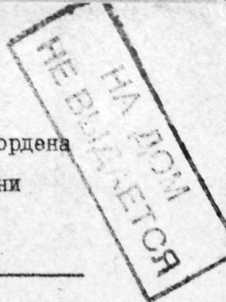


М 411826

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени
Н.Э. Баумана



На правах рукописи

Иванов Виктор Григорьевич

УДК 536.242:532.62

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА И
ГИДРОДИНАМИКИ СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

01.04.14 - Теплофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1983

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана и НПО "Энергия".

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент НИКИТИН В.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ГАЛИЦЕЙСКИЙ Б.М.

кандидат технических наук,
доцент КАЛИШЕВСКИЙ Л.Л.

Ведущее предприятие: ВНИИ атомного **энергетического**
машиностроения

Защита диссертации состоится "16" января 1984 г.
в "14" часов на заседании Специализированного Совета
К 053.15.08 (Энергетические установки) в Московском высшем
техническом училище им. Н.
Москва, Лефортовская на
строение".

Ваши отзывы на автор
печатью учреждения, про
Москва, 2-я Бауманская у
секретарю Совета К 053.1

С диссертацией можн
им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разосла

Ученый секрет
Специализированного
К 053.15.08

17 411826

Актуальность работы. Одним из основных направлений в ядерной энергетике в настоящее время является повышение единичной мощности реактора и связанное с этим увеличение энергонапряженности аппарата, совершенствование методов отвода тепла, совершенствование гидродинамических характеристик элементов оборудования АЭС, повышение надежности и безопасности АЭС.

Во многих элементах энергетического оборудования современных АЭС имеет место течение двухфазного энергоносителя в дисперсно-кольцевом и капельно-плочном режимах течения. Такого типа течения реализуются в сепараторах-пароперегревателях - СПП, в каналах и паропроводах влажного пара, системах жидкостного регулирования СЖР, системах аварийного охлаждения ТВЭЛ в случае так называемой "Большой аварии", связанной с потерей теплоносителя и осушением активной зоны. При том значительном практическом интересе к вышеуказанным проблемам, вопросы теплообмена и гидродинамики в капельно-плочных течениях недостаточно исследованы. Прежде всего, из-за волнового движения свободной поверхности пленки и сложного характера его поведения. Так например, наличие волн на поверхности пленки в сепарационных элементах может привести к срыву капель жидкости с гребней волн и забросу влаги в турбину. Использование стекающей пленки жидкости в СЖР ставит задачу обеспечения такого режима, в котором пленка покрывает всю поверхность и обеспечивает надежный теплообмен во всей обогреваемой поверхности. В случае "Большой аварии", если температура поверхности ТВЭЛ превысила значение некоторой критической температуры /в литературе она известна как температура разбрызгивания/, натекающая на нее жидкость отбрасывается в виде пара и капель. И только когда температура поверхности станет меньше критической жидкость начинает смачивать ее. Для надежной оценки эффективности работы системы аварийного охлаждения необходимо знание механизма теплообмена в окрестности фронта охлаждения.

Диссертационная работа и посвящена изучению влияния волновых параметров на поверхность пленки на её усреднённые гидродинамические и тепловые характеристики, а также изучению механизма теплообмена в окрестности фронта охлаждения.

Цель работы. Изучение влияния волнового движения на поверхность стекающей пленки жидкости на гидродинамические характеристики и конвективный теплообмен в пленке. Изучение теплообмена в

I

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1411826

Иванов В. Г. Разработка мет



окрестности фронта охлаждения, разработка методов их расчета.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Разработана математическая модель, связывающая характеристики волнового движения пленки с деформацией усредненного по длине волны профиля скорости и, как следствие, с изменением коэффициента теплоотдачи. Установлено, что отклонение профиля скорости от параболического, характерного для чисто ламинарного течения, начинается с $Re_g \approx 240$. Коэффициент теплоотдачи также начинает отличаться от характерного для гладкой пленки начиная с этого числа Рейнольдса, причем его изменение с длиной пробега коррелировано с развитием волнового движения на поверхности пленки. Получены экспериментальные данные конвективного коэффициента теплоотдачи в широком диапазоне режимных параметров в зависимости от длины пробега, чем существенно расширен диапазон имеющихся аналогичных экспериментальных данных. На основе расчетов по вышеупомянутой модели и полученных экспериментальных данных предложена инженерная методика по расчету локальных коэффициентов теплоотдачи к стекающей пленке жидкости.

При исследовании скорости продвижения фронта охлаждения было выявлено, что конвективный теплообмен имеет место на некотором расстоянии от фронта охлаждения. В окрестности же фронта охлаждения наблюдается интенсивное кипение пленки, сопровождающееся разбрызгиванием. В результате экспериментального исследования теплообмена в окрестности фронта охлаждения были получены профили тепловых потоков в зависимости от температуры поверхности и режимных параметров. Выявлены величины критических тепловых потоков и температур поверхности характерных для начала развитого пузырькового кипения в пленке и для максимальной величины снимаемого теплового потока. Предложена эмпирическая зависимость для теплового потока в окрестности фронта охлаждения. На основе полученных зависимостей для конвективного теплообмена и теплообмена в окрестности фронта охлаждения создана программа для численного решения задачи распространения фронта охлаждения в квазистационарном приближении, позволяющая рассчитывать величину скорости продвижения фронта охлаждения.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Полученные в работе рекомендации по определению усредненного профиля скорости, средней толщины пленки жидкости и локального

коэффициента теплоотдачи к пленке позволяют рассчитывать гидродинамические характеристики и процессы теплообмена в элементах оборудования АЭС, а разработанная программа расчета скорости продвижения фронта охлаждения при смачивании сухой, горячей поверхности может быть использована при оценке эффективности работы систем аварийного расхолаживания элементов ядерного реактора и технологического оборудования.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на II Всесоюзном научно-техническом совещании по теме: Использование морских и солоноватых вод на ТЭС и задачи исследований. /Баку, 1976/, на конференции молодых ученых и специалистов /НПО "Энергия", Москва, 1978/, на II школе-семинаре по механике многофазных сред /МИУ, ХАИ, Рыбачье, 1979/, на III Всесоюзной школе-семинаре по проблемам газодинамики и теплообмена в энергетических установках /МБТУ, Усть-Нарва, 1981/, на VI Международной конференции по тепло-массообмену /Торонто, 1977/, на VI Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов /ЦКТИ им. Ползунова, Ленинград, 1979/.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 5 печатных работах. Кроме того, материалы исследований использованы в 7 научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 189 страниц, включая 120 страниц текста, 58 рисунков, 3 таблицы, список литературы на 11 страницах, включающий 109 работ.

Содержание работы.

Во введении показана актуальность работы, изложена цель и общие задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ опубликованных результатов исследования гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках жидкости.

При стекании пленки жидкости её поверхность практически во всем диапазоне чисел Рейнольдса покрыта волнами. При экспериментальных исследованиях гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках было отмечено /Козлов В.М., Wilke W. и др./, что усредненный профиль скорости и коэффициент теплоотдачи к пленке, начиная

с некоторых чисел Рейнольдса, отличается от рассчитанных по моделям гладкой пленки. Этот факт связывается с наличием волнового движения на поверхности пленки. Существующие расчетные модели связывающие волновой характер движения пленки с её усредненным профилем скорости /Шеклеин С.Е. и др./ недостаточно хорошо описывают экспериментальные данные, причем с ростом числа Рейнольдса это расхождение увеличивается.

В большинстве опубликованных экспериментальных результатов, посвященных изучению коэффициента теплоотдачи к пленке, изучался средний по длине канала коэффициент теплоотдачи /Stzue H., Воронцов Е.Г., Мак-Адамс В.Х. и др./ Однако сравнение полученных результатов, полученных для каналов разных длин выявляет существенный разброс данных. Это связано с методическими трудностями измерения коэффициента теплоотдачи в тонких слоях жидкости, разным конструктивным исполнением входных участков, но главным образом с тем фактом, что коэффициент теплоотдачи коррелирован с характером волнового движения на поверхности пленки, которое развивается по длине пробега.

Имеется ограниченное число экспериментальных работ в которых изучаются локальные коэффициенты теплоотдачи по длине канала /Ганчев Б.Г., Лозовецкий В.В., Мусвик А.Б., Wilke W. и др./ При этом в некоторых работах /Wilke W., Гимбутис Г.И./ коэффициент теплоотдачи уже при длинах пробега 0,2-0,5 становился постоянным. В других же работах /Ганчев Б.Г., Лозовецкий В.В., Мусвик А.Б. и др./ коэффициент теплоотдачи имел устойчивую тенденцию к росту на всех измеряемых длинах. Это расхождение результатов по-видимому объясняется в основном методическими трудностями.

Известно несколько классических работ, в которых сделана попытка связать волновое движение на поверхности пленки жидкости с коэффициентом теплоотдачи. Решая эту задачу различными методами в линейном приближении с автомоделным профилем скорости был сделан вывод, что наличие волнового движения на поверхности пленки увеличивает коэффициент теплоотдачи на 15-21 %. Однако результаты этих работ не объясняют увеличение коэффициента теплоотдачи с длиной пробега, а также отсутствие эффекта влияния волнового движения при малых числах Рейнольдса. / $Re_b \leq 200$ /.

Коэффициент теплоотдачи при кипении изучался во многих работах /Stzue H., Леверат В.И., Fujita T., Ueda T., Гимбутис Г.И. и др./ по

разброс полученных данных велик и в большинстве результатов ярко выражена зависимость от расхода, это говорит о том что в этих работах имело место кипение с недогревом. И только в нескольких последних работах /Fujita T., Ueda T., Гимбутис Г.И./ изучался коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении. Отмечается, что тепловые потоки снимаемые кипящей пленкой могут достигать значительных величин 10^7 Вт/м², что существенно выше, чем при кипении в большом объеме и при вынужденном течении в каналах.

При изучении скорости смачивания сухой, предварительно нагретой поверхности основной проблемой, которую необходимо решить при разработке расчетных методов определения скорости продвижения фронта охлаждения, является корректное задание граничных условий теплообмена на поверхности смачивания. После этого задача расчета скорости смачивания сводится к решению уравнения теплопроводности для тела, поверхность которого смачивается, с заданными граничными условиями. Во всех опубликованных работах /Namanouchi A., Thompson T.S., Coney M.W., Ганчев Б.Г., Боков А.Е. и др./ использовались произвольно заданные законы распределения коэффициента теплоотдачи в окрестности фронта охлаждения. Сопоставление получаемых расчетных зависимостей с экспериментальными данными приводило к противоречивым и не объяснимым физически законам распределения теплоотдачи в окрестности фронта охлаждения.

Анализ опубликованных работ по гидродинамике и теплообмену свободно стекающей пленки жидкости показал, что экспериментальных данных локальных конвективных коэффициентов теплоотдачи к стекающей пленке жидкости недостаточно для построения обоснованной модели процесса. Отсутствуют достоверные теоретические модели, позволяющие объяснить влияние волнового движения свободной поверхности пленки на гидродинамические и тепловые характеристики. Не существует надежной методики расчета теплоотдачи в окрестности фронта охлаждения. В связи с этим были поставлены следующие задачи настоящего исследования:

а/Разработать физическую и математическую модели, объясняющие влияние волновых параметров стекающей пленки жидкости на усредненные гидродинамические и тепловые характеристики пленки.

б/На основании разработанной модели создать методику, позволяющую рассчитывать усредненные профили скоростей и локальный коэффициент теплоотдачи.

в/Провести экспериментальные исследования локальных коэффициентов теплоотдачи к стекающей пленке жидкости в широком диапазоне чисел Re и Pr .

г/Провести экспериментальные исследования локальных коэффициентов теплоотдачи в окрестности фронта охлаждения в широком диапазоне режимных параметров.

д/Разработать методику расчета скорости смачивания сухой предварительно нагретой поверхности.

Во второй главе формулируются физическая и математическая модели, объясняющие влияние волновых параметров поверхности стекающей пленки жидкости на основные тепловые и гидродинамические характеристики течения.

Качественно модель, объясняющую явление можно представить себе следующим образом: течение тонких слоев вязкой жидкости практически абсолютно неустойчиво к длинноволновым возмущениям, которые вызывают волновое движение поверхности пленки. Однако, при малых числах Рейнольдса $/Re_0 < 200/$ это движение является регулярным и не оказывает перемеживающего воздействия на течение. При больших числах Рейнольдса основное длинноволновое колебательное движение индуцирует вторичные колебания в потоке. В результате наложения колебательных движений возникают устойчивые вихревые образования жидкости, обладающие значительной интенсивностью. Причём это движение, несмотря на наличие вихрей, является упорядоченным и не означает переход к турбулентной форме течения.

Таким образом основным положением нашей аналитической модели, является образование и развитие устойчивых вихрей, связанных с волновым движением на поверхности. Это безусловно должно приводить к дополнительной диссипации энергии и, как следствие, к деформации профиля скорости и изменению коэффициента теплоотдачи.

Сформулируем модель математически. Выражение для усредненного профиля скорости в системе координат, связанной с фазовой скоростью поверхностных волн, имеет вид:

$$\bar{u} = Re_0 \int_0^y \bar{v} dy + \frac{\delta_0 g}{2 \bar{u}_0^2} (2y - y^2) - C. \quad (1)$$

Для определения величины напряжений Рейнольдса необходимо linearизовать уравнения Навье-Стокса. Из линейного приближения определяются возмущения u' и v' , а затем принимается основное допущение, что действительное возмущение /т.е. интенсивность и амплитуда вихря/ подобно по форме решению, даваемому линейной теорией

но что это решение умножается на некоторый амплитудный множитель /как второе приближение/. Этот множитель определяется путем подстановки результатов линейной теории в уравнении баланса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \iint \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) dx dy = \iint (-\bar{u} \bar{v}') \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} dx dy - \frac{1}{Re_s} \iint \left(\frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \right) dx dy \quad (2)$$

и, таким образом, определяется через интегралы, содержащие функции определяемые только по линейной теории.

Обычно линейное приближение для подобных задач получают предполагая малость колебательного движения. При этом уравнение вихрей переходит к уравнению Орра-Зомерфельда, которое чрезвычайно трудно для анализа. Поэтому в настоящей работе для линеаризации полагается, как первое приближение, что фазовая скорость поверхностных волн значительно больше скорости основного движения. Это позволяет получить линейное уравнение с постоянными коэффициентами типа Гельмгольца.

$$\Delta \Delta \Psi + c Re_s \frac{\partial}{\partial x} \Delta \Psi = 0 \quad (3)$$

Решение этого уравнения ищется в виде ряда Фурье

$$\Psi = \varphi_0(y) + \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(y) e^{\frac{i \pi k x}{\lambda}} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\varphi}_k e^{-\frac{i \pi k x}{\lambda}} \quad (4)$$

И, таким образом, для определения амплитуд φ_k имеем уравнение:

$$\varphi_k'''' + (i Re_s c \frac{\pi k}{\lambda} - 2 \frac{\pi^2 k^2}{\lambda^2}) \varphi_k'' + (\frac{\pi^4 k^4}{\lambda^4} - i c Re_s \frac{\pi^3 k^3}{\lambda^3}) \varphi_k = 0 \quad (5)$$

Граничные условия.

На стенке	1.	$y = 0,$	$\varphi_k = 0$ для всех k
	2.	$y = 0,$	$\varphi_k' = \begin{cases} -c, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$

на внешней поверхности:

$$\begin{aligned} 3. & \quad \Psi = \text{const} \quad \text{при} \quad y = \delta(x) \\ 4. & \quad \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right) (1 - \delta^2) - 4 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} = 0 \end{aligned}$$

Для амплитудного множителя /второе приближение/ получено:

$$A^2 = \frac{\gamma_2}{\gamma_3} \frac{\lambda}{\pi} \frac{\delta_0 g}{u_0^2} \left(1 - \frac{Re_{кр}^2}{Re_s^2} \right) \quad (7)$$

Для $Re_{кр}$ начиная с которого в потоке образуются отличные от нуля напряжения Рейнольдса:

$$Re_{кр} = \frac{\gamma_4 u_0^2}{\gamma_2 \pi \delta_0 g} \quad (8)$$

где величины δ_2 , δ_3 и δ_4 представляют из себя громоздкие интегралы, содержащие результаты линейного приближения. Таким образом, после того как функция тока умножается на амплитудный множитель для напряжений Рейнольдса получено:

$$\overline{u'v'} = i \frac{\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^6 \kappa \left(\frac{\partial \varphi_k}{\partial y} \tilde{\varphi}_k - \frac{\partial \tilde{\varphi}_k}{\partial y} \varphi_k \right) \quad (9)$$

Расчетное критическое число Рейнольдса $Re_{кр} = 240$, то есть при меньших числах Рейнольдса несмотря на наличие волн на поверхности пленки напряжения Рейнольдса равны нулю и профиль скорости не отклоняется от параболического.

Для того, чтобы объяснить влияние параметров волнового движения пленки на коэффициент теплоотдачи использовался метод тепловой и гидродинамической аналогии. Для коэффициента теплоотдачи получено выражение:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\delta_0^2} \int_0^{\delta_0} \left[\frac{u}{\lambda_s + \lambda'} dy \right]^2 dy \quad (10)$$

где

$$\lambda_s = - \frac{Pr_2 \overline{u'v'} \lambda'}{g(\delta_0 - y) + \overline{u'v'}} \quad (11)$$

для практического расчета коэффициент теплоотдачи представлен в виде:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_b$$

α_0 - рассчитывается по моделям гладкой пленки.

В третьей главе рассматривается математическая постановка и численный алгоритм задачи для определения скорости продвижения фронта охлаждения.

Математическая задача для определения скорости продвижения фронта охлаждения в системе координат, связанной с фронтом формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{cr} \frac{\partial t_{cr}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{cr} \frac{\partial t_{cr}}{\partial y} \right) + (\rho c)_{cr} u_{\phi} \frac{\partial t_{cr}}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{dt_{ж}}{dx} = \frac{q}{\Gamma c_{cr} - \rho u_{\phi} \delta_0 c_{cr}} \quad (13)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{cr}(-\infty, y)}{\partial x} &= 0 & \lambda_{cr} \frac{\partial t_{cr}(x, R_1)}{\partial y} &= q & t_{ж}(-\infty) &= t_{ж\max} \\ \frac{\partial t_{cr}(\infty, y)}{\partial x} &= 0 & \frac{\partial t_{cr}(x, R_0)}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

для определения скорости продвижения фронта охлаждения необходимо еще одно дополнительное условие. Поскольку сформулированная задача сводится к расчету скорости продвижения произвольной изо-термы вдоль охлаждаемой поверхности локализуем позицию фронта температурой поверхности, соответствующей максимальному тепловому потоку и поместим в этой точке начало координат. Таким образом имеем дополнительное условие:

$$t_{cr}(0, R_1) = T_0 \quad (15)$$

Теперь для расчета скорости продвижения фронта охлаждения задача полностью определена и для её решения необходимо знание теплового потока в окрестности фронта охлаждения. Методика его определения и эмпирические формулы для q в зависимости от режимных параметров представлены ниже.

Задача I2-I5 решалась численно методом переменных направлений. Однако этот расчет является весьма трудоемким и поэтому как альтернативный вариант была рассмотрена одномерная постановка задачи, расчет которой существенно проще. Одномерная задача имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_{cr} \frac{dt_{cr}}{dx} \right) + (\rho c)_{cr} u_{\phi} \frac{dt_{cr}}{dx} = \frac{q}{d} \quad (16)$$

$$\frac{dt_{ж}}{dx} = \frac{q}{\Gamma c_{cr} - \rho u_{\phi} \delta_0 c_{cr}} \quad (17)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{dt_{cr}(-\infty)}{dx} &= 0 & \frac{dt_{cr}(\infty)}{dx} &= 0 \\ t_{cr}(0) &= T_0 & t_{ж}(-\infty) &= t_{ж\max} \end{aligned} \quad (18)$$

Эта задача также решалась численно по неявной схеме методом установления.

В четвертой главе приводится описание экспериментальных стендов, на которых проводились исследования, методик проведения экспериментов, а также проводится анализ погрешностей определения измеряемых величин.

Экспериментальный стенд для определения конвективного коэффициента

иента теплоотдачи к свободно стекающей пленке жидкости состоит из сменного рабочего участка, системы электрообогрева, замкнутого водяного контура и системы измерений. Рабочий участок представляет собой установленную вертикально трубу из нержавеющей стали диаметром 9 и 20 мм, толщинами стенки 0,15 и 1,5 мм и длиной 2 м. В верхней части участка устанавливалось пленкообразующее устройство щелевого типа. Обогрев рабочих участков осуществлялся переменным током, который подводится от источника питания к токопроводам из красной меди запрессованных внутрь труб. Диапазоны изменения основных параметров процесса: температура жидкости на входе в рабочий участок - $10 \pm 95^\circ\text{C}$, плотность теплового потока - $(1,1 \pm 15) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, давление атмосферное. Коэффициент теплоотдачи определялся в 11 сечениях по высоте канала. Для определения коэффициента теплоотдачи измерялись плотность теплового потока на поверхности рабочего участка и разница между температурой стенки и жидкости. Температуру стенки определяли хромель-копелевыми термопарами приваренными непосредственно к поверхности. Для измерения температуры жидкости применялись термопарные щупы, вводимые в пленку с помощью микрометрических винтов. Термопары соединялись дифференциальным образом для измерения непосредственно разницы температур стенки и жидкости. Систематическая погрешность измерения Δt вызванная оттоком тепла по термоэлектродам рассчитывалась численно по методике развитой в работах Макарова, Кулакова и Ярцева.

Прямое измерение профиля теплового потока в окрестности фронта охлаждения практически трудно выполнимо, поскольку основное изменение температуры поверхности в окрестности фронта локализовано на расстоянии нескольких миллиметров, причем скорость изменения температуры достигает величины порядка 100°C на миллиметр. Поэтому для определения профиля теплового потока предлагается следующая методика. На смачиваемой и тыльной стороне рабочего участка в выбранном сечении соосно крепятся две термопары. По мере прохождения фронтом охлаждения указанного сечения термопары непрерывно регистрируют изменение температуры на обеих поверхностях рабочего участка. Таким образом в системе координат, связанной с фронтом охлаждения, мы получаем профили температур с обеих сторон стенки. То есть математически мы имеем граничные условия. Следовательно, задача для определения профиля теплового потока по известным температурам поверхностей имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial y}) + (\rho c)_{\text{ст}} u_{\Phi} \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{\text{ст}}(-\infty, y)}{\partial x} &= 0 & t_{\text{ст}}(x, R_1) &= F_1(x) \\ \frac{\partial t_{\text{ст}}(\infty, y)}{\partial x} &= 0 & t_{\text{ст}}(x, R_0) &= F_2(x) \end{aligned} \quad (20)$$

При задании профилей температур и скорости продвижения фронта охлаждения задача полностью определена. Эта задача решалась численно методом переменных направлений.

Для получения профилей температуры в окрестности фронта охлаждения и измерения скорости фронта был создан экспериментальный стенд, состоящий из рабочего участка, системы электрообогрева, водного контура и системы измерений. Рабочий участок представляет собой массивную прямоугольную пластину габаритами 200x30x1500 мм из нержавеющей стали. В верхней части рабочего участка располагается пленкообразующее устройство переливного типа. Рабочий участок разделен на две части специальной теплоизолирующей прокладкой. Верхняя часть длиной 500 мм предназначена для гидродинамической стабилизации стекающей пленки. Нижняя рабочая часть участка обогревается нихромовыми спиралями и снабжена системой измерения скорости фронта охлаждения и термопарами.

Диапазоны измерения основных параметров процесса:

1. Максимальная мощность системы обогрева $N_{\text{max}} = 10$ кВт,
2. Плотность орошения $\Gamma = 0,4 + 2$ кг/м·с
3. Температура охлаждающей жидкости, $t_{\text{жжх}} = 50 + 96^\circ\text{C}$.

Скорость фронта измерялась с помощью метода лазерной интроскопии, основанном на использовании двухлучевой лазерной схемы.

Для измерения профилей температур к рабочей поверхности пластины причеканивались 10 хромель-копелевых термопар с диаметром термоэлектрода 0,2 мм. На несмачиваемой поверхности пластины для контроля температур были причеканены 4 термопары. Температура несмоченной поверхности за время опыта не менялась. Профили температур в окрестности фронта охлаждения фиксировались с помощью осциллографа Н-115. Каждый профиль для расчетной методики получен путем усреднения показаний 10 термопар. В качестве охлаждающей жидкости использовалась питательная вода из линии подпитки на ГРЭС-4 Мосэнерго, где была размещена установка. Поправка на отток тепла по термоэлектродам и на тепловую инерционность термопар

расчитывалась по методике Макарова и Кулакова.

Максимальная среднеквадратичная погрешность измерения величин составляла: конвективного коэффициента теплоотдачи $\pm 14,7\%$ теплового потока в окрестности фронта охлаждения $\pm 3,3\%$.

В пятой главе приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований.

На основании методики описанной во второй главе составлена программа для численного расчета напряжений Рейнольдса при различных режимных параметрах и волновых профилях. Был проведен расчет усредненного профиля скорости /ур-ние 1/. Расчитанные профили скорости сравниваются с полученными экспериментально, методом электронного стробоскопирования /Козлов В.М./. Отмечается хорошее совпадение расчета с экспериментальными данными. По расчитанным профилям скорости определялся градиент скорости на смоченной поверхности. Среднее касательное напряжение на стенке связано со средней толщиной пленки следующим выражением:

$$\tau = \rho_{ж} g \delta. \quad (21)$$

По этой формуле была расчитана зависимость средней толщины пленки от Re_g . Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными и имеющимися эмпирическими зависимостями. Следует отметить, что традиционно в литературе отклонение средней толщины пленки при $Re_g > 400$ от зависимости Нуссельта для гладкой ламинарной пленки связывалось с началом турбулентного течения. Настоящая модель связывает этот факт с наличием упорядоченного вихревого движения индуцированного поверхностными волнами.

Конвективный коэффициент теплоотдачи расчитывался по формулам /10-11/. Для практического определения волновой добавки к коэффициенту теплоотдачи в работе представлены номограммы. Расчитанные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от длины пробега, Рейнольдса и Прандтля сравниваются с экспериментальными, полученными в настоящей работе. Отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи с длиной пробега, начиная с длин 0,3 - 0,6 м. Экспериментальные данные хорошо описываются расчетом.

При исследовании теплообмена в окрестности фронта охлаждения по методике представленной в главе 4, были получены профили тепловых потоков в зависимости от режимных параметров. При анализе полученных результатов были отмечены четыре характерные величины.

1. Тепловой поток ($q_{кр1}$) и температура стенки ($\Delta t_{кр1}$) характерные для начала развитого пузырькового кипения.

2. Максимальный тепловой поток ($q_{кр2}$) и температура стенки ($\Delta t_{кр2}$) соответствующие максимуму кривой кипения.

Для развитого пузырькового кипения $q \sim (\Delta t)^{10/3}$

Величины $q_{кр1}$ и $\Delta t_{кр1}$ определялись из условия, при котором зависимость $q = f(\Delta t)$ начинала определяться пропорциональностью величине $(\Delta t)^{10/3}$. Для этих величин были получены эмпирические зависимости:

$$q_{кр1} = (844 \Delta t_n + 0,988 \cdot 10^5) \cdot \Gamma^{5,6 \cdot 10^{-3} \Delta t_n + 0,24} \quad (22)$$

$$\Delta t_{кр1} = \left(\frac{q_{кр1}}{1,119 \cdot 10^5} \right)^{0,3} \quad (23)$$

$$q_{кр2} = 0,81 \cdot 10^5 \cdot \Gamma^{0,757} \Delta t_n + 0,8 \cdot 10^7 \quad (24)$$

$$\Delta t_{кр2} = (-0,05375 \cdot \Gamma^2 + 0,203 \cdot \Gamma - 0,001) \Delta t_n + 31 \quad (25)$$

Для теплового потока в окрестности фронта получена эмпирическая зависимость:

$$q = 1,119 \cdot 10^5 \Delta t_n^{10/3} \exp \left(-B \frac{\Delta t - \Delta t_{кр1}}{\Delta t_{кр2} - \Delta t_{кр1}} \right)^n \quad (26)$$

где

$$B = -\ln \left[\left(\frac{q_{кр2}}{q_{кр1}} \right) \left(\frac{\Delta t_{кр1}}{\Delta t_{кр2}} \right)^{10/3} \right] \quad n = \frac{10(\Delta t_{кр2} - \Delta t_{кр1})}{3 \cdot \Delta t_{кр2} \cdot B}$$

Таким образом, получены профили тепловых потоков в окрестности фронта охлаждения для модельной задачи с массивной пластиной. Для того чтобы подтвердить, что полученные закономерности справедливы для участков с другой геометрией и из других материалов, то есть подтвердить тот факт, что теплообмен в окрестности фронта полностью определяется гидродинамическими характеристиками процесса по методике развитой во второй главе, были проведены расчеты при различных режимных параметрах для участков из нержавеющей труб с разной толщиной стенки и труб из циркониевого сплава. Полученные расчетные данные скорости продвижения фронта охлаждения сравниваются с экспериментальными /Иошиоки, Ганчева, Еокова, Фармера/. Полученное совпадение расчетных данных с экспериментом доказывает применимость данной расчетной модели для участков с различной геометрией и разными материалами стенки.

Было проведено сравнение расчетов по двумерной и одномерной

методикам. Показано, что одномерная методика дает удовлетворительные результаты при толщинах стенки меньших одного миллиметра и при расходах $\Gamma < 0,8 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$.

Проведено расчетное исследование влияния толщины стенки на скорость продвижения фронта охлаждения. Установлено, что это влияние наблюдается при толщинах стенки меньших 2-4 мм в зависимости от режимных параметров.

Выводы.

1. Проведено экспериментальное исследование локальных коэффициентов теплоотдачи к свободно стекающей пленке жидкости в широком диапазоне режимных параметров $\Gamma = 0,2 \div 2,18 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$;

$$t_{\text{вх}} = 10 \div 95^\circ\text{C}; \quad Q = (1,1 + 15) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

2. Разработана физическая и математическая модели процесса влияния волновых параметров стекающей пленки жидкости на усредненные тепловые и гидродинамические характеристики пленки.

3. Полагается, что основной причиной отклонения профиля скорости и коэффициента теплоотдачи от их значений при стекании гладкой ламинарной пленки является возникновение и развитие в потоке упорядоченного вихревого движения.

4. Создана методика и разработана программа, позволяющая рассчитывать усредненные профили скоростей и локальные коэффициенты теплоотдачи. Проведен численный расчет на ЭВМ этих величин. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. На основании расчетов построены номограммы для определения коэффициентов теплоотдачи.

5. Проведено экспериментальное исследование профилей температуры в окрестности фронта охлаждения в широком диапазоне режимных параметров $\Gamma = 0,4 \div 2,18 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$; $t_{\text{вх}} = 50 \div 96^\circ\text{C}$, $T_2 = 300 \div 550^\circ\text{C}$.

6. Разработана методика и создана программа для расчета профилей тепловых потоков в окрестности фронта охлаждения по экспериментально определенным профилям температуры.

7. На основании численных расчетов проанализированы профили тепловых потоков в окрестности фронта охлаждения. Получены эмпирические зависимости для величины теплового потока и характерных точек от режимных параметров.

8. Разработаны программы и проведено численное решение на ЭВМ задачи перемещения фронта охлаждения. Выявлена область приме-

ния одномерной модели. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

9. Результаты работы использованы при разработке внутритрубного встроенного сепаратора, находящегося в пробной эксплуатации и при разработке аварийного охлаждения стекающей пленкой жидкости специального технологического оборудования.

Условные обозначения

δ_0 - средняя толщина пленки, U_0 - средняя скорость, u' , v' - пульсационные составляющие скорости, C - фазовая скорость поверхностных волн, X - продольная координата, y - координата, перпендикулярная к поверхности стенки, Ψ - функция тока,

λ - длина волны, α - коэффициент теплоотдачи, λ - коэффициент теплопроводности, α_0 - коэффициент теплоотдачи гладкой пленки, U_ϕ - скорость продвижения фронта охлаждения, Γ - плотность орошения, t - температура, q - плотность теплового потока, R_1 - координата смачиваемой поверхности, R_0 - координата внутренней поверхности, τ - касательное напряжение на стенке, Δt_n - температура недогрева жидкости относительно температуры насыщения, T_1 - первоначальная температура несмооченной поверхности, $Re_g = \frac{U_0 \delta_0}{\nu}$ - критерий Рейнольдса, $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ - критерий Прандтля.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Исследование локальной теплоотдачи в аппаратах со стекающей пленкой жидкости /В.М.Козлов, А.Б.Мусвик, В.И.Векшин, В.Г.Иванов - Использование морских и солоноватых вод на ТЭС и задачи научных исследований:- Тезисы доклада на II Всесоюзном научно-техническом совещании, Баку, 1976, с.123-124.

2. Козлов В.М., Мусвик А.Б., Иванов В.Г. Теплоотдача к пленке жидкости в стационарном и нестационарном режимах.- Тезисы докладов и сообщений VI Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов- Л., 1978, с.110-112.

3. Hydrodynamics and heat transfer processes in droplet-film flows /V.M. Kozlov, A.B. Musvick, V.G. Ivanov, J.L. Mizonov - Proc. 6th Heat Transfer Conf. Toronto, Vol. 1, 1978, p.231-240.

4. Иванов В.Г., Козлов В.М., Мусвик А.Б. Охлаждение перегре-

тых поверхностей стекающей пленкой жидкости- И.Ф.Ж., 1983, №3, с.383-390.

Кроме того принято к печати:

Исследование процесса расхолаживания активной зоны ядерного реактора стекающей пленкой жидкости /В.Г.Иванов, В.М.Козлов, А.Б.Мусвик, В.М.Никитин - в сб. Теплофизика ядерных энергетических установок. Свердловск, УИИ, 1983 г.

А.И.Иванов



Л-100160 от 25.11.1983, Заказ 1449 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Ротап rint MBTU 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5