М373275

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

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

На правах рукописи

Боков Александр Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОБОГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

(Специальность 01.04.14 - Теплофизика)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1981

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ГАНЧЕВ Б.Г.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор НАКОРЯКОВ В.А.

Кандидат технических наук, доцент КАБАНОВ Л.П.

Ведущее предприятие: ВНИИ АЭС НПО "Энергия", Москва.

Защита диссертации состоится "30" марта 1981 г. на заседании специализированного Совета К.053.1508 при Московском высшем [illegible]ана по адресу:

[illegible]отеке МВТУ

[illegible]1981 г.

[illegible] СОЛОНИН В.И.

М373275

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1373275
Боков А.Е. Исследование пре

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность работы. Одним из путей повышения эффективности эксплуатации ядерного реактора является совершенствование системы управления энерговыделением в активной зоне. В настоящее время ядерная энергетика развивается на базе крупных блоков, единичной мощности 1000 МВт и более. Использование таких мощностей предъявляет более высокие требования к системам управления реактора, чем на начальном этапе развития ядерной энергетики. В этой связи определенный интерес представляют системы жидкостного управления (СЖУ), позволяющие осуществлять более мягкое регулирование по объему активной зоны и улучшить эксплуатационные характеристики реактора. Одним из вариантов СЖУ, разрабатываемым применительно к реакторам типа РБМК, является система стержне-жидкостного регулирования (СЖР), в которой твердый поглощающий стержень, вводимый в активную зону сверху, дополняется столбом жидкого поглотителя (воды), заполняющего нижнюю часть канала регулирования. Подпитка этого столба, а также охлаждение стенок канала осуществляется относительно тонкой пленкой жидкости, стекающей по ним под действием силы тяжести. Условия нормальной эксплуатации канала регулирования требуют обеспечения стабильного, без разрывов, режима стекания пленки, обеспечения необходимых запасов по условиям разрыва пленки, а также знания условий возобновления охлаждения стенок при кратковременной, аварийной потере питания канала охлаждающей жидкостью. Диссертационная работа и посвящена исследованию этих предельных условий существования пленки жидкости на вертикальной обогреваемой поверхности, применительно к условиям эксплуатации канала регулирования ядерного реактора.

Р37320

Цель работы – изучение предельных условий существования недогретой до температуры насыщения пленки жидкости на нагреваемой поверхности и разработка методов их расчета.

Научная новизна работы заключается в следующем.

При исследовании условий возникновения "сухих пятен" в стекающей пленке существенно расширен диапазон плотностей теплового потока вплоть до $3 \cdot 10^5$ Вт/м^2; получены экспериментальные данные по влиянию температуры жидкости, кривизны обогреваемой поверхности; установлено существование предельного значения минимальной плотности орошения, выше которого, при увеличении плотности теплового потока, разрывов в пленке не наблюдается.

При исследовании скорости перемещения фронта смачивания

МЭТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

установлено:
- что минимальное значение скорости смачивания при фиксированных режимных условиях соответствует металлически чистой поверхности;
- существование диапазона расходов жидкости в пленке, в котором состояние поверхности не оказывает влияния на скорость смачивания;
- что в процессе теплоотвода к пленке жидкости за фронтом смачивания определяющую роль играет конвективный перенос.

Установлена связь разрывов в пленке в турбулентно-волновом режиме стекания с развитием волн на поверхности ламинарного слоя жидкости между крупными волнами и разработана физическая модель процесса возникновения разрывов в стекающей пленке. Выполнено упрощенное решение задачи разрыва пленки, позволившее разработать метод расчета условий разрыва (минимальной плотности орошения). На основе критериального анализа получена система критериев, определяющая условия разрыва стекающей пленки при ее обогреве. Выявлены четыре характерных диапазона режимных параметров, для каждого из которых найдены значения постоянных коэффициентов в зависимости, позволяющей рассчитывать условия разрыва пленки.

Разработана модель процесса смачивания сухой, предварительно нагретой, вертикальной поверхности стекающей пленкой жидкости. На основе этой модели создана программа для численного решения задачи распространения фронта смачивания в квазистационарном приближении, позволяющая рассчитывать величину скорости смачивания.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Полученные в работе рекомендации по определению условий возникновения разрывов в стекающей пленке позволяют рассчитывать минимально допустимые расходы жидкости в пленке при эксплуатации канала регулирования ядерного реактора, а разработанная программа расчета скорости смачивания сухой, горячей поверхности может быть использована при оценке эффективности работы систем аварийного расхолаживания элементов ядерного реактора.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке системы стержне-жидкостного регулирования ядерного реактора, находящегося в пробной эксплуатации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуж-

дались на XXI Всесоюзном теплофизическом семинаре (Новосибирск, институт теплофизики СО АН СССР, 1978), на VI Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов (Ленинград, ЦКТИ им. Ползунова, 1979), на VI и VII международных симпозиумах "Пресная вода из моря" (Лас-Пальмас, Канарские острова, 1978 и Амстердам, 1980).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ. Кроме того, материалы исследований использованы в 5 научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 178 страниц, включая 112 страниц текста, 54 рисунка , 4 таблицы, список литературы на 8 страницах, включающий 75 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проводится обзор опубликованных результатов исследований предельных условий существования пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности.

При стекании пленки жидкости по изотермической поверхности существует некоторое предельное значение расхода жидкости, называемое минимальной плотностью орошения (Γ_{min}), при котором нарушается сплошное течение пленки, возникают сухие, несмоченные участки поверхности и жидкость начинает течь в виде ручейка.

Обогрев омываемой пленкой поверхности приводит к значительному повышению минимальной плотности орошения. Такое повышение, характерное для жидкостей, недогретых до температуры насыщения, с отрицательным температурным градиентом поверхностного натяжения (вода), вызвано действием термокапиллярного эффекта в стекающей пленке: при прогреве пленки, неодинаковой, за счет случайных колебаний ее свободной поверхности, по толщине, на поверхности ее возникают градиенты температуры и, соответственно, поверхностного натяжения, которые, в конечном счете, ведут к деформации поверхности и при определенных условиях могут привести к разрыву пленки.

Большинство опубликованных результатов экспериментальных

исследований минимальной плотности орошения в условиях обогрева (Е.Г. Воронцов, F.F. Simon and Y.-Y. Hsu и др.) проведены в области малых плотностей теплового потока (меньше 10^4 Вт/м^2). В диапазоне высоких плотностей теплового потока имеются ограниченные данные лишь одной работы (В.Н. Бочагов), но в ней не исследовалось влияние на минимальную плотность орошения температуры жидкости в пленке, кривизны обогреваемой поверхности.

Проводимые различными авторами попытки построения физических моделей процесса разрыва стекающей пленки (N. Zuber and F.W. Staub, A.H. Mariy et al., G.D. McPherson, F.F. Simon and Y.-Y. Hsu) не позволили провести обобщения имеющихся экспериментальных данных.

Обзор исследований скорости смачивания сухой, предварительно нагретой поверхности стекающей пленкой показал, что основной проблемой, которую необходимо решить при разработке расчетных методов определения скорости смачивания, является корректное задание граничных условий теплообмена на поверхности смачивания и условий, определяющих положение фронта смачивания. После этого задача расчета скорости смачивания сводится к решению уравнения теплопроводности для тела, поверхность которого смачивается, с заданными граничными условиями. Во всех опубликованных аналитических исследованиях и численных решениях (A. Yamanouchi, J.M. Blair, Тьен и Яо, M.E.W. Coney, T.S. Thompson и др.) использовались произвольно заданные законы распределения коэффициента теплоотдачи на поверхности (как правило, это предположение об отсутствии теплоотдачи на несмоченной поверхности и постоянный или меняющийся по степенному закону коэффициент теплоотдачи на смоченной поверхности) и произвольно заданные, постоянные значения температуры на границе между смоченной и несмоченной поверхностью – температуры, определяемой большинством авторов как температура Лейденфроста. Сопоставление получаемых расчетных зависимостей с экспериментальными результатами приводило некоторых авторов к завышенным значениям коэффициента теплоотдачи в смоченной области, достигающих величины (10^5 – 10^6) Вт/м^{2}гр.

Экспериментальные исследования скорости смачивания (G.L. Shires et al., A. Yamanouchi, T. Yoshioka et al., R.B. Duffey and D.T.G. Porthouse) ограничены – большинство из них проведено в области малых расходов жидкости в пленке и, как правило, в каждой из работ авторы исследовали влияние лишь 2 – 3 параметров, определяющих ско-

рость смачивания.

Анализ опубликованных работ по исследованию предельных условий существования пленки жидкости на обогреваемой поверхности показал, что имеющихся экспериментальных данных в диапазоне режимных параметров, соответствующих условиям эксплуатации канала регулирования ядерного реактора, недостаточно для разработки расчетных и, кроме того, отсутствуют физические модели рассматриваемых процессов, на основе которых можно было бы провести обобщение экспериментальных данных. В связи с этим были поставлены следующие задачи настоящего исследования:

а). Провести экспериментальное исследование условий возникновения "сухих пятен" в стекающей пленке жидкости в условиях обогрева:

- расширить исследованный диапазон значений плотности теплового потока в области, представляющей интерес для систем стержне-жидкостного регулирования -- области высоких тепловых потоков (более 10^4 Вт/м^2);
- исследовать влияние температуры жидкости, подаваемой на охлаждаемую поверхность;
- исследовать влияние кривизны обогреваемой поверхности.

б). Построить физическую модель процесса разрушения пленки в развитом турбулентно-волновом режиме стекания.

в). Разработать на основе модели методику, позволяющую рассчитывать условия возникновения разрывов в стекающей пленке.

г). Провести экспериментальное исследование скорости смачивания на рабочих участках, изготовленных из различных материалов, в широком диапазоне изменения режимных параметров - температуры сухой стенки, температуры и расхода подаваемой жидкости.

д). Разработать на основе этих исследований модель теплоотдачи к стекающей пленке жидкости в процессе смачивания.

е). Решить задачу определения скорости смачивания сухой, предварительно нагретой, вертикальной поверхности.

Во второй главе приводится описание экспериментальных стендов, на которых проводились исследования; методик проведения экспериментов и определения минимальной плотности орошения и скорости смачивания, а также проводится анализ погрешностей определения измеряемых величин.

Экспериментальный стенд для исследования минимальной плотности орошения состоит из: рабочего участка, системы обогрева, во-

дяного контура и системы измерений. Рабочий участок представляет собой вертикальную трубу диаметром 10, 15, 20 мм, с толщиной стенки 0,2 мм и длиной около 1 м, изготовленную из нержавеющей стали. В верхней части участка устанавливалось пленкообразующее устройство щелевого типа с шириной щели 1 мм и длиной 10 мм. На концах рабочего участка крепились токоподводы, через которые на участок подавалась электрическая нагрузка. Нагрев участка осуществлялся путем пропускания переменного электрического тока непосредственно по стенкам участка. Максимальная мощность системы электрообогрева составляет 25 кВт. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, которая под действием силы тяжести стекала тонкой пленкой по наружной поверхности рабочего участка. При проведении экспериментов по исследованию скорости смачивания сухой, горячей поверхности в экспериментальном стенде заменялись рабочий участок и система измерений. В качестве рабочего участка использовались трубы из нержавеющей стали и сплава циркония диаметром 12 мм, длиной 0,5 м, с толщиной стенки 1 мм.

Методика проведения экспериментов была следующей. При проведении исследований минимальной плотности орошения на рабочий участок подавалась жидкость фиксированной температуры, с расходом заведомо превышающим минимальную плотность орошения. После этого на участок подавалась постоянная нагрузка и расход жидкости постепенно снижался до момента возникновения "сухих пятен". При этом фиксировались: Γ_{min} – минимальная плотность орошения, при которой в стекающей пленке еще не возникало сухое пятно; Γ_1 – плотность орошения, при которой в пленке появлялось первое стабильное сухое пятно. Исследование было проведено в диапазонах режимных параметров: плотность теплового потока – $(1-30)\cdot10^4$ Вт/м^2; температура жидкости на входе на рабочий участок – 18–65°С; давление – атмосферное. При исследовании скорости перемещения фронта смачивания сначала на участок подавалась электрическая нагрузка, температура стенки повышалась до заданного уровня, после чего нагрузка отключалась (за исключением экспериментов, в которых исследовалось влияние на скорость смачивания тепловыделения в стенке) и в пленкообразователь в верхней части участка подавалась жидкость. На выходе из пленкообразователя формировался фронт смачивания, который постепенно перемещался вниз по наружной поверхности рабочего участка. Замер скорости смачивания

производился на измерительном участке длиной 100(200) мм, расположенном на расстоянии 150 мм от пленкообразователя. На поверхности измерительного участка, вдоль трех образующих, расположенных равномерно по периметру, крепилось три пары датчиков температуры (термоэлементов) на расстоянии, равном длине измерительного участка, друг от друга. Сигналы термоэлементов выводились на шлейфы осциллографа. При прохождении фронта смачивания через точку крепления термоэлемента, на осциллограмме имело место скачкообразное изменение сигнала и скорость перемещения фронта вдоль каждой из образующих определялась по расстоянию на осциллограмме между скачками сигналов термоэлементов, расположенных на этой образующей, и скорости протяжки светочувствительной ленты. Так как скорость распространения фронта, особенно при больших расходах жидкости в пленке, не остается постоянной во времени (при условии сохранения постоянства средней по периметру скорости смачивания), то в качестве скорости смачивания рассматривалось среднеарифметическое из трех измеренных значений скорости:

$$U = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} U_i = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} \frac{L \cdot W}{l_i} \qquad (I)$$

где L – длина измерительного участка, м; W – скорость протяжки светочувствительной ленты, м/с; l_i – расстояние на осциллограмме между скачками сигналов термоэлементов, расположенных на одной образующей. Такой метод определения скорости смачивания позволяет повысить точность измерения скорости по сравнению с используемым обычно (A.Yamanouchi, K.Yoshioka) методом замера скорости вдоль одной образующей.

Исследование скорости смачивания было проведено в диапазонах режимных параметров: температуры сухой стенки – 300–700°С; расхода жидкости в пленке – 0,21–1,6 кг/м·с; температуры подаваемой жидкости – 30–90°С; плотности теплового потока – 0 и $1{,}7 \cdot 10^4$ Вт/м^2; давление – атмосферное.

В процессе экспериментов было установлено, что при длительной работе на одном рабочем участке происходит значительное увеличение скорости смачивания, что было связано с влиянием образующегося на поверхности участка слоя окислов. Поэтому эксперименты проводились небольшими сериями, после которых участок шлифовался для удаления окисной пленки.

Максимальная среднеквадратичная погрешность измерения величин составляла: минимальной плотности орошения – ±11,7%; плотно-

сти теплового потока -±3,3%; скорости перемещения фронта смачивания - ±17%; температуры сухой стенки - ±3,2%.

В третьей главе излагаются результаты экспериментальных исследований минимальной плотности орошения и скорости перемещения фронта смачивания.

В работе исследовалось влияние на минимальную плотность орошения плотности теплового потока и температуры жидкости в пленке. Прежде всего, необходимо отметить, что результаты экспериментов свидетельствуют об отсутствии влияния на минимальную плотность орошения кривизны поверхности обогреваемого участка - изменение диаметра рабочего участка в два раза не отразилось на значениях Γ_{min}. Типичные экспериментальные результаты могут быть описаны следующим образом. В зависимости минимальной плотности теплового потока различаются две характерные области. В первой области (низкие плотности теплового потока - $q \leq 10^5$ Вт/м^2) Γ_{min} резко увеличивается с ростом q. Во второй области ($q > 10^5$ Вт/м^2) - Γ_{min} остается практически неизменной с ростом q, а при высоких температурах жидкости на входе (50-60°С) наблюдается некоторое снижение Γ_{min} при увеличении q. Таким образом, установлено, что для определенного значения температуры жидкости на входе существует некоторое предельное значение минимальной плотности орошения, выше которого обеспечивается устойчивое течение пленки в широком диапазоне плотностей теплового потока, вплоть до значений $3 \cdot 10^5$ Вт/м^2. Величина этого предельного значения снижается с ростом температуры жидкости на входе; так, если для $t_{вх}$ = 15-25°С (Γ_{min})$_{пр}$ = 0,7-0,75 кг/м·с, то для $t_{вх}$ = 45-50°С (Γ_{min})$_{пр}$ = 0,5-0,6 кг/м·с. Разрыв стекающей пленки в первой области происходил приблизительно на одинаковом расстоянии от входа - (0,4-0,8) м независимо от плотности теплового потока и температуры жидкости. Во второй области, в которой пленка начинала кипеть, разрыв обычно происходил вблизи границы между кипящей и некипящей пленкой, но в зоне некипящей пленки и с ростом плотности теплового потока сечение разрыва перемещалось ближе ко входу. В зоне кипящей пленки разрывов не наблюдалось. Анализ действительных значений температуры жидкости в сечении, где возникает сухое пятно, показал, что разрыв пленки может происходить в широком диапазоне вплоть до значений, близких к температуре насыщения (90-95°С).

Увеличение температуры жидкости как на входе, так и в сече-

нии разрыва ведет к снижению минимальной плотности орошения и, соответственно, к повышению устойчивости пленочного течения.

При проведении экспериментов по смачиванию сухой, предварительно нагретой поверхности исследовалось влияние на скорость распространения фронта смачивания температуры сухой поверхности, расхода и температуры жидкости в пленке и материала стенки рабочего участка. Было установлено, что снижение температуры сухой стенки, увеличение расхода жидкости в пленке и уменьшение ее температуры ведут к значительному увеличению скорости распространения фронта смачивания. Рабочий участок, изготовленный из сплава циркония, смачивается примерно в два раза быстрее рабочего участка из нержавеющей стали таких же геометрических размеров и при тех же режимных параметрах. Было показано, что умеренное энерговыделение в стенках участка ($Q_v = 1{,}7 \cdot 10^4$ Вт/м^3) не приводит к изменению скорости смачивания в случае одинаковой температуры сухой стенки непосредственно перед фронтом смачивания.

Было проведено исследование влияния на скорость смачивания состояния поверхности, которое менялось в процессе эксперимента за счет образования окисного слоя. Установлено, что наличие слоя окислов на поверхности рабочего участка увеличивает скорость перемещения фронта смачивания, однако это влияние наблюдается в определенной области изменения режимных параметров. Так, при температуре подаваемой жидкости равной 50°С разница между скоростью смачивания на чистой поверхности и поверхности со слоем окислов наблюдается при расходах $\Gamma < 1$ кг/м·с и увеличивается с уменьшением расхода, а при $\Gamma \geq 1$ кг/м·с все данные совпадают. При $t_ж = 30^oC$ данные для чистой и окисленной поверхности совпадают практически во всем исследованном диапазоне расходов. А при $t_ж = 70^oC$ разница имеется во всем диапазоне расходов, однако при увеличении расхода эта разница уменьшается.

В четвертой главе описывается физическая модель процесса возникновения разрывов в стекающей пленке жидкости в условиях обогрева; приводится упрощенное решение задачи термокапиллярного разрыва пленки. Проводится критериальный анализ и обобщение экспериментальных данных по условиям возникновения разрывов в пленке.

Предлагается модель процесса, основанная на предположении о термокапиллярной причине возникновения разрывов и разработан-

ная применительно к условиям развитого турбулентно-волнового режима стекания пленки. В этом режиме, за счет волнообразования на поверхности пленки, формируется пленочное течение, при котором часть расхода жидкости переносится в крупных, катящихся волнах, между которыми существует относительно тонкая пленка жидкости - так называемый непрерывный слой. Толщина непрерывного слоя может быть достаточно мала для ламинеризации течения жидкости в нем, в связи с чем появляется возможность проявления термокапиллярных эффектов и, соответственно, возможность разрыва непрерывного слоя.

Разрыв пленки произойдет в случае обеспечения двух условий:
I) течение жидкости в непрерывном слое должно быть ламинарным, т. е.

$$Re_{\delta_н} \leq Re_п \,, \qquad (2)$$

где $Re_{\delta_н} = \frac{g\delta_н^3}{3\nu^2}$ - число Рейнольдса пленки, рассчитанное по толщине непрерывного слоя $\delta_н$; $Re_п$= 200-400 - число Рейнольдса, при котором происходит переход режима течения в пленке от ламинарного к турбулентному;
2) время прогрева $\tau_{пр}$ плюс время термокапиллярной деформации пленки в непрерывном слое - $\tau_{кр}$ должно быть меньше времени межпрохождением через рассматриваемое сечение двух последовательно идущих крупных волн, т.е.

$$\tau_{пр} + \tau_{кр} < \frac{1}{\omega} \,, \qquad (3)$$

где ω - частота следования крупных волн.

Для определения $\tau_{кр}$ решалась задача деформации во времени, под действием термокапиллярных сил, капиллярной синусоидальной волны на поверхности непрерывного слоя. Задача решалась в системе координат, перемещающейся вместе со впадиной капиллярной волны, при следующих предположениях. Рассматривалось только вторичное движение жидкости, вызываемое касательным напряжением на поверхности пленки, равным градиенту поверхностного натяжением; при решении уравнения энергии пренебрегалось конвективным переносом тепла в пленке; скорость термокапиллярного движения определялась в каждый момент времени величиной касательного напряжения на свободной поверхности пленки и предполагалась линейность профиля этой скорости по толщине пленки. В результате было получено следующее выражение для $\tau_{кр}$:

$$\tau_{кр} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda_{во}^2}{\alpha_{во}(1-\alpha_{во})} \cdot \frac{\lambda_м}{q} \cdot \frac{d\delta/dt}{\delta_н} \cdot \frac{\delta_н - \delta_{кр}}{\delta_н} \,. \qquad (4)$$

Величина комплекса $\lambda_{80}^2/a_{60}(1-a_{80})$ определялась эмпирически и была равной $2{,}5\cdot10^4$. Для этого значения комплекса расчет по уравнению (4) и равенству (3) удовлетворительно описывает экспериментальные данные по Γ_{min} при $q_1 \leq 10^5$ Вт/м^2. При $q_1 > 10^5$ Вт/м^2 величина Γ_{min} хорошо согласуется с расчетом по равенству (2).

Был проведен критериальный анализ системы уравнений, описывающей термокапиллярные процессы в стекающей пленке. На основе анализа получены критериальные зависимости следующего вида:

– для ламинарного режима стекания:

$$Re_{min} = C\cdot\left[\frac{q\cdot d\sigma/dt}{\lambda\rho g(\nu^2/g)^{1/3}}\right]^n\cdot Pr^m\cdot\left[\frac{L}{(\nu^2/g)^{1/3}}\right]^k; \qquad (5)$$

– для турбулентного режима стекания:

$$Re_{min} = C\cdot\left[\frac{q\cdot d\sigma/dt}{\lambda\rho g(\nu^2/g)^{1/3}}\right]^n\cdot Pr^m. \qquad (6)$$

При обработке экспериментальных данных настоящей работы и результатов других авторов выявлены четыре характерные диапазона режимных параметров, для каждого из которых коэффициенты в зависимостях (5) и (6) оставались постоянными:

№	Диапазон	Уравнение	C	n	m	k
I	$Re \leq 25$	(5)	$2{,}3\cdot10^{-3}$	0,65	0,35	I,0
2	$25<Re\leq300$	(5)	$4{,}5\cdot10^{-2}$	I,7	I,5	I,25
3	$300<Re\leq$ 700	(6)	2I7	0,47	-0,I6	0
4	$Re>700$ $\frac{q\cdot d\sigma/dt}{\lambda\rho g(\nu^2/g)^{1/3}}>50$	(6)	850	0	0	0

В диапазоне 3 для обобщения данных использовалась зависимость, предложенная T.Fujita, T.Ueda. В диапазонах 3 и 4 экспериментальные данные лучше описываются с помощью описанной выше модели.

В пятой главе формулируется физическая модель теплоотдачи при смачивании сухой, горячей поверхности стекающей пленкой жидкости и описывается алгоритм численного решения задачи распространения фронта смачивания. Проводится сопоставление расчетных значений скорости смачивания с экспериментальными.

Предлагается модель теплоотдачи, основанная на предположении о преобладающем конвективном переносе тепла в пленке непосредственно за фронтом смачивания, при условии сохранения высоких значений перегрева поверхности стенки и пристенных слоев

жидкости относительно температуры насыщения; а вскипание перегретого, пристенного слоя жидкости и переход к пленочному кипению происходит непосредственно во фронте смачивания. Перед фронтом идет теплоотвод от сухой стенки к пару, возникающему при вскипании жидкости во фронте смачивания. Вся поверхность стенки в направлении движения фронта смачивания разбивается, по условиям теплоотвода с поверхности, на три зоны. Первая зона ($X>X_0$) – теплоотвод конвекцией к стекающей пленке. Вторая зона ($0<X<X_0$) – теплоотвод теплопроводностью через пристенный микрослой, расположенный в непосредственной близости от фронта и определяемый величиной контактного угла смачивания θ_0. Третья зона ($X<0$) – теплоотвод конвекцией к пару.

В смоченной области решалась квазистационарная сопряженная задача теплопроводности в стенке и конвективного переноса тепла в пленке жидкости в системе координат, перемещающейся вместе с фронтом смачивания:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{ст}\frac{\partial t_{ст}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{ст}\frac{\partial t_{ст}}{\partial y}\right)+(c\rho)_{ст}U\frac{\partial t_{ст}}{\partial x}=0; \qquad (7)$$

$$(u_ж-U)\frac{\partial t_ж}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial y}\left(a_{эфф}\frac{\partial t_ж}{\partial y}\right); \qquad (8)$$

с граничными условиями

$$x\to\infty,\ t_{ст}\to t_{жо};\ t_ж\to t_{жо}; \qquad (9)$$

$$x\to-\infty,\ t_{ст}\to t_{сто}; \qquad (10)$$

$$y=\delta_{пл},\ \frac{\partial t_ж}{\partial y}=0;\qquad y=-\delta_{ст},\ \frac{\partial t_{ст}}{\partial y}=0; \qquad (11)$$

$$y=0,\begin{cases} X>X_0,\ t_ж=t_{ст},\ \lambda_ж\frac{\partial t_ж}{\partial y}=\lambda_{ст}\frac{\partial t_{ст}}{\partial y}; & (12)\\ 0<X<X_0,\ \lambda_{ст}\frac{\partial t_{ст}}{\partial y}=\frac{\lambda_ж}{\delta_{мс}}(t_{ст}-t_{нас}); & (14)\\ X<0,\ \lambda_{ст}\frac{\partial t_{ст}}{\partial y}=\alpha_п(t_{ст}-t_{нас}). & (15)\end{cases}$$

Положение фронта смачивания ($X=0$) определялось условием динамического равновесия между набегающим потоком жидкости в пленке и реакцией пара, возникающего во фронте смачивания:

$$\int_0^{\delta_1}\frac{1}{2}\rho_ж(u_ж-U)^2dy=\int_0^{\delta_1}\frac{1}{2}\rho_п(W''+U)^2dy. \qquad (16)$$

В этом уравнении толщина пристенного слоя жидкости, на котором соблюдалось динамическое равновесие – δ_1, определялась по эмпирической зависимости:

$$\frac{\delta_1}{(\nu^2/g)^{1/3}} = \varphi \cdot Re, \qquad (17)$$

где φ – постоянная.

Скорость пара W'' определялась исходя из предположения о том, что на парообразование идет некоторая постоянная доля (ψ) энтальпии перегрева пристенного слоя жидкости относительно температуры насыщения.

Сформулированная задача решалась численно на ЭВМ в конечных разностях, с помощью специально разработанной программы. Результаты расчета при значениях коэффициентов: $\varphi = 4{,}85 \cdot 10^{-5}$, $\psi = 0{,}28$ удовлетворительно описывают экспериментальные данные настоящей работы, а также данные K. Yoshioka.

Было проведено расчетное исследование влияния толщины стенки на скорость смачивания. Установлено, что это влияние наблюдается лишь в области малых толщин стенки и при превышении толщиной стенки некоторой критической величины оно практически исчезает. Величина этой критической толщины зависит от режимных условий и в исследованных условиях она составляет 1–2 мм.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование минимальной плотности орошения стекающей по обогреваемой поверхности пленки жидкости, недогретой до температуры насыщения, в широком диапазоне режимных параметров ($q = (1{,}2\text{–}30) \cdot 10^4$ Вт/м^2; $t_{вх} = 16\text{–}65^\circ$C; $\Gamma = 0{,}2\text{–}0{,}75$ кг/м·с).
2. Установлено существование предельного значения минимальной плотности орошения, выше которой обеспечивается устойчивый, без разрывов, режим стекания жидкой пленки во всем диапазоне исследованных плотностей теплового потока, вплоть до значений $3 \cdot 10^5$ Вт/м^2.
3. Выявлено, что в условиях турбулентно-волнового режима стекания возникновение разрывов в пленке связано с развитием волнового движения поверхности пленки и происходит во впадинах больших волн. Построена физическая модель разрывов; сформулирована задача деформации пленки во впадине, приводящей к разрыву, и проведено упрощенное решение этой задачи, позволившее описать результаты эксперимента с точностью до эмпирического коэффициента.
4. На основе критериального анализа получена система критериев, описывающих условия возникновения "сухих пятен" в стекающей пленке. Выявлены четыре диапазона режимных параметров, для каждого из которых найден конкретный вид зависимости, описывающей с удовлет-

ворительной точностью данные настоящей работы и других авторов.
5. Проведено экспериментальное исследование скорости перемещения фронта смачивания по сухой, предварительно нагретой поверхности в диапазонах режимных параметров: $t_{ст}$ = 300-700°С; $t_{ж}$ = 30-90°С; Г = 0,25-1,65 кг/м·с.
6. Показано преобладающее влияние конвективного переноса в стекающей пленке в процессе теплоотвода от стенки за фронтом смачивания и сформулирована задача смачивания сухой горячей поверхности, базирующаяся на предположении о динамическом равновесии во фронте между набегающей жидкостью и паром, образующимся при вскипании жидкости во фронте.
7. Разработана программа и проведено численное решение на ЭВМ задачи перемещения фронта смачивания. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.
8. Результаты работы использованы при разработке системы стержнежидкостного регулирования, находящейся в пробной эксплуатации.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Г – плотность орошения; a – температуропроводность; L – длина рабочего участка; t – температура; q – плотность теплового потока; U – скорость смачивания; u – скорость жидкости в пленке; W'' – скорость пара; X – координата вдоль поверхности стенки; y – координата, перпендикулярная к поверхности стенки; $a_{во}$ – относительная амплитуда капиллярной волны; $a_п$ – коэффициент теплоотдачи к пару; δ – толщина; $\delta_{кр}$ – толщина, при которой происходит разрыв пленки в изотермических условиях; $\lambda_{во}$ – относительная длина капиллярной волны; σ – коэффициент поверхностного натяжения; Re – критерий Рейнольдса; $Pe = \frac{\Gamma}{\rho a}$ – критерий Пекле. Индексы: ст – стенка; ж – жидкость; пл – пленка; н – непрерывный слой; п – пар.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:
1. Ганчев Б.Г., Боков А.Е. Устойчивость гравитационного стекания пленки жидкости при больших тепловых потоках. – В кн.: Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации: Материалы XXI Сибирского теплофизического семинара. Октябрь, 1978, Новосибирск, 1979, с. 183-188.
2. Ганчев Б.Г., Боков А.Е. Исследование устойчивости течения пленки жидкости при больших тепловых потоках. – Тезисы докладов и сообщений VI Всесоюзной конф. по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов, Л., 1978, с. 184-186.

3. Ganchev B.G., Bokov A.E. Investigation of the thermocapillary induced breakdown of a wavy falling liquid film.- Proc. 6th Int. Symposium "Fresh Water from the Sea", 1978, Vol. 2, p. 77-83.
4. Ganchev B.G., Bokov A.E. Investigation of the rewetting of a hot dry vertical surface by a falling liquid film.- Proc. 7th Int. Symposium "Fresh Water from the Sea", 1980, Vol. 1, p. 215-219.
5. Ганчев Б.Г., Боков А.Е. Исследование термокапиллярной устойчивости при гравитационном стекании пленки жидкости.- Инж.-физич. журн., 1980, Т. 39, № 4, с. 581-591.

137385

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Л - 85633 от 13.I.81 г. Заказ 44 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005; Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5