

*На правах рукописи*



Парамонова Ирина Львовна

**Совершенствование модели расчета закризисного теплообмена  
для компьютерных программ по расчету теплогидродинамики в ВВЭР**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена на кафедре "Реакторные и котельные установки" в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ").

Научный руководитель

– *Агафонова Наталия Дмитриевна* – кандидат техн. наук, доцент.

Официальные оппоненты:

– *Гусев Леонид Борисович* – доктор техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова" (Санкт-Петербург), заведующий кафедрой;

– *Солодовников Александр Сергеевич* – кандидат техн. наук, ОАО "Головной институт "ВНИПИЭТ" (Санкт-Петербург), начальник бюро.

Ведущая организация – *ФГУП "Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова" (г. Сосновый Бор).*

Защита диссертации состоится 24 декабря 2013 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,  
в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "22" ноября 2013 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*К.А. Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Обеспечение безопасности проектируемых и находящихся в эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) является одним из необходимых условий развития современной ядерной энергетики России. Как на стадии проектирования, так и при эксплуатации реакторных установок (РУ) необходимо иметь расчетный инструмент, позволяющий достоверно определять температурные условия оболочек твэлов, являющихся вторым барьером безопасности. Это важно и для анализа аварийной ситуации, если она имела место и вышла за рамки, предусмотренные на стадии проектирования.

Особенностью ВВЭР является высоконапряженная активная зона, поэтому отвод тепла от твэлов может происходить при различных режимах течения теплоносителя – от поверхностного кипения в номинальных режимах работы и до однофазного охлаждения активной зоны перегретым паром при авариях. Смена режима течения теплоносителя приводит к изменению условий теплоотдачи и, следовательно, температуры оболочек твэлов.

С целью моделирования нестационарных теплогидродинамических процессов в циркуляционном контуре реактора при возможных проектных, запроектных и тяжелых авариях используются компьютерные программы. Как правило, они строятся на базе двухжидкостной негомогенной неравновесной модели двухфазного потока равных давлений фаз. Отличительными особенностями таких программ являются использованные методы численного интегрирования системы дифференциальных уравнений и, что особенно важно, набор замыкающих соотношений (эмпирических формул) для расчета силового и теплового взаимодействия фаз со стенкой и на поверхности раздела фаз, без которых решение системы уравнений невозможно.

Модель для расчета закризисного теплообмена является основной

компонентой, входящей в систему замыкающих соотношений математических моделей программ и предназначена, в том числе, для достоверного прогнозирования температуры поверхности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ). В условиях закризисного теплообмена, из-за недостаточного охлаждения поверхности ТВЭЛОВ, возможен рост температуры оболочек вплоть до предельно допустимых значений и, как следствие, их последующее разрушение и выход радиоактивности за пределы активной зоны реактора, что является недопустимым.

Ужесточение требований к безопасности проектируемых реакторов, усложнение их конструкции и повышение энергонапряженности, а также непрерывно пополняемые опытные данные, требуют постоянного совершенствования программных средств, используемых для моделирования нестационарных теплогидродинамических процессов в активной зоне ВВЭР.

В настоящее время накоплен большой опыт численных расчетов с помощью расчетных кодов (РК), проводятся работы по их верификации (локальная, интегральная и на основе натуральных испытаний), в результате которых определен круг научных задач, которые нужно решить для того, чтобы РК адекватно моделировали процессы, наиболее важные с точки зрения безопасности АЭС. Тема настоящей диссертационной работы направлена на совершенствование модели расчета закризисного теплообмена, а ее результаты являются частью масштабных работ по верификации расчетного кода улучшенной оценки **КО**мплексный **Ра**Счет **А**томных **Р**еакторов (КОРСАР).

Теплогидравлический расчетный код улучшенной оценки КОРСАР, принят в 1999 г., на основании выигранного тендера, в качестве отраслевого кода Минатома России и зарегистрирован в Российском агентстве по патентам и товарным знакам, аттестован в надзорных органах применительно к АЭС с ВВЭР.

**Цель работы** заключается в совершенствовании модели закризисного теплообмена в обращенном кольцевом режиме течения и разработке

методики расчета теплообмена в дисперсном потоке в рамках неравновесной двухжидкостной одномерной модели двухфазного потока; а также их обосновании для использования в компьютерных программах.

**Основные результаты и их научная новизна:**

предложена модель для теплоотдачи в области обращенного кольцевого режима течения, усовершенствованная за счет: а) получения новой формулы для числа Нуссельта при турбулентном течении пара в пристенном слое; б) введения температурного фактора для учета переменности физических свойств пара; в) использования новой аппроксимации для коэффициента влияния  $\theta_o^*$  в расширенном диапазоне чисел Рейнольдса;

разработана методика расчета теплоотдачи в области дисперсного режима течения с использованием модифицированной автором интегральной модели Хейна-Кёле;

получены расчетные рекомендации по расчету среднего размера капель в закризисной области;

сформулированы рекомендации для выбора шага интегрирования по длине в компьютерных программах в закризисной зоне канала.

**Практическая ценность работы.** Полученные результаты предназначены для использования в системе замыкающих соотношений новой версии расчетного кода КОРСАР с последующей ее верификацией.

Кроме того, усовершенствованная модель и методика могут быть использованы вне расчетных кодов в инженерной практике, обеспечивая достаточную точность результатов.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением проведенных расчетов с экспериментальными данными других исследователей, проведенным статистическим анализом результатов расчета, а также непротиворечивостью полученных в данной работе выводов результатам верификации РК КОРСАР другими авторами.

**Автор защищает:** усовершенствованную модель закризисного

теплообмена в области обращенного кольцевого режима течения; методику расчета закризисного теплообмена в области дисперсного потока в рамках неравновесной двухжидкостной одномерной модели двухфазного потока.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, их планировании и организации, обобщении экспериментальных данных и разработке математических моделей, проведении расчетов.

**Методический подход.** Разработанные модели основаны на современных представлениях о механизме передачи тепла в закризисной области. Достоверность прогнозирования температуры оболочек твэлов с использованием разработанных моделей проверена на базе экспериментальных данных других авторов.

**Апробация материалов диссертации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практической конференции «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий» в СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2003); отраслевом научно-техническом семинаре «Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов» (г. Сосновый Бор, 2004); на третьем Международном симпозиуме «Проведение экспериментов и моделирование двухфазных потоков» (Италия, г. Пиза, 2004); на семинарах XXXVIII–XXXIX зимних школ «Физика и техника реакторов» (Санкт-Петербург, 2006), на научно-технических семинарах в ОАО «СПБАЭП» (2011), в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» (2012, 2013), на ежегодных Неделях науки СПбГПУ (1999, 2005, 2010, 2012) и на научных семинарах кафедры РКУ СПбГПУ в 1998–2013 гг.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 10 работ, в т. ч. 2 – в изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 77 источников, и двух приложений. Она содержит 66 рисунков и 20 таблиц. Общий объем диссертации – 129 с.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана краткая характеристика проблемы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены причины возникновения кризисов теплообмена в аварийных режимах охлаждения активной зоны ВВЭР и дана классификация кризисных явлений (переход пузырькового кипения в пленочное – кризис первого рода и переход дисперсно-кольцевой структуры потока в чисто дисперсную - кризис второго рода).

В закризисной области эффективность теплоотдачи, а, следовательно, температура оболочек твэлов зависит в первую очередь от режима течения двухфазного теплоносителя. Рассмотрены особенности обращенного кольцевого и дисперсного режимов течения, возникающих при аварийных режимах в активной зоне реактора.

Для надежного прогнозирования температуры оболочек твэлов в закризисной области используются компьютерные программы улучшенной оценки теплогидродинамики. В них реализованы неомогенные неравновесные модели двухфазного потока в одномерной постановке. Основанные на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы, модели включают в себя систему замыкающих соотношений (эмпирических формул) для определения членов уравнений, связанных с силовым и тепловым взаимодействием фаз со стенкой и между собой. Приведены требования к системе замыкающих соотношений.

Рассмотрены модели и корреляции для расчета теплообмена при обращенном кольцевом и дисперсном режимах течения двухфазного потока, так как именно в этих случаях возможно опасное повышение температуры оболочек твэлов.

На основе анализа имеющихся литературных данных сделан вывод, что наиболее адекватной, позволяющей физически обоснованно описать теплообмен при кипении в обращенном кольцевом режиме, является модель Хаммоуды. Эта модель используется в последних модификациях современных компьютерных программ для улучшенной оценки теплогидродинамики в контурах ядерных энергетических установок (ЯЭУ), таких как КОРСАР. Однако она не дает требуемой точности при определении температуры оболочек твэлов, имеет ограниченный диапазон применимости и не учитывает изменение физических свойств пара по толщине слоя.

Обосновывается, что для дисперсного потока расчет по моделям, требующим знания таких величин, как средний диаметр капель, скорость и коэффициент выпадения капель, площадь контакта капель со стенкой и др., не является надежным, так как указанные величины не могут быть непосредственно определены из экспериментов. Наиболее точной, прошедшей широкую экспериментальную апробацию (более 16000 опытных точек только для воды), является модель Хейна – Кёле. Однако отсутствие учета испарения капель жидкости по длине канала и связанного с ним уменьшения площади их поверхности, приводит к искажению хода кривой изменения температуры стенки  $T_w$  в закризисной области (расчетные значения  $T_w$  снижаются быстрее, чем экспериментальные), что особенно заметно при низких давлениях и массовых скоростях.

Поэтому указанные модели нуждаются в усовершенствовании.

**Во второй главе** излагаются предложения по совершенствованию модели Хаммоуды для расчета теплообмена при обращенном кольцевом режиме течения пароводяного потока. Так же, как в оригинальной методике, при моделировании обращенного кольцевого потока в трубе, течение пара в пристенном паровом слое представлено как течение в кольцевом канале, образованном обогреваемой стенкой трубы и межфазной поверхностью, разделяющей пар и жидкое ядро. Затем методом суперпозиции известных фундаментальных решений уравнения энергии найдено аналитическое



решение задачи для случая несимметричного обогрева стенок кольцевого канала при рассматриваемых условиях. Выполнены аппроксимации для числа Нуссельта и коэффициента влияния для случая турбулентного движения пара.

Показано, что для условий обращенного кольцевого режима течения в ВВЭР, для которых характерны большие перепады температуры по толщине пристенного слоя пара, необходим учет изменения физических свойств пара. Это связано с тем, что изменение свойств пара оказывает существенное влияние на профили скорости и температуры а, следовательно, на теплоотдачу. В соответствии с этим введен температурный фактор  $\gamma = T_w / T_s$  ( $T_w$ ,  $T_s$  – температура стенки температура насыщения) при расчете числа Нуссельта. В таблице 1 приведена сводка расчетных формул для сравнения оригинальной и усовершенствованной модели (в таблице 1 обозначены  $q_{wg}$ ,  $q_{is}$  – тепловой поток от стенки к пару и от межфазной поверхности к жидкому ядру, соответственно; индекс  $g$  относится к пару).

**В третьей главе** представлена методика расчета теплообмена при дисперсном режиме течения пароводяного потока. Учитывая, что в настоящее время накоплен значительный опыт экспериментальных измерений *суммарного* коэффициента теплоотдачи в дисперсном потоке, предлагается использовать апробированный (по аналогии с определением трения в двухфазном потоке) подход – нахождение неизвестной капельной составляющей теплового потока  $Q_d$  (индекс  $d$  относится к каплям) по разности общего теплового потока  $Q_w$  и надежно определяемого теплового потока к перегретому пару  $Q_{wg}$ :  $Q_d = Q_w - Q_{wg}$ . Для определения общего теплового потока  $Q_w$  предложено использовать полуэмпирическую неравновесную интегральную методику Хейна – Кёле. Она позволяет для каждой комбинации режимных параметров дисперсного потока (давления  $P$ , теплового потока, подведенного через стенку  $q_w$ , массовой скорости  $\rho W$ ) по предложенной формуле вычислить среднюю, постоянную по длине канала, степень неравновесности  $\omega$ , которая определяет максимально возможную

температуру оболочки твэла в закризисной области.

Таблица 1

Название модели	Расчетные формулы для теплового потока, числа Нуссельта и коэффициента влияния $\theta_o^*$
Оригинальная модель Хаммоуды	$q_{wg} = \frac{Nu_g}{1 - \frac{T_g - T_s}{T_w - T_g} \cdot \theta_o^*} \cdot \frac{\lambda_g}{2\delta} \cdot (T_w - T_g)$ $Nu_g = \frac{5,071}{Pr_g^{0,0439}} + 0,0028 \cdot Re_g \cdot Pr_g^{0,645}$ $\theta_o^* = 0,347 \cdot Pr_g^{0,0026} - \frac{0,146 \cdot Re_g \cdot Pr_g^{0,5418}}{9900}$
Усовершенствованная модель Хаммоуды (настоящая работа)	$q_{wg} = \frac{Nu_g}{1 + \theta_o^* \cdot \frac{q_{is}}{q_{wg}}} \cdot \frac{\lambda_g}{2\delta} \cdot \gamma \cdot (T_w - T_g)$ $Nu_g = 5,385 + 0,021 \cdot Re_g^{0,8} \cdot Pr_g^{0,4}$ $\theta_o^* = 0,346 - 0,0163 \cdot \ln Re_g \cdot Pr_g$ $\gamma = \left( \frac{T_w}{T_s} \right)^m$
Вспомогательные величины	$Re_g = \frac{W_g \cdot 2\delta}{\nu_g}, Pr_g = \frac{\nu_g}{a_g},$ <p>где <math>W_g</math> – скорость пара; <math>\nu_g</math> – кинематическая вязкость пара; <math>a_g</math> – коэффициент температуропроводности пара; <math>\delta</math> – толщина парового слоя; <math>\lambda_g</math> - теплопроводность пара</p>

В силу принятых допущений, модель Хейна – Кёле всегда дает убывающие температурные зависимости по длине канала, в то время как в

дисперсном потоке при низких значениях давления и массовой скорости температура стенки вслед за кризисом может увеличиваться.

Корректировка модели Хейна – Кёле заключается во включении в формулу для  $\omega$  поправки на испарение капель:

$$B = 2 \cdot \left( \frac{1-x}{1-x_{кр}} \right)^{2/3},$$

что обеспечивает учет изменения степени неравновесности дисперсного потока по длине канала за счет уменьшения площади поверхности капель:

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{C_{pg}}{r} \cdot \frac{q_w}{(\alpha_{gd} A_d / A_{обогр} \cdot B)}}}$$

Здесь  $C_{pg}$  и  $r$  – теплоемкость пара и удельная теплота парообразования, соответственно; произведение неизвестных величин  $\alpha_{gd}$  (коэффициент теплообмена между каплями воды и паром) и  $A_d$  (полная поверхность капель) рассчитывается по эмпирической формуле,  $A_{heat}$  – площадь обогреваемой поверхности канала;  $x$ ,  $x_{кр}$  – массовое расходное паросодержание потока по длине канала и в сечении кризиса.

В результате получают более реалистичные кривые для температуры стенки (см. рисунок 1).

Определяя капельную составляющую теплового потока  $Q_d$  как разность общего потока  $Q_w$ , вычисленного по скорректированной модели Хейна – Кёле, и потока тепла к перегретому пару  $Q_{wg}$ , можно получить характеристики капель: например, средний диаметр капель, а также тепловой поток, переданный каплям на стенке при прямом контакте или при испарении в пограничном слое, необходимый для замыкания двухжидкостных моделей двухфазного потока.

**В четвертой главе** приведены описания, диапазон параметров и результаты экспериментов по изучению обращенного кольцевого и дисперсного режимов течения пароводяных потоков. Результаты этих

экспериментов использованы для обоснования полученных в данной работе корреляций по расчету теплообмена в закризисной области. Особое внимание уделено методам измерения параметров и погрешности определения температуры стенки в опытах.

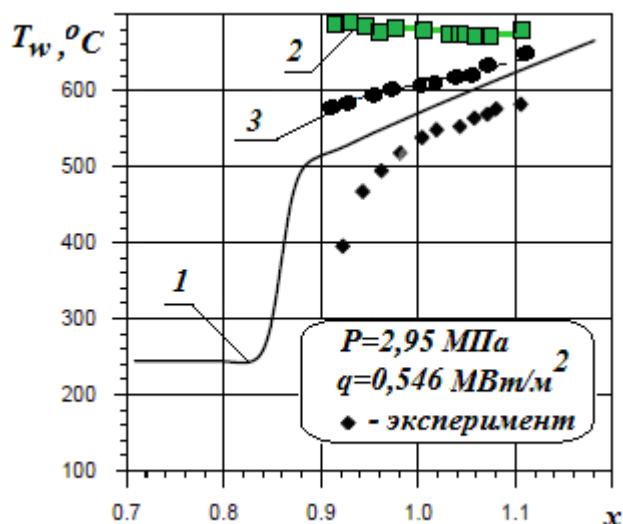


Рисунок 1 – Зависимость температуры стенки  $T_w$  от массового паросодержания  $x$  дисперсного потока (эксперимент Маринова, Кабанова):

- 1 – расчет по КОРСАРу, 2 – расчет по методике Хейна – Кёле,  
3 – расчет по методике Хейна – Кёле с поправкой

В пятой главе приведены результаты расчетов температуры стенки с использованием усовершенствованной методики Хаммоуды (настоящая работа) для *обращенного кольцевого* режима течения (см. рисунки 2 и 3).

В расчетах, выполняемых в одномерных теплогидравлических кодах, при выборе длины расчетной ячейки необходимо учитывать протяженность существования жидкого ядра в *обращенном кольцевом* режиме течения.

Сравнение экспериментальных значений температуры стенки с расчетными, полученными в настоящей работе по методике для *дисперсного* потока, показаны на рисунке 4.

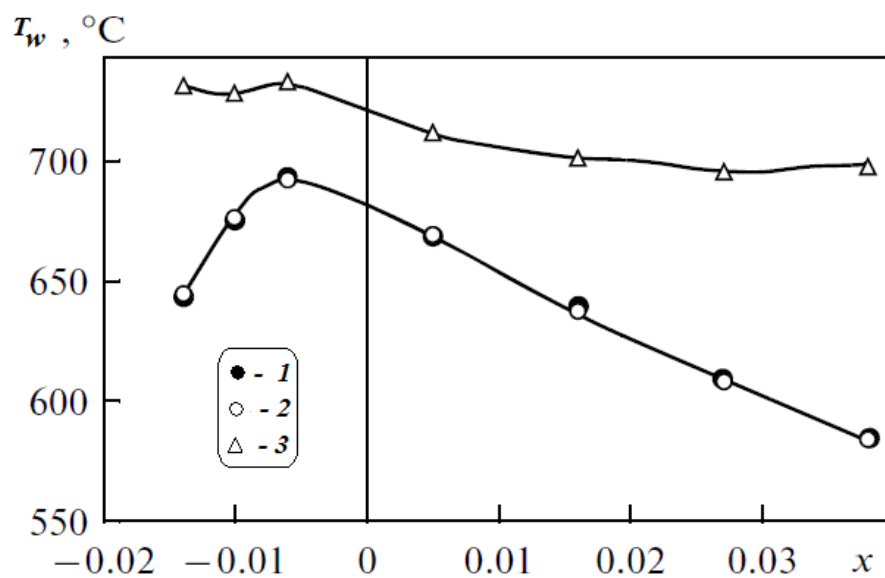


Рисунок 2 – Зависимость температуры стенки от относительной энтальпии  $x$ :

1 – экспериментальные данные Чена; 2 – расчеты автора;

3 – расчеты по модели Хаммоуды

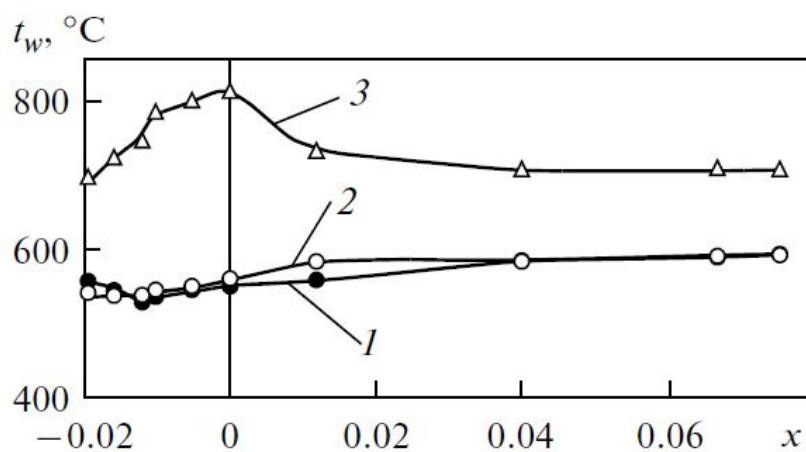


Рисунок 3 – Зависимость экспериментальной и расчетной температуры стенки от относительной энтальпии  $x$ :

1 – экспериментальные данные Лапперье; 2 – расчеты автора;

3 – расчеты по модели Хаммоуды

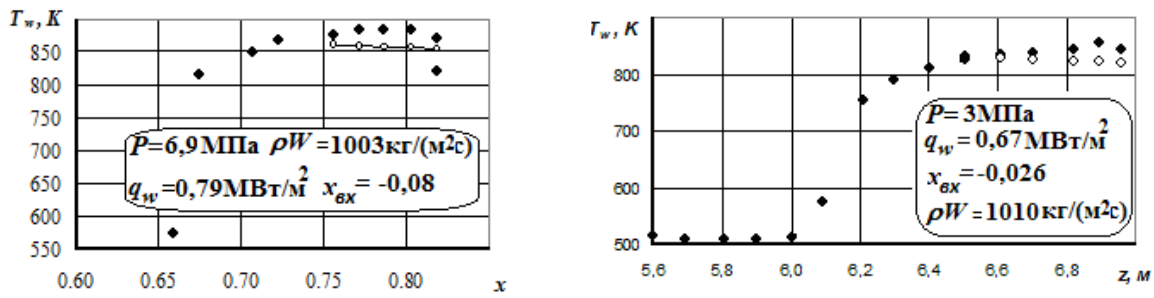


Рисунок 4 – Изменение экспериментальных и расчетных значений температуры по длине канала (черные точки – эксперимент, белые – расчет автора)

Изменение среднего размера капель в зависимости от массового паросодержания потока  $x$  для условий экспериментов Беннета и RIT (Royal Institute of Technology, Швеция), рассчитанного по методике для дисперсного потока, показаны на рисунках 5 и 6. Полученные результаты согласуются с расчетами по корреляциям других авторов.

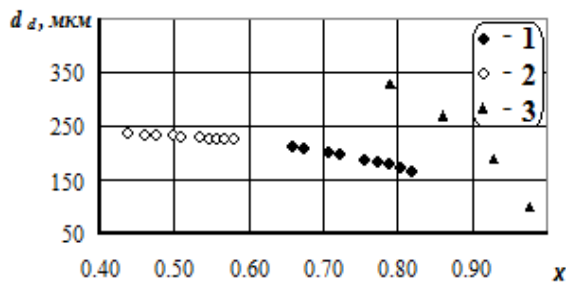


Рисунок 5 – Зависимость среднего размера капель от массового паросодержания потока

(эксперименты Беннета)  $P=6,9$  МПа:  
 1 -  $\rho W=1003$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=0,79$  МВт/ $m^2$ ;  
 2 -  $\rho W=1935$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=1,09$  МВт/ $m^2$ ;  
 3 -  $\rho W=655,5$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=0,75$  МВт/ $m^2$

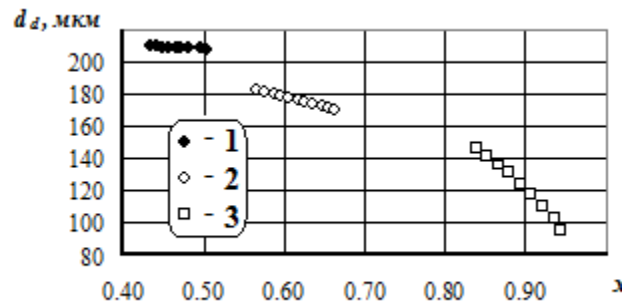


Рисунок 6 – Зависимость среднего размера капель от массового паросодержания потока

(эксперименты RIT)  $P=3$  МПа:  
 1 -  $\rho W=1503$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=0,77$  МВт/ $m^2$ ;  
 2 -  $\rho W=1010$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=0,67$  МВт/ $m^2$ ;  
 3 -  $\rho W=499$  кг/( $m^2c$ ),  $q_w=0,46$  МВт/ $m^2$

В шестой главе приведены результаты статистического анализа погрешности определения расчетной температуры стенки. В представленной работе было обработано 27 экспериментов (329 расчетных точек).

Для практики важным является максимальное значение температуры стенки в закризисной области  $T_w^{max}$ . Относительная погрешность определения максимальной температуры стенки по предложенным методикам составила менее 5 %, а среднее отклонение расчетного значения  $T_w^{max}$  от экспериментального – примерно 40 К (рисунок 7).

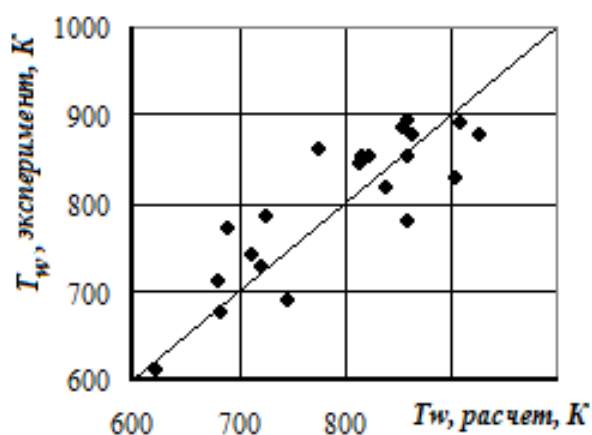


Рисунок 7 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений максимальной температуры стенки

В результате статистической обработки получено, что распределение отклонений расчетных значений от экспериментальных подчиняется нормальному закону Гаусса с дисперсией  $\sigma^2 = 1,6 \%$  и стандартным отклонением 12,5 % (см. рисунок 8).

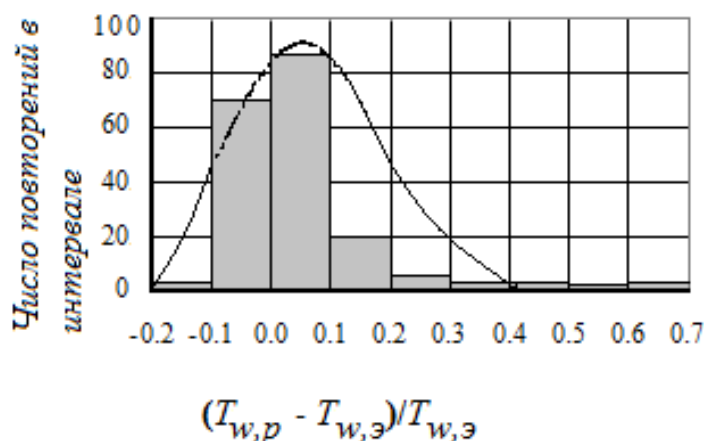


Рисунок 8 – Гистограмма отклонений расчета от экспериментальных данных

На основании проведенного статистического анализа погрешности расчетов по определению температуры стенки в закризисной области сделан вывод, что расчетные значения температуры с достаточной точностью совпадают с данными экспериментов различных авторов. Это свидетельствует о достоверности предложенных модели и методики и подтверждает достижение цели диссертационного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения достоверности прогнозирования температуры стенки оболочек твэлов с помощью компьютерных программ, необходимо совершенствование систем замыкающих соотношений двухжидкостных моделей двухфазного потока, особенно для закризисного теплообмена.

С этой целью в представленной работе:

1. Для расчета теплоотдачи от стенки к пару в *обращенном кольцевом* режиме течения предложена формула для числа Нуссельта в диапазоне чисел Рейнольдса от 0 до  $3 \cdot 10^5$ , для чего:

аналитически решена задача о ламинарном течении среды в кольцевом канале с заданной постоянной плотностью теплового потока на одной из стенок, методом суперпозиции найдено решение для случая несимметричного обогрева (охлаждения) стенок;



получена аппроксимация для числа Нуссельта при турбулентном течении пара в пристенном слое при обогреве только наружной стенки;

выполнена аппроксимация для коэффициента влияния  $\theta_o^*$  в указанном диапазоне чисел Рейнольдса.

2. Предложено учитывать влияние переменности физических свойств пристенного парового слоя на теплоотдачу путем введения поправки – температурного фактора.

$$\gamma = \left( \frac{T_w}{T_s} \right)^m$$

3. Для расчета теплоотдачи от стенки к *дисперсному* потоку предложена модификация полуэмпирической модели Хейна – Кёле, полученной на обширном экспериментальном материале, которая основана на введении поправки при расчете степени неравновесности паракапельного потока. Поправка учитывает уменьшение суммарной поверхности капель при их испарении в перегретом паре.

4. Предложено неизвестную составляющую теплового потока от стенки к каплям в двухжидкостной модели находить как разность общего теплового потока и потока от стенки к однофазному перегретому пару. При этом общий тепловой поток от стенки к перегретому пару с каплями определяется по модифицированной автором неравновесной модели Хейна – Кёле.

5. Сделаны оценки среднего размера капель в дисперсном потоке, теплового потока, переданного каплям на стенке при прямом контакте или при испарении в пограничном слое.

6. Достоверность результатов расчета теплообмена в закризисной области с помощью предложенных в данной работе моделей оценена на основании сопоставления с опытными данными различных авторов. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений температуры оболочек твэлов в закризисной области.

7. Полученные результаты предназначены для использования в системе замыкающих соотношений новой версии расчетного кода КОРСАР.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

**Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК**

1. Агафонова, Н.Д. Теплообмен при обращенном кольцевом режиме течения пароводяного потока [Текст] / Н.Д. Агафонова, И.Л. Парамонова // Теплоэнергетика. 2013. № 3. С. 22–27.– Пер. ст.: Agafonova, N.D. Heat transfer in inverted annular mode of steam–water flow. / I.L. Paramonova // Thermal Engineering. 2013. Vol. 60. № 3. P. 176–181.

2. Агафонова, Н.Д. Сравнительный анализ зависимостей для расчета теплоотдачи при кипении с недогревом [Текст] / Н.Д. Агафонова, М.А. Готовский, И.Л. Парамонова // Теплоэнергетика. 2006. № 2. С. 48–53.– Пер. ст.: Agafonova, N.D. Comparative analysis of correlations for calculating subcooled boiling heat transfer / N.D. Agafonova, M.A. Gotovskii, I.L. Paramonova // Thermal Engineering. 2006. V. 53. № 2. P. 128–133.

**Статьи в материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов**

3. Мигров, Ю.А. Разработка и верификация расчетного теплогидравлического кода улучшенной оценки КОРСАР [Текст] / Ю.А. Мигров, С.Н. Волкова, Н.Д. Агафонова, И.Л. Парамонова // Энергетические машины и установки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ.– 1999.– С. 46–51.– (Тр. СПбГТУ; № 481).

4. Alekseev, S.B. True void fraction in vertical tubes under conditions of bubbling [Text] / S.B. Alekseev, Yu.N. Ilyukhin, V.O. Kukhtevich, S.V. Svetlov, V.G. Sidorov, I.L. Paramonova // High Temperature. 1999. V. 37. № 4. P. 590–596.

5. Агафонова, Н.Д. Верификация зависимостей для расчета теплоотдачи при кипении с недогревом [Текст] / Н.Д. Агафонова, М.А. Готовский, И.Л. Парамонова // Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий: Материалы науч.-практ. конф.– СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.– С. 175–181.

6. Agafonova, N.D. Heat transfer at subcooled flow boiling [Text] / N.D. Agafonova, M.A. Gotovskii, I.L. Paramonova // 3<sup>rd</sup> International Symposium on

Two-Phase Flow Modelling and Experimentation (Italy, Pisa, 22–24 September 2004).

7. Агафонова, Н.Д. О надежности определения режима течения двухфазного потока в расчетных кодах [Текст] / Н.Д. Агафонова, И.Л. Парамонова // Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов: Тез. докл. науч.-технич. семинара (г. Сосновый Бор, 4–8 окт. 2004) / НИТИ им. А.П. Александрова.– СПб.: С. 75–77.

8. Агафонова, Н.Д. Локальная верификация расчетного комплекса КОРСАР по определению температуры стенки в условиях кипения с недогревом [Текст] / Н.Д. Агафонова, И.Л. Парамонова, М.А. Готовский // Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов: Тез. докл. науч.-технич. семинара (г. Сосновый Бор, 4–8 окт. 2004) / НИТИ им. А.П. Александрова.– СПб.: С. 79–81.

9. Агафонова, Н.Д. Определение температуры стенки в условиях кипения с недогревом [Текст] / Н.Д. Агафонова, М.А. Готовский, И.Л. Парамонова // Физика и техника реакторов: материалы XXXVIII-XXXIX зимних школ. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 95–107.

10. Агафонова, Н.Д. Теплогидродинамика. Теплогидравлические процессы в реакторах и парогенераторах: Учеб. пособие [Текст] / Н.Д. Агафонова, А.Я. Благовещенский, И.Л. Парамонова.– СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000.– 68 с.