \leq \varphi \leq 2\pi, \end{cases}$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \tau < t; \end{cases}$$

здесь τ — длительность импульса, $T = T_c - T_f$.

Для приближенного аналитического решения задачи будем полагать теплофизические свойства материала стенок постоянными, а в качестве коэффициента

теплоотдачи использовать значение коэффициента теплоотдачи $\langle \alpha \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \alpha d\varphi$,

полученное осреднением по периметру трубы.

Полагается, что длительность импульса τ достаточно велика для установления стационарного распределения температур в стенке трубы. Краевая задача стационарной теплопроводности решается методом разделения переменных с общим решением в виде

$$T(r, \varphi) = A + B \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[(a_n \cos(n\varphi) + b_n \sin(n\varphi)) r^n + (c_n \cos(n\varphi) + d_n \sin(n\varphi)) r^{-n} \right]. \quad (27)$$

Функция $f(\varphi)$, имеющая разрывную производную, довольно точно аппроксимируется гладкой функцией $\tilde{f}(\varphi)$, являющейся отрезком ряда Фурье:

$$f(\varphi) \cong \tilde{f}(\varphi) = q_{\text{нр}} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{\sin(\varphi)}{2} - \frac{2}{3\pi} \cos(2\varphi) \right). \quad (28)$$

С учетом граничного условия на внешней поверхности (26) общее решение (27) ограничивается двумя членами ряда с погрешностью ΔT в «лобовой» точке ($\varphi = 0^0$), не превышающей 15%, и имеет вид:

$$T \cong \tilde{T} = A + B \ln r + \left(ar + \frac{b}{r} \right) \sin(\varphi) + \left(cr^2 + \frac{d}{r^2} \right) \cos(2\varphi). \quad (29)$$

Коэффициенты разложения в (29) определяются подстановкой его в граничные условия (25), (26) с учетом (28):

$$\begin{aligned} A &= \frac{q}{\pi} \frac{R_2}{\alpha R_1} \left(1 - \frac{\alpha}{\lambda} R_1 \ln R_1 \right); & B &= \frac{q}{\pi \lambda} R_2; \\ a &= \frac{q}{2\lambda} \left[\frac{R_2^2 (\alpha R_1 + \lambda)}{R_1^2 (\alpha R_1 - \lambda) + R_2^2 (\alpha R_1 + \lambda)} \right]; \\ b &= \frac{q}{2\lambda} \left[\frac{R_1^2 R_2^2 (\lambda - \alpha R_1)}{R_1^2 (\alpha R_1 - \lambda) + R_2^2 (\alpha R_1 + \lambda)} \right]; \\ c &= \frac{q}{3\pi \lambda} \left[\frac{R_2^3 (\alpha R_1 + 2\lambda)}{R_1^4 (2\lambda - \alpha R_1) - R_2^4 (\alpha R_1 + 2\lambda)} \right]; \\ d &= \frac{q}{3\pi \lambda} \left[\frac{R_1^4 R_2^3 (2\lambda - \alpha R_1)}{R_1^4 (2\lambda - \alpha R_1) - R_2^4 (\alpha R_1 + 2\lambda)} \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Сравнение стационарного поля температур, полученное по (29), дает удовлетворительное согласие с точным численным решением.

В этой же главе получена оценка времени выхода на стационарный режим теплообмена, которое в безразмерном виде имеет вид:

$$Fo = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{2}{\delta} \right) \left(\frac{3}{8} \tilde{\delta} + \frac{1}{Bi} \right), \quad (31)$$

здесь $\tilde{\delta} = \frac{\delta}{R_1}$; $Bi = \frac{\alpha R_1}{\lambda}$ — число Био; $Fo = \frac{at_{уст}}{\delta^2}$ — число Фурье, соответст-

вующее времени установления стационарного режима теплообмена.

На рис.14. представлена зависимость числа Фурье от числа Био.

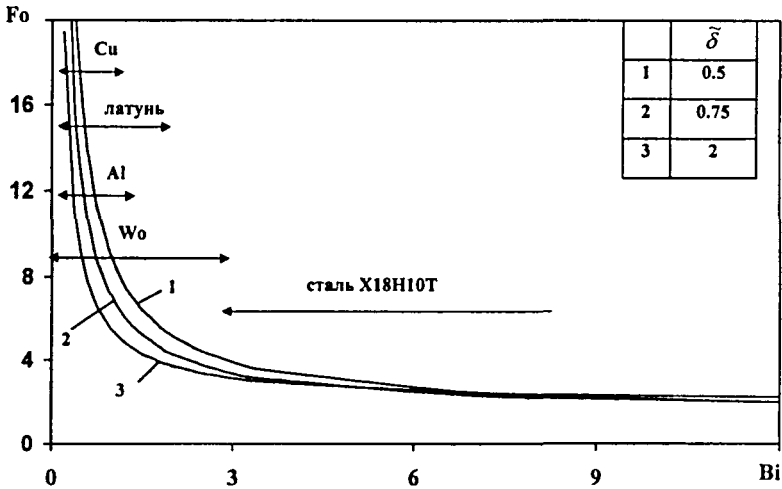


Рис.14. Зависимость числа Фурье от числа Био.

Результаты расчетов по соотношению (31) для различных материалов стенки трубы при фиксированной относительной толщине $\tilde{\delta}$, как видно из рис.14, описываются практически общей кривой. Таким образом, используя это соотношение, можно оценить время установления стационарного режима теплообмена по известным теплофизическим свойствам материала трубы в зависимости от условий теплообмена на внутренней поверхности трубы.

Глава 8. Практическое применение расчетной модели теплогидравлических процессов в приемниках пучков системы инжекции токамака Т-15 и термоядерного реактора ИТЭР

Расчетная модель приемников с замкнутым математическим описанием теплогидравлических процессов, происходящих в тепловоспринимающих элементах приемников мощных пучков для систем инжекции установок управляемого термоядерного синтеза, описанная в главе 4, реализована в эффективный вычислительный алгоритм, гибко включающий в себя экспериментальные соотношения, описывающие теплообмен, гидравлические характеристики каналов, теплофизические свойства теплоносителя и конструкционных материалов стенок. Численный алгоритм, оформленный в виде ACS-кода (метод адиабатических сечений), используется в качестве рабочего инструмента при инженерном проектировании калориметра CAL и приемника ионов RID, модулей инжекции для разрабатываемого экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Эта теплофизическая модель позволяет от расчетов теплогидравлических параметров перейти к расчету прочностных параметров.

Метод адиабатических сечений позволяет производить обоснованный выбор параметров системы охлаждения приемника и материал, из которого должны быть изготовлены теплосъемные трубки приемника.

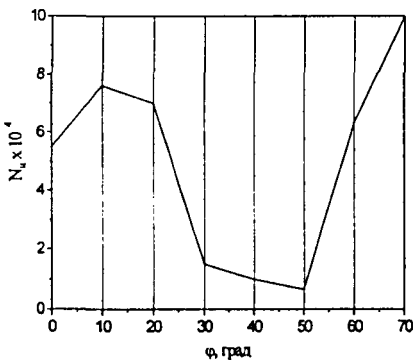


Рис.14. Допустимое число циклов термических нагружений по периметру наиболее опасного сечения трубки модуля инжекции ИТЭР

В главе дано краткое описание концепции построения численного алгоритма. На рис. 14 приведены в графической форме некоторые результаты расчетов, выполненных по ACS-код для реальных приемников пучков отклоненных ионов токамака Т-15 и калориметра ИТЭР. В некотором смысле

итогом этой части работы является число циклов термического нагружения приемников, определенное для самого опасного сечения теплосъемного элемента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе выполненных автором исследований в работе получены экспериментальные и расчетно-аналитические результаты, совокупность которых можно свалифицировать как решение важной научно-технической задачи, связанной с разработкой приемников энергии инжекторов термоядерных установок и реакторов и выполняемой в рамках международной программы ИТЭР.

1. Под личным руководством и при непосредственном участии автора диссертационной работы на кафедре общей физики и ядерного синтеза создан оригинальный экспериментальный стенд (аналогичный стенд "Евроатома" был создан позднее).

Односторонний нагрев исследуемых фрагментов приемников мощных пучков обеспечивается сканирующим электронным пучком. Стенд снабжен специально разработанным электронным блоком управления теплофизическими процессами, который позволяет фиксировать явление кризиса теплоотдачи при кипении и вырабатывает управляющий сигнал для отключения силового контура электронно-лучевого аппарата. Сбор, обработка первичных данных теплофизических и электротехнических измерений осуществляются АСНИ в стандарте КА-ЛАК и приборного интерфейса МЭК 625.1.

2. Впервые получен систематизированный массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при кипении воды в недогретом закрученном потоке и одностороннем обогреве пучками заряженных частиц в области ежимных параметров теплоносителя, актуальной для приемников мощных пучков: давление $p \in [0,5; 2,0]$ МПа, массовая скорость $w \in [4000, 10000]$ кг/(м²·с), относительная энтальпия потока (недогрев) $x < -0,1$, при которых обеспечивается теплосъем с плотностью тепловых потоков, превышающей 30 МВт/м². Ранее при этих параметрах были получены единичные экспериментальные данные (прежде

всего, данные «Евроатома»), вполне согласующиеся с данными настоящей диссертации.

Установлено влияние неоднородности обогрева на значения $q_{кр}$ в исследованных режимах. Критические тепловые нагрузки при кипении в закрученном потоке недогретой воды при одностороннем обогреве, полученные в данной работе, заметно выше соответствующих значений в прямых потоках. Так, при давлении $p = 0,7$ МПа, массовой скорости $\rho w = 8750$ кг/(м²·с), недогреве $x < -0,267$ $q_{кр}$ в закрученном потоке приблизительно в пять раз выше, чем в прямом потоке (по данным скелетных таблиц).

В исследованных режимах критические тепловые нагрузки при кипении в недогретом закрученном потоке с ростом давления падают. По данным же скелетных таблиц в прямом потоке такая тенденция отмечается лишь при $x = -(0,4 \div 0,5)$. Все исследования в целях обеспечения возможности сравнительного анализа проводились при одних и тех же параметрах: давление $p = 0,7; 1,0; 1,3; 1,5$ МПа; температура воды на входе $T_{f,вх} = 20,40,60^\circ$ С; массовая скорость $\rho w = 540 \div 8800$ кг/(м²·с). Отмечается вполне удовлетворительная воспроизводимость результатов. Экспериментально достигнутый максимальный уровень критических тепловых нагрузок равен $78,3$ МВт/м² при $p = 0,7$ МПа, $\rho w = 8800$ кг/(м²·с), $x = -0,279$.

Полученные экспериментальные данные о критических тепловых нагрузках при $p \in [0,7; 1,5]$ МПа в совокупности с данными «Евроатома» при $p \in [3,2; 3,5]$ МПа, $x \in [-0,060; -0,490]$, $\rho w \in [2770; 14200]$ кг/(м²·с), $q_{кр, \max} = 77,7$ МВт/м², и Оводкова при $p \in [0,1; 0,8]$ МПа, $x \in [-0,030; -0,165]$, $\rho w \in [100; 3000]$ кг/(м²·с), $q_{кр, \max} = 14,2$ МВт/м², создают необходимый массив данных в области параметров, имеющей практический интерес для разработчиков приемников мощных пучков в термоядерных реакторах.

3. Экспериментально установлено, что при неоднородном обогреве кризис теплообмена при кипении в недогретом закрученном потоке проходит более мягко без резких скачков температуры стенки, присущих кипению при однородном обогреве. В условиях неоднородного обогрева появление локальной паровой пленки при кипении в недогретом закрученном потоке не приводит к быстрому

росту температуры с последующим пережогом стенки. Обнаружены режимы кипения с сильным недогревом и $\rho w > 6000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, при которых по внутреннему диаметру канала одновременно существуют три режима теплообмена: конвективный, пузырьковое и пленочное кипение. Установлено, что после достижения критической тепловой нагрузки возможен квазистационарный режим теплообмена. Однако по истечении некоторого времени ($10^1 + 10^2 \text{ с}$) начинается медленный рост температуры стенки с одновременным ростом амплитуды ее колебаний.

4. Впервые получено семейство кривых кипения воды в недогретом закрученном потоке в вышеуказанном диапазоне режимных параметров. Всего в обработку вошло 1259 экспериментальных точек. Выполнен анализ влияния скорости, закрутки, недогрева на интенсивность теплоотдачи. При этом установлено следующее:

в докритических режимах кипения теплоотдача увеличивается с ростом массовой скорости при ее значениях, превышающих $4000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В области $\rho w < 2500 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ влияние массовой скорости на теплоотдачу не наблюдается;

влияние закрутки потока на интенсивность теплоотдачи при кипении весьма заметно в режиме индивидуальных пузырей. С ростом плотности тепловых потоков наблюдается тенденция к снижению эффекта закрутки, в околоскритической области кривые кипения в трубе со скрученной лентой и без нее практически совпадают;

зависимость плотности тепловых потоков от температурного напора на стенке при кипении в недогретом потоке заметно более слабая, чем при кипении

недогретом потоке заметно более слабая, чем при кипении насыщенной жидкости: $q \sim \Delta T_c^{1,8}$;

получены эмпирические аппроксимационные соотношения в размерном и безразмерном виде для коэффициента теплоотдачи в докритической области кипения в недогретом потоке воды как функции теплофизических параметров и давления теплоносителя.

Впервые получены экспериментальные данные по пленочному кипению недогретом закрученном потоке воды. Установлена весьма высокая эффективность теплоотдачи при пленочном кипении. Получено эмпирическое

5. Впервые получены экспериментальные данные по пленочному кипению в недогретом закрученном потоке воды. Установлена весьма высокая эффективность теплоотдачи при пленочном кипении. Получено эмпирическое расчетное соотношение для коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении воды в сильно недогретом закрученном потоке.

6. Анализ опытных данных и имеющихся расчетных соотношений показал отсутствие надежных методов расчета $q_{кр}$ в закрученных потоках недогретой жидкости в широких диапазонах режимных параметров. Автором получены эмпирические расчетные соотношения для $q_{кр}$ при кипении недогретого закрученного потока, согласующиеся с известными экспериментальными данными для прямого и закрученного потоков в области параметров:

1) недогрев $x < -0,1$, массовая скорость $\rho w > 2500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

2) недогрев $x > -0,1$, массовая скорость $\rho w < 2500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

7. Разработана физическая модель кризиса теплообмена при кипении в закрученном недогретом потоке, основанная на модели высыхания микрослоя жидкости, располагающегося между паровым образованием (бланкетом) и стенкой. Кризис теплообмена при кипении наступает, если за время смещения парового бланкета в холодную зону периметра трубы микрослой жидкости испаряется. Отмечается вполне удовлетворительное согласие результатов расчета по полученному соотношению с экспериментальными данными в области параметров: $\rho w > 2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $x < -0,1$; $y < 5$.

8. Разработана расчетная модель приемников мощных пучков с замкнутым математическим описанием теплогидравлических процессов, происходящих в приемниках, основанная на разработанном в работе методе адиабатических сечений. Численная реализация расчетной модели в компактной компьютерной программе ASC-код обеспечивает возможность выполнять расчеты реальных приемников мощных пучков. Метод расчета принят Рабочей группой Российской Федерации по проектированию системы инъекции ИТЭР в качестве основного при расчетах параметров приемников мощных пучков.

9. На основе разработанной расчетной модели определены теплогидравлические параметры приемников отклоненных ионов токамака Т-15 и калориметра модуля инъекции ИТЭР. Расчет калориметра модуля инъекции принят Рабочей группой в качестве основного документа. Решение теплогидравлической задачи является исходной базой для термочувствительного анализа теплосъемных трубок приемников мощных пучков, результатом которого является выполненный расчет допустимого числа циклов теплонагрузений приемника с сохранением им механической прочности.

10. Получено приближенное решение краевой задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями при неоднородном обогреве, позволяющее выполнять оценочные расчеты параметров теплообмена в трубе, оценку времени выхода теплообмена на стационарный режим в зависимости от конструктивных особенностей теплосъемных элементов, режимных параметров теплоносителя, параметров воздействующего на приемник пучка заряженных и нейтральных частиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Описание экспериментальной установки по измерению температурных полей, возникающих в образцах при воздействии электронных пучков. /А.П. Касаткин, А.Т. Комов, С.В. Скородумов, Ю.И. Селин, Ю.И. Павлов // Тр. Моск.энерг.ин-та. Инженерные и физические проблемы термоядерной энергетики. 1992. Вып. 657. С. 45–48.
2. Автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных на теплофизическом стенде по определению критических тепловых нагрузок на фрагменте приемников пучков токамака Т-15. /А.П. Касаткин, А.Т. Комов, С.В. Скородумов, Ю.И. Селин //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1993. Вып. 1–2. С. 60–65.
3. Экспериментальный стенд для исследования кризиса теплообмена на фрагменте приемника энергии инжектора Т-15. / А.В. Гусаров, А.П. Касаткин, А.Т. Комов, С.В. Скородумов и др. // Тр. Моск. энерг. ин-та. Инженерные и физические проблемы термоядерной энергетики. 1993. Вып. 659. С. 5–10.

4. Экспериментальная установка для измерения температурных полей, появляющихся в образцах при воздействии электронных пучков. /А.П. Касаткин, А. Комов, С.В. Скородумов, Ю.И. Селин // Тр. Моск. энерг. ин-та. Инженерные физические проблемы термоядерной энергетики. 1993. Вып. 659. С. 24–28.
5. В.К. Наумов, А.Т. Комов, Н.Н. Семашко. Модельный нагрев сканирующей электронным лучом фрагментов приемников пучков инжекционных систем термоядерных установок при исследовании критических тепловых режимов //Plasma Devices and Operations. 1995. Vol. 4. P. 91–100. (на англ.яз.).
6. В.К. Наумов, А.Т. Комов, Н.Н. Семашко. Конечно-разностная аппроксимация метода адиабатических сечений при численном анализе процесса одностороннего нагрева охлаждаемой трубки со скрученной лентой импульсом внешнего теплового потока. //Plasma Devices and Operations. 1995. Vol. 4. P. 141–161. (на англ.яз.).
7. А.С. Барашков, А.Т. Комов. Анализ условий теплосъема в приемнике сильного точного пучка при импульсном одностороннем обогреве. //Вестник МЭИ. № 1. 1996. С. 53–55.
8. В.К. Наумов, Н.Н. Семашко, А.Т. Комов. Модификация метода адиабатических сечений для расчета охлаждения трубок, содержащих скрученные ленты, при асимметричном нагреве внешним стационарным тепловым потоком с большой плотностью мощности. //Plasma Devices and Operation. 1996. Vol. 5. P.43–58. (на англ.яз.).
9. Параметры теплосъема в приемниках пучков системы инжекции ИТЭР. / В.К. Наумов, А.Т. Комов, А.А. Панасенков, Н.Н. Семашко, А.С. Барашков. // Инженерные проблемы термоядерных реакторов: Тез. докл. Шестой Всероссийской Конф. 27–29 мая 1997. С.-П. 1997. С. 78.
10. В.К. Наумов, Н.Н. Семашко, А.С. Барашков, А.Т. Комов. Нестационарные термоупругие напряжения в теплосъемных элементах приемников пучков систем инжекции токамака Т-15. //Plasma Devices and Operations. 1997. Vol. 5. P. 1-11 (на англ.яз.).

1. Параметры теплосъема в приемниках пучков системы инъекции ИТЭР. / В.К. Наумов, А.А. Панасенков, Н.Н. Семашко, А.С. Барашков, А.Т. Комов // *Plasma Devices and Operations*. 1998. Vol. 6. P. 129–135.
2. АСНИ на экспериментальном стенде по исследованию критического теплообмена. / К.В. Аверьянов, А.Н. Варавя, А.В. Дедов, А.Т. Комов, С.А. Щеглов // Информационные средства и технологии: Тез. докл. Междун. конф. 20–22 октября 1998. М. 1998. Т. 2. С.39–44.
3. Экспериментальное исследование теплообмена в цилиндрической трубе при одностороннем обогреве пучками с высокой плотностью энергии. / А.Н. Варавя, А.В. Дедов, А.Т. Комов, В.К. Наумов, С.А. Щеглов // Вторая Российская конф. по теплообмену. 26–30 октября 1998. М. 1998. Т. 4. С.88-90.
4. А.С. Барашков, А.В. Дедов, А.Т. Комов. Приближенное решение краевой задачи теплопроводности при неоднородном обогреве. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 1998. Вып. 2. С. 53–56.
5. Автоматизированная система научных исследований критического теплообмена. / А.Н. Варавя, А.В. Дедов, А.Т. Комов и др. // Вестник МЭИ. № 5. 1998. С. 22–25.
6. А.В. Дедов, А.Т. Комов. Измерительный комплекс экспериментальной установки по исследованию процессов теплообмена и критических тепловых нагрузок. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. // Труды XII Школы-семинара молодых ученых и специалистов. 25-28 мая 1999. М. 1999. С. 3.
7. Экспериментальное исследование процессов теплосъема во фрагменте тепло-воспринимающего элемента приемника пучков системы инъекции Т-15. / А.Н. Варавя, А.В. Дедов, А.Т. Комов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. Вып.1-2. 1998. С. 70–73.
8. А.Т. Комов. Критические тепловые нагрузки в теплонапряженных элементах энергетических установок. // Моделирование технологических процессов в энергетике: Тез. докл. Первой научно-технической конф. г. Волжский. 1999. С. 26–29.

19. А.Т. Комов. Разработка приемников пучков в системах инжекционного нагрева плазмы термоядерных установок. //Вестник МЭИ. 1999. № 4. С. 82–85.
20. А.Т. Комов, Д.Н. Исполатов. Критические тепловые нагрузки в теплонапряженных элементах термоядерных реакторов. //Сб. науч. тр. Научные исследования области ядерной энергетики в технических ВУЗах России. М.: Изд-во МЭИ 1999. С. 114-117.
21. А.В. Дедов, А.С. Барашков, А.Т. Комов. Оценка времени установления стационарного распределения температур в трубе при импульсном одностороннем обогреве. //Теплоэнергетика. 2000. № 1. С. 75–78.
22. Метод адиабатических сечений и его использование для оценки теплофизических и термоупругих параметров приемников системы инжекции ИТЭР. /А.А. Панасенков, В.К. Наумов, Н.Н. Семашко, А.Т. Комов и др //Plasma Devices and Operations. 1999. Vol. 8. P. 39-65. (на англ.яз.).
23. Экспериментальное исследование теплообмена в приемниках термоядерных установок. / В.К. Наумов, Н.Н. Семашко, А.Т. Комов, А.В. Дедов, А.Н. Варавва //Plasma Devices and Operations. 1999. Vol. 8. P. 67-77. (на англ.яз.).
24. Теплообмен в трубе при несимметричном обогреве в условиях вынужденного движения недогретой жидкости. /А.Н. Варавва, А.В. Дедов, А.Т. Комов, С.А. Щеглов //Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. № 1. С. 61-65.
25. Экспериментальные исследования теплообмена при кипении в недогретом закрученном потоке теплоносителя. /А.Н. Варавва, А.В. Дедов, А.Т. Комов, С.В. Скородумов //Вестник МЭИ. 2000. № 1. С. 85-89.
26. Экспериментальное исследование критических тепловых нагрузок при кипении в недогретом закрученном потоке при неоднородном обогреве. /А.Н. Варавва, А.В. Дедов, А.Т. Комов, С.В. Скородумов // Проблемы энергетики. Известия ВУЗов. 2000. №1-2. С. 3-11.

Печ. л. 2,5

Тираж 100

Заказ 135

Типография МЭИ, Краснокараменная, 13.