Содержание

Введение 9

1. Обзор литературы 15

1.1 Гидродинамика мало масштабных газожидкостных течений при естественной циркуляции 16

1.1.1 Всплытие пузырей в покоящейся жидкости 16

1.1.2 Двухфазный поток в каналах 25

1.1.3 Течение пленки жидкости 3 3

1.2 Теплообмен при локальном тепловыделении 45

1.2.1 Влияние всплытия пузырей на теплообмен 45

1.2.2 Теплообмен в стекающей пленке жидкости 50

1.2.3 Кипение и кризис теплообмена в пленках жидкости и на локальных нагревателях 61

1.3 Экспериментальные методы РОССИЙСКАЯ 67

1.4 Постановка задач исследования Г\*ОСУДАРСТВЕННА>| 7 j

БИБЛИОТЕКА

2. Методика и техника эксперимента t г~ r~ s\ f\ a r 73

2.1 Описание экспериментальных установок Г\ 7 j J (J / ~~ L/ 0 ^ 2.1.1. Гидродинамика всплывающих пузырей т| 73

2.1.2 Оптический криостат П 77

2.1.3 Конвективный теплообмен при движении пузырей 79

2.1.4 Кипение и кризис на локальном нагревателе :" 80

2.1.5 Неизотермическое течение пленки жидкости 82 . 1.6 Гидродинамика и теплообмен в пленке жидкости на малых нагревателях 85

2.1.7 Рабочие участки с нагревателями среднего размера • 91

2.2 Методики и особенности исследований 99

2.2.1 Выбор рабочих жидкостей 99

2.2.2 Определение граничных условий, расчет поля температур в нагревателях 102

2.2.3 Контролирование равномерности пленок жидкости и расходов газовой фазы 113

2.2.4 Тарировочные эксперименты по теплообмену 115

2.2.5 Визуализация течения жидкости и поля температур 120

2.2.6 Определение и измерение среднемассовой температуры пленки жидкости 122

2.2.7 Контроль испарения на поверхности стекающей пленки жидкости • 126

2.2.8 Волоконно-оптический метод измерения толщины пленки

жидкости и регистрации двухфазной границы 129

2.2.9 Емкостный метод измерения толщины неизотермической пленки жидкости 133

2.3 Результаты главы 139

3. Гидродинамика всплытия пузырей 140

3.1 Влияние геометрии и положения каналов на движение пузырей 141

3.1.1 Всплытие пузырей в погруженных и выступающих каналах 141

3.1.2 Всплытие одиночных пузырей в неограниченном объеме жидкости и

тупиковых цилиндрических каналах 144 3.1.3 Всплытие пузырей в циркуляционных системах. Сравнение и анализ

скоростей движения 153

3.2 Моделирование и анализ всплытия одиночных пузырей в неограниченном объеме жидкости и тупиковых цилиндрических каналах 157

3.2.1 Постановка задачи и анализ размерности 157

3.2.2 Неограниченный объем 159

3.2.3 Влияние стенок канала 165

3.3 Моделирование течения в погруженных каналах при движении пузырей 170

3.4 Результаты главы 177

4. Интенсификация теплообмена в двухфазных системах с естественной циркуляцией 179

4.1 Конвективный теплообмен при движении пузырей в прямоугольных погруженных каналах. 179

4.2 Модель конвективного теплообмена при движении пузырей в прямоугольных погруженных каналах ¦ 185

4.3 Исследование теплообмена и кризиса при кипении диэлектрических жидкостей на нагревателях малых размеров в вертикальных каналах 196

4.4 Результаты главы ^ 201

5. Формирование струйных течений при движении пленки жидкости по неизотермическим поверхностям 202

5.1. Режимы течения пленок жидкости 202

5.1.1 Течение пленок по нагревателям средних размеров '. 202

5.1.2 Изменение волнового .течения на поверхности пленки 219

5.1.3 Течение пленок по нагревателям малых размеров 224

5.2. Формирование струй ^ 227

5.2.1 Трехмерные неоднородности на поверхности пленки жидкости 227

5.2.2 Длина волны возмущений и расстояние между струями 227

5.2.3 Градиенты температуры и термокапиллярные касательные напряжения на поверхности пленки воды 235

5.2.4 Измерение толщины пленки жидкости и волновых характеристик при формировании струй 238

5.2.5 Влияние, внешних возмущений, испарения и угла наклона - 244

5.3 Анализ, сравнение и обобщение опытных данных 251

5.3.1. Механизмы влияния термокапиллярных сил на гидродинамику стекающей пленки жидкости 251

5.3.2. Обобщение опытных данных 257

5.4 Результаты главы . . 266

6. Теплообмен в стекающей пленке жидкости 268

6.1 Режимы теплообмена 268

6.1.1 Течение пленок FC-72 и воды по нагревателю 150x150 мм 268

6.1.2 Течение пленок воды и FC-72 по нагревателю 60x120 мм 271

6.1.3 Режимы теплообмена при течении пленок МД-ЗФ по

нагревателю 6.5x1 Змм , 275

6.1.4 Режимы теплообмена при течении пленок МД-ЗФ по нагревателю

размером 2.22x68 мм 278

6.1.5 Характеристики и особенности основных режимов теплообмена 279

6.2 Основные параметры и критерии, характеризующие теплообмен в

пленке жидкости 281

6.2.1 Сравнение с известными зависимостями 281

6.2.2 Основные факторы, влияющие на теплообмен в пленке 285 6.2.2 Безразмерные критерии. Область их влияния 288

6.3 Теплообмен в гладкой пленке жидкости 291

6.3.1 Теплообмен в пленке жидкости, стекающей по нагревателю 150x150 мм 291

6.3.2 Теплообмен в пленке жидкости, стекающей по нагревателям

малого размера 293

6.3.3 Моделирование влияния термокапиллярных сил на теплообмен

в стекающей пленке жидкости 294

6.4 Теплоотдача к пленке жидкости с трехмерными деформациями 298

6.4.1 Локальный теплообмен 298

6.4.2 Условно локальный теплообмен 302

6.4.3 Осредненный теплообмен 304

6.5 Результаты главы 318

Выводы 319

Список литературы . 321

4 Список обозначений

g

а - коэффициент температуропроводности, м2/с

А — относительная безразмерная амплитуда волн = (hmax~ hmj/h

А„ог — ширина сопла, м

( о\* W V'2

Аг\*— модифицированное число Архимеда = ——- ———

vspy ) {p-pJ

А,С, К- константы

Ъ - ширина канала, ширина пузыря, м

В - ширина нагревателя, м

Bi - число Био = ashlZ

Во — число Бонда = pgBo2/cr

с — теплоемкость жидкости, Дж/(кг К), фазовая скорость волн, м/с

с-изобарная теплоемкость, Дж/(кг К)

С — емкость электрическая, мкФ

Са — капиллярное число = цХЛст

CD— коэффициент сопротивления = 8 U2/(3gR)

D — диаметр, м

Def-критерий деформации пленки = (h^-h^/ho,

Dh— гидравлический диаметр, м

d - диаметр пузыря, м

dm— расстояние между центрами термопар, м

е,д— степень деформации пузыря = (b-hff/b

Ео — число Этвиша = pgD2/a

/- частота следования пузырей, волн, 1/с, определяемый параметр

F— коэффициент сопротивления трения

Fi - пленочное число, число Капицы = c?/g rfp1

Fr - число Фруда = U2/gR

g - ускорение свободного падения, м/с2

G — массовый расход, кг/ с

Ga - число Галилея = gtf/v2

Gr —число Грасгофа = Rax/Pr

h — толщина канала, пленки, м

h0 — начальная толщина пленки = /^(3Re)1/3, м

hb — вертикальный размер пузыря, м

hnoz — толщина зазора сопла, м

Н- вертикальная дистанция, м

I - сила электрического тока, А

к - безразмерное волновое число = 2пЫЛ

К- критерий Кутателадзе = г/(срАТ), - кривизна поверхности, 1/м

Ка - число Капицы = d\*/g j^/t5

Km - безразмерный параметр = -qcrjl(cp f3

Km\* - безразмерный параметр = KmL/l

Кр - критерий разрыва = - tf\*y

Кг- безразмерный параметр =

I - размер, м

L - высота нагревателя, м

Lb - длина начального участка теплообмена, м

L — высота канала, м

lo - капиллярная постоянная = [o/(p-pvg)g]in, м

/ — масштаб вязко-гравитационного, взаимодействия = (y?/g)m, м

/w— размер между возмущающими штырями, м

М — число Мортона =1/ Fi

Мп - число Марангони = (да/дТ)(дТ/ду)к

2

М\*, Ма — модифицированные числа Марангони

Мв- масса воздуха, г

Мт— масса паров, .г

т — показатель степени

та— молекулярный вес воздуха

тт—молекулярный вес пара

N,,r — число структур на нагревателе

п - показатель степени, безразмерный, единичный вектор

Nu — число Нуссельта — ah/Л

Nud — число Нуссельта построенное по гидравлическому диаметру = aAh/Л

NuF — число Нуссельта = af hf Др

Nu\*F - число Нуссельта = aplvF IAf j — приведенная скорость, м/с Ja - число Якоба = сАТр/ (rlvpj Р,р — давление, Па ра — атмосферное давление, Н/м2 Р„ — смоченный периметр, м Ps - число Пуазейля = pU/(gpR2) Ре — число Пекле = DU/a Рг - число Прандтля = v /а—рср IЯ

Rax— число Релея —x4g/5q/(z. va) r

q — плотность теплового потока, Вт/м2 (Вт/см2)

qA— плотность теплового потока, при которой происходит формирование структур в режиме

А, Вт/см2

qbd— плотность теплового потока, при которой происходит разрыв пленки, Вт/м2 (Вт/см2)

q — критическая плотность теплового потока, Вт/м2 (Вт/см2)

qt — локальная плотность теплового потока, Вт/м2 (Вт/см2)

qrol — плотность теплового потока, при которой заканчивается формирование

горизонтального вала жидкости вдоль верхней кромки нагревателя Вт/см2.

qs — плотность теплового потока, расходуемая на испарение жидкости, Вт/см2

Q — тепловая мощность, выделенная на нагревателе = IU, Вт

Qg - объемный расход газа, м3/с (

Q, - объемный расход жидкости, м3/с

Re - число Рейнольдса = DU/v = 17//

R2- степень корреляции (стандартная функция пакета программы EXCEL)

rlv — скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг

г - текущий радиус, м

R - радиус, м

RT— внутренний радиус трубы, м

Rb - эквивалентный радиус пузыря = (4\73л)|/3, м

Rg - универсальная газовая постоянная = 8.3 Дж/(моль К)

Ra - безразмерный радиус пузыря = RJla i

Rv — безразмерный радиус пузыря = RJlv

S— площадь сечения канала, м2

Sk — площадь нагревателя, м2

t — время, с

tb - время прохождения пузыря через данную точку на нагревателе, с

tc — время прохождения пузыря через канал, с

/\* — время прохождения жидкости от начала нагревателя до заданной точки у\*, с

Г-температура, °С

Та - температура газа в дали от поверхности пленки, °С

То — начальная температура натекающей жидкости, °С

Тр— среднемассовая температура пленки =Г0 + qXJ(CpT), °C

T\*F— среднемассовая температура пленки, при неравномерном q,°C

Тм — температура мокрого термометра, °С

Ts — температура насыщения, °С

Tsur — температура поверхности пленки, °С

Tw — температура поверхности нагревателя, °С

Г«- температура жидкости вдали от поверхности нагрева, °С

ATF - разность температур = TyyTF, К

ЛТ0 — полный температурный напор = Туу-Тд, К

AThc — перепад температуры поперек нагревателя, измеренный термопарами, К

U — скорость, м/с, электрическое напряжение, В

U, — скорость жидкости, м/с ; \*\*

Ub — скорость пузыря, м/с

Uret - скорость пузыря относительно жидкости, м/с

и - распределение скорости жидкости, м/с

V— объем пузыря, м3

Vm—измеряемый объем, м3

W— ширина, м, мощность, Вт

We — число Вебера = pU2D/cr

u,v, w — компоненты скорости в направлении х, у, z соответственно, м/с

х, X— расстояние от нижней кромки нагревателя, м

хм-весовая концентрация =ММ/(ММ +Ма1Г)

Xt — расстояние от верхней кромки нагревателя, м

Хп — расстояние от сопла пленкоформирователя до верхней кромки нагревателя, м

х, у, z — декартовы координаты, м

Греческие символы

а- коэффициент теплоотдачи, Вт/м2К

а0, aav- средний коэффициент теплоотдачи = q/AT0, Вт/м2К

ас- коэффициент теплоотдачи при конвекции = ql(Tw-Ta), Вт/м2К

aF — коэффициент теплоотдачи = q/ATF, Вт/м2К

aNus— расчетное значение среднего коэффициента теплоотдачи, Вт/м2К

а,- коэффициент теплоотдачи с поверхности пленки =qj( Tsur —TJ, Вт/м2К \*

asur— локальный коэффициент теплоотдачи =q/(Tw—Tsur), Вт/м2К

а,, ах — локальный коэффициент теплоотдачи, Вт/м2К

аср— среднее значение коэффициента теплоотдачи по всему массиву данных, Вт/м2К

/3— коэффициент объемного расширения, К"1, краевой угол, град

Г — удельный массовый расход жидкости, кг/мс

Гу— удельный объемный расход жидкости, м2/с

д- толщина пленки, зазора, м

6Н — толщина начального гидродинамического слоя, м

8

«^•—толщина теплового слоя , м е — диэлектрическая проницаемость е — малый параметр <р, ф - газосодержание в жидкости

к — отношение эквивалентного радиуса пузыря к внутреннему радиусу трубы = Rb /RT Л. — теплопроводность жидкости, Вт/мК Л - расстояние между гребнями струй, м ju — динамическая вязкость жидкости, кг/мс v - кинематическая вязкость жидкости, м2/с 0- угол наклона пластины, град в — безразмерная температура сг — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м

сгт- производная коэффициента поверхностного натяжения по температуре = сг/Т, Н/ мК т — безразмерное время = t/x0 т0 — период следования пузырей, с г— касательное напряжение, Н/ м2 р— плотность жидкости, кг/м3 /7^ - плотность парогазовой смеси, кг/м3 V — функция тока со — завихренность

i2 — тепловой фактор, отношение плотности теплового потока, идущего на испарение к плотности теплового потока от нагревателя к пленке жидкости =g/q, граница всплывающего пузыря

Индексы

av - среднее значение Ъ — пузырь с — канал сг — кризис

/ — жидкость, локальная величина

max — максимальное значение

min — минимальное значение

F— величина, рассчитанная для среднемассовой температуры

sub — недогрев

sur —поверхность

Т - труба, турбулентный

V —пар

vg — парогазовая смесь

W — стена, волновой

О — величина, рассчитанная при начальных параметрах течения

кр — кризис

Введение.

Постановка проблемы и ее актуальность.

Основаниями данной работы стали как чисто фундаментальные проблемы (динамика движения одиночных газовых образований, капиллярные эффекты при взаимодействии пузырей со стенками каналов, термокапиллярные эффекты при локальном нагреве пленки, неустойчивость течения пленки жидкости и формирование струй на ее поверхности), так и научно-технические проблемы (интенсификация теплообмена, охлаждение и термостабилизация).

Исследовались течения с естественной циркуляцией, вызванные действием гравитации. В работе рассматриваются газожидкостные потоки с характерным масштабом, занимающим промежуточное значение между широко используемыми в энергетике и технике течениями с внутренней и внешней сторон протяженных труб, как правило, длиной несколько метров и диаметром 40-200 мм и течениями в микроканалах, имеющими характерный поперечный размер менее 0.2 мм, применяемыми в микроэлектронике, медицине, криогенной и холодильной технике. Минимасштабность (соизмеримость геометрических масштабов, в направлении поперечном основному течению, с внутренними масштабами газожидкостных систем (Кутателадзе, 1982)) приводит к рассмотрению газожидкостных 1потоков»';с выделенными и локализованными фазами (одиночные пузыри, пленки, струи).

Исследовались течения в непротяженных каналах и на поверхностях, длиной, как правило, менее 0.5 метра, что в некоторых случаях приводило к необходимости учета начального участка течения жидкости. Использование нагревательных элементов относительно малого размера было вызвано, как необходимостью моделировать отвод тепла от элементов микроэлектроники, так и желанием создать максимальные \ температурные градиенты, недостижимые на протяженных нагревателях. При этом становилось существенным влияние начального теплового участка.

Особенностью исследований было изучение процессов при малых числах Рейнольдса (Re<1000). Поэтому в работе рассматриваются в основном ламинарные течения.

Экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамики всплытия пузырей в погруженных и тупиковых каналах разной конфигурации важно для понимания механизма влияния жесткой границы и условий организации течения в каналах на форму и динамику замкнутых газовых образований. Переход от пузырькового к снарядному и пленочному (кольцевому) течениям при кипении и испарении сопровождается сложным влиянием капиллярных сил, вызывающих перестройку течений. При движении пузырей вблизи твердой стенки с локальным нагревателем существенными становятся нестационарные эффекты, вызванные создаваемыми пузырями возмущениями. При локальном нагреве пленки жидкости возникают значительные поверхностные градиенты температуры, приводящие к термокапиллярным эффектам, вызывающим образование устойчивых регулярных структур (Кабов, 1994, 1999), исследование которых имеет фундаментальное значение.

Актуальность проводимых исследований определялась необходимостью охлаждения микроэлектронного оборудования, интенсификации теплообмена на

сложных структурированных поверхностях при выпаривании и конденсации, а также необходимостью совершенствования компактных теплообменников.

Исследования теплообмена в испарительно-конденсационных системах термостабилизации микроэлектронного оборудования проводятся в лаборатории Интенсификации процессов теплообмена с 1988 г. В 1988-1993 гг. основное внимание было сосредоточено на исследовании гидродинамики и механизма теплообмена в элементах систем охлаждения Супер-ЭВМ. Анализ существующих подходов и методов к этой проблеме содержится в работе (Kabov, Chinnov et al., 1993).

Среди большого класса систем охлаждения микроэлектронного оборудования выделяются два типа систем охлаждения: погружные и пленочные. В отличие от многих других систем, например с разветвленной схемой вынужденного движения жидкости, которые были нацелены на охлаждение Супер-ЭВМ, эти два типа в большей степени сохранили свою актуальность и могут быть использованы также для охлаждения отдельных наиболее энергонапряженных электронных блоков и модулей. В последнее время в связи с ростом быстродействия персональных ЭВМ становится актуальным использование жидкостных систем для охлаждения процессоров.

В погружных системах охлаждения отвод тепла от локального источника происходит в заполненных жидкостью камерах за счет естественной конвекции. На наиболее теплонапряженных участках возможно кипение жидкости и кризис теплоотдачи. Интенсивность теплоотдачи лимитируется кризисом теплоотдачи. В конвективной области и в начальной стадии кипения может значительно возрастать перегрев поверхности нагрева. Поэтому важным является изучение кипения и кризиса теплоотдачи на нагревателях малого размера, гидродинамики движения газовых пузырей в погруженных каналах и влияния газовых пузырей на интенсификацию теплообмена от локальных нагревателей.

Охлаждение больших интегральных схем с помощью стекающих пленок жидкости, также является актуальным, так как имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием естественной и вынужденной конвекции к однофазной, жидкости, кипения и натекающих струй. В рассматриваемых вариантах пленочных систем охлаждения микроэлектронного оборудования, опубликованных в работах: (Agonafer. et al., 1968), (Mudawwar et al., 1987) и (Kabov et al., 1995), жидкость стекает под действием гравитации по вертикально расположенным печатным платам с чипами. Передача тепла возможна как при испарении или кипении, так и при конвективном теплообмене к недогретой до температуры насыщения пленке жидкости. Толщина стекающей пленки диэлектрической жидкости составляет порядка 0.1-1.5 мм, что позволяет использовать в системе охлаждения малое количество жидкости. Конвективный теплообмен в тонкой пленке обеспечивает достаточно высокий коэффициент теплоотдачи. На поверхности теплообмена отсутствуют пульсации давления и температуры, характерные для кипения жидкости.

Процессы в тонких пленках жидкости широко используются в испарительно-конденсационных системах, так как обеспечивают высокую интенсивность процессов тепло-массопереноса и значительную поверхность контакта фаз при малых удельных расходах. Гравитационно стекающие пленки применяются в испарителях низкого давления при концентрировании пищевых продуктов, в аппаратах для опреснения морской воды и в ректификационных колоннах. Интенсивность теплоотдачи при испарении возрастает с уменьшением толщины пленки жидкости, но использование слишком тонких пленок жидкости недопустимо в силу повышения вероятности ее разрыва и возникновения кризиса теплоотдачи. Стекающие пленки подвержены

волновым процессам, вызванным \_ их неустойчивостью, что приводит к неравномерному орошению и протяженным участкам тонкой пленки с ламинарным течением при' достаточно больших средних расходах жидкости. Исследования нагрева пленок при малых числах Рейнольдса (Re<2) крайне малочисленны. Основной задачей совершенствования испарителей низкого давления является интенсификация процессов тепло-массообмена и повышение устойчивости стекающих пленок к разрывам. Особенностью стекания пленок по негладким поверхностям является неоднородность их нагрева. Неоднородность нагрева жидкости также имеет место при волновом движении пленок. Неравномерность плотности теплового потока к стекающей по внутренней поверхности гладкой трубы пленке может быть вызвана оребрением наружной поверхности для интенсификации теплоотдачи. На практике ребра могут иметь разный размер и расположение. Поэтому важно исследовать влияние размеров тепловыделяющих элементов на гидродинамику и теплообмен.

Основные понятия и факторы, влияющие на процесс.

Определим основное понятие, используемое в данной работе, мало масштабные газожидкостные течения. Все известные газожидкостные течения можно разбить на три класса:

- крупномасштабные, когда характерный поперечный основному течению размер более десяти капиллярных постоянных $ •\*<

- микромасштабные, когда характерный поперечный основному течению размер менее десятой части капиллярной постоянной

- и маломасштабные 0.1 1а<В<№ 1№

Ограниченность по рассматриваемым числам Рейнольдса приводит к следующим ограничениям для маломасштабных течений В<501уи к<\Ыу. Кроме того, в маломасштабных газожидкостных течениях, существенным будет влияние начальных гидродинамических и тепловых участков. ... у

Наиболее важными характеристиками рассматриваемых процессов являются поверхностные силы, оказывающие определяющее воздействие на поведение межфазной границы в условиях относительно слабых динамических эффектов. Поверхностные силы традиционно делятся на действующие по нормали к поверхности (лапласовское давление) и по касательной (силы определяемые градиентом коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности). В свою очередь касательные напряжения, определяемые градиентом коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности, могут возникать в результате действия трех основных факторов: влияния поверхностно-активных веществ, изменения коэффициента поверхностного натяжения в многокомпонентных жидкостях за счет изменения концентрации одного из компонент вблизи поверхности раздела и в результате зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры. Первые два в данной работе не рассматриваются. Более того, предпринимались действия для устранения их возможного влияния.

Целью работы является исследование гидродинамики и теплообмена в ламинарных минимасштабных естественно циркуляционных пузырьковых и пленочных течениях при влиянии капиллярных и термокапиллярных эффектов, раскрытие механизмов и изучение основных закономерностей рассматриваемых явлений.

Научная новизна работы заключается в том, что автором впервые:

Выполнены систематические исследования гидродинамики всплытия пузырей в погруженных и тупиковых каналах. Изучено влияние стенок канала на форму и скорость всплытия пузырей в широком диапазоне изменения параметров.

В результате специально выполненных экспериментов и ' сопоставления с численными расчетами определены границы режимов всплытия пузырей с разной формой в неограниченном объеме жидкости. Определены границы перехода к области неустойчивого спиралевидного движения пузырей. Детально исследован переход от пузырькового к снарядному движению пузырей в каналах. Данные по деформации и образованию вихревых течений жидкости за пузырем сопоставлены с численными расчетами.

Для обобщения и анализа опытных данных по всплытию пузырей предложено использовать новый тип диаграмм с безразмерными координатами. При моделировании движения пузырей в погруженных каналах учтено влияние начального гидродинамического участка. Получены обобщающие и модельные зависимости для определения скоростей всплытия пузырей в различных условиях.

Выполнены систематические исследования конвективного теплообмена при всплытии пузырей в погруженных прямоугольных каналах разной формы. Тщательно контролировались параметры газожидкостного потока (размеры пузырей и их идентичность, дистанции между пузырями). Интенсивность теплоотдачи измерялась в разных точках по высоте нагревательного элемента в канале, что позволило получить информацию о влиянии вплывающих пузырей на теплообмен в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Для описания интенсификации теплообмена в погруженных каналах предложена теоретическая модель; учитывающая как нестационарный характер процесса (влияние частоты следования пузырей, времен движения пузыря в канале и вблизи поверхности нагрева), так и влияние усредненных стационарных характеристик (наведенной циркуляции жидкости в канале и теплообмена на начальном участке канала).

Исследовано формирование регулярных струй при течении пленки жидкости с двухмерными и трехмерными волнами. Выделены области внезапного возникновения устойчивых регулярных структур на поверхности гладкой пленки жидкости и формирования струй при распаде двумерных волн на трехмерные или по гребням трехмерных волн.

Исследованы различные режимы влияния плотности теплового потока и числа Рейнольдса пленки на расстояние между струями. В результате анализа экспериментального материала показано, что имеет место \* два механизма формирования струй - термокапиллярный и термокапиллярно-волновой.

Показано, что при термокапиллярно-волновом механизме струи формируются на неоднородностях в толщине пленки. С увеличением плотности теплового потока пленка жидкости в межструйной области становится более гладкой, амплитуда волн и пульсаций температуры уменьшается. Трехмерные волны распространяются по гребням струй. С ростом теплового потока толщина пленки и амплитуда волн увеличиваются. Определяющим является изменение толщины пленки под действием термокапиллярных сил при формировании струй. Амплитуда волны подстраивается под это изменение в соответствии с увеличением толщины пленки (фокального числа Рейнольдса).

Показано, что искусственные механические и температурные возмущения нагреваемой пленки жидкости, варьирование длины пробега пленки и интенсивности испарения позволяют изменить длину волны неустойчивости только в узком диапазоне, соответствующем области, в которой проявляются закономерности термокапиллярного и термокапиллярно-волнового механизмов формирования струй. Установлено, что границы этой области консервативны в отношении внешних факторов, а безразмерная длина волны неустойчивости определяется числом Рейнольдса пленки и модифицированным числом Марангони.

Обнаружено влияние длины нагревателя на величину плотности теплового потока, при которой происходит формирование структур. Выполнено обобщение опытных данных по формированию структур и разрыву пленки с учетом влияния испарения.

Экспериментально показано, что термокапиллярные силы приводят к снижению интенсивности среднего стабилизированного конвективного теплообмена при течении двумерной пленки жидкости и формировании струй.

Выполнено исследование локального теплообмена. Измерено распределение температур на поверхности трехмерной волновой пленки жидкости при формировании струй. Обнаружено увеличение локального коэффициента теплоотдачи в области тонкой пленки жидкости между струями.

В условиях значительной интенсивности испарения обнаружена интенсификация среднего теплообмена при формировании структур. Показано, что существенное увеличение теплообмена при формировании струй на поверхности пленки жидкости до и после разрыва определяется влиянием испарения.

Обнаружено, что под действием термокапиллярных сил происходит распад крупных солитонообразных волн на струи. Рост волновой динамики за счет увеличение длины пробега пленки и интенсивности испарения приводит к смыванию сухих пятен и интенсификации теплообмена. Показано, что термокапиллярно-волновое движение пленки жидкости увеличивает теплоотдачу на 25-70 % при 20

Совокупность полученных результатов и сделанные на их основе обобщения и выводы, являются вкладом в развитие нового научного направления капиллярной термо-гидродинамики.

Достоверность полученных данных подтверждена оценкой величины ошибок измерений, постановками специальных тестовых экспериментов, систематическим (комплексным) исследованием проблемы, сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов. Используемые экспериментальные методики обеспечивали взаимодополнение и независимый контроль. В частности измерение толщины пленки осуществлялось двумя независимыми методами — волоконно-оптическим и емкостным.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты и разработанные на их основе физические модели, а также обобщающие расчетные соотношения позволяют осуществлять научно обоснованный выбор оптимальных параметров технологических процессов, а также могут быть использованы при создании новых методов расчета двухфазных течений. Отдельные результаты работы вошли в монографии и использовались при чтении общеобразовательных курсов в ВУЗах. Работа выполнялась в соответствии с планом фундаментальных исследований Института теплофизики СО РАН. Отдельные ее

части проводились для выполнения хозяйственных договоров с Российскими и зарубежными фирмами, а также Российских и международных грантов.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 59 печатных работ. Результаты работы докладывались автором на I Всесоюзной конференции "Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации" (Рига 1982), Всесоюзной конференции "Теплообмен в парогенераторах" (Новосибирск 1988), Int. Sem. Phase-Interphase Phenomena in Multiphase Flow (Dubrovnik 1990), VIII Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (Ленинград 1990), международном семинаре "Испарительные системы охлаждения электронного оборудования" (Новосибирск 1991), II международном семинаре "Охлаждение электронного оборудования" (Новосибирск 1993), NATO Advanced Study Institute on Energy Conservation Through Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers (Turkey 1998), XXVI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск 2002), Всероссийской конференции "Теория и приложения задач со свободными границами" (Бийск 2002), Третьей российской национальной конференции по теплообмену (Москва 2002), на научных семинарах под руководством академика Накорякова В.Е. (ИТ), академика Шемякина Е.И. (МГУ), член-корр. Алексеенко СВ. (ИТ), член-корр. Пухначева В.В. (ИГ).

Личное участие автора. Данная работа выполнена в лабораториях «Теплообмена при фазовых переходах» (1978-1987, заведующий академик С.С. Кутателадзе) и «Интенсификации процессов теплообмена» (1988-н/в, заведующий д.ф.-м.н. О.А. Кабов.) Института теплофизики СО РАН. В диссертацию включены экспериментальные результаты, полученные автором на стендах, в проектировании которых он принимал непосредственное участие, либо индивидуально, либо под его руководством с помощью студентов, аспирантов и сотрудников лаборатории интенсификации процессов теплообмена. Используемые в диссертации физические модели, обобщения, эмпирические формулы и аналитические решения, получены автором. Численные расчеты, используемые в работе, получены с применением стандартных пакетов или выполнены д.ф.-м.н. Волковым П.К. и к.ф.-м.н. Марчуком И.В. и содержатся в совместных публикациях.

1. Обзор литературы

Гидродинамике и теплообмену двухфазных течений посвящено огромное количество как теоретических, так и экспериментальных работ. Даже краткое их упоминание требует слишком большого объема.

Как отмечено во введении, будут рассматриваться газожидкостные течения с характерным поперечным масштабом соизмеримым с капиллярной постоянной, как правило, в не Слишком протяженных каналах при ламинарном течении. В обзоре основное внимание будет направлено на рассмотрение безнапорных, естественно циркуляционных, режимов течения, когда скорости газа и жидкости невелики.

Подавляющее большинство публикаций по исследованию двухфазных течений основано на получении осредненных данных о процессе, их анализе и дальнейшем теоретическом описании. Как правило, в таких исследованиях рассматриваются стационарные процессы для весьма протяженных каналов и нагреваемых или охлаждаемых поверхностей. К этому классу работ относятся в первую очередь ранние экспериментальные исследования двухфазных потоков. Для теоретического описания газожидкостных потоков использовались модели гомогенных (Lockhart, Martinelli.r 1949) и раздельных течений (Уоллис, 1972), взаимопроникающих континуумов' (Нигматулин, 1987). В настоящее время такой подход применяется для расчета двухфазных теплообменников и промышленных аппаратов (Webb, 1994). Анализ теплообмена в двухфазных системах во многих современных работах также, базируется на осредненных характеристиках процесса. Эти публикации в обзоре рассматриваться не будут.

Другие исследования направлены на рассмотрение таких эффектов двухфазных течений, где существенно влияние дискретных параметров процесса: размеров^ пузырей, нагревательных элементов, размеров каналов, характеристик пленочных течений, размеров структур, возникающих при термокапиллярной конвекции и так далее. Такой подход направлен на исследование детальных физических механизмов процесса и традиционно развивается в Институте теплофизики в работах Алексеенко, Волкова, Гогонина, Кабова, Кашинского, Накорякова, Павленко и др. Из российских и зарубежных публикаций можно отметить работы Ганчева, Durst, Hewitt, Monde, Mudawwar и др.

В обзоре будут рассмотрены газо-жидкостные течения, вызванные влиянием гравитации, с ограниченным количеством газовых включений. Будет проанализировано всплытие одиночных пузырей и их цепочек в покоящейся жидкости. Рассмотрены эффекты, связанные с наведенной циркуляцией жидкости, течением в барботажных колоннах и погруженных каналах. Течения с вынужденным движением фаз примыкают к движению в погруженных каналах и будут обсуждены отдельно. Подробно будет рассмотрена гидродинамика и теплообмен при течении пленки жидкости и влияние всплытия пузырей на теплообмен, а также кипение и кризис теплообмена в пленках жидкости и на локальных нагревателях. Будет обсуждено развитие экспериментальных методов исследования двухфазных потоков и в частности пленочных и пузырьковых течений.

1.1. Гидродинамика мало масштабных газожидкостных течений при естественной циркуляции.

1.1.1. Всплытие пузырей в покоящейся жидкости.

Движение одиночных пузырей в неограниченном объеме жидкости.

Всплытие одиночных газовых пузырей является классической задачей гидродинамики двухфазных сред, поэтому на протяжении многих лет привлекает внимание, как теоретиков, так и экспериментаторов. Процессы, связанные с движением газовых пузырей в жидкости, имеют широкое распространение и используются во многих промышленных технологиях. Целый ряд технологических циклов (особенно химических) используют барботаж для турбулизации жидкости газовыми пузырями. В случае малых газосодержаний, когда влияние пузырей друг на друга еще мало, можно рассматривать поведение отдельных газовых включений изолированно, не учитывая их взаимное воздействие.

Первые результаты по данной проблеме опубликованы еще в начале прошлого столетия и начинаются с работы (Allen, 1900), посвященной всплытию сферических пузырей, теоретических работ (Rybczynski, 1911) и (Hadamard, 1911) и дискуссии развернувшейся по поводу возможности применения закона Стокса для вычисления массы капельки в опытах по определению заряда электрона (Лебедев, 1916). Следующий этап исследований связан с поиском механизма, обеспечивающего выполнения закона Стокса при всплытии сферических пузырей малого размера (Bond, Newton, 1927). Согласно работе (Scriven, Sterling, 1960) еще в 19 веке итальянским ученым Марангони было открыто два эффекта связанных с проявлением поверхностных сил. Первый из них основан на предположении, что подвижную поверхность раздела фаз нельзя охарактеризовать лишь коэффициентом поверхностного натяжения а, так как он получен из рассмотрения статической межфазной поверхности. Для описания динамического поверхностного слоя необходимо вводить новые физические величины присущие только движущейся поверхности. Второй эффект заключается в возникновении изменения коэффициента ' поверхностного натяжения вдоль границы раздела фаз, за счет неравномерного распределения на ней поверхностно-активных веществ (ПАВ) пли температуры. Теоретическое рассмотрение первого эффекта было проведено Бусинеском (см. Scriven, 1960), который, полагая, что для описания динамической межфазной поверхности следует вводить поверхностную вязкость, обнаружил существование сил касательных к поверхности раздела фаз и приводящих к ее торможению. Как отмечено в монографии (Адамсон, 1979) поверхностную вязкость эффективно использовать при течении пленок жидкости \* на поверхности другой жидкости. Однако, для чистых жидкостей существование поверхностной вязкости не обнаружено.

В работе (Фрумкин, Левич, 1947) торможение поверхности раздела фаз объясняется только влиянием ПАВ. Известны прямые эксперименты, указывающие на значительное влияние ПАВ на движение пузырей. В (Городецкая, 1949) было обнаружено, что добавление в дважды дистиллированную воду поверхностно-активных веществ приводит к значительному уменьшению скорости всплытия небольших (7??<0.5 мм) пузырей. В (Фрумкин, Левич, 1947) рассматриваются различные механизмы влияния поверхностно-активных веществ на сферический «i

пузырь, всплывающий в вязкой жидкости. Дальнейшее исследование влияния поверхностно-активных веществ содержится в (Левич, 1952), многие другие работы проанализированы в обзорах (Воинов, Петров, 1976), (Рулев, 1980) и книге (Филиппов и др., 1988).

Позднее по исследованию процесса всплытия одиночных газовых пузырей в неограниченном объеме жидкости было опубликовано большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ. В статьях (Rrevelen, van Hoftijzer, 1950), (Козлов, Мологин, 1951), (Peebls, Garber, 1953), (Ладыженский, 1954), (Haberman, Morton, 1954) и (Kojima et al., 1968) приводятся опытные данные, показывающие зависимость скорости пузыря от его размера в различных жидкостях, описывается форма пузырей и характер их движения. Зависимость скорости всплытия пузырей от их размера для различных жидкостей показана на рис 1.1.1.1. В таблице 1.1.1.1 приведено описание форм всплывающих в воде пузырей.

В (Маленков, 1968 и 1980), (Wallis, 1974), (Churchill, 1989) предложены обобщающие эмпирические формулы. В частности для описания всплытия пузырей в области преобладающего влияния капиллярных сил в работах (Маленков, 1968), (Накоряков, Горин, 1994) рекомендуется использовать формулу