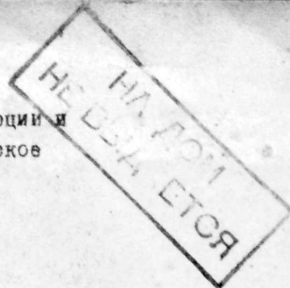


М 405839

Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.В.Баумана



На правах рукописи

ДИЕВ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ

УДК 536.423.1

МИКРОСЛОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ КИПЕНИИ
В УЗКИХ ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники
(включая техническую термодинамику
и тепло- и массообмен)

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

Москва - 1983

Москвовское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ДИЕВ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ

УДК 536.423.1

МИКРОСЛОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ КИПЕНИИ
В УЗКИХ ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники
(включая техническую термодинамику
и тепло- и массообмен)

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

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1405839

Диев М. Д. Микрослой жидкост

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Москва - 1983

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент Миронов Б.М.

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор Брдлик П.М.,
кандидат технических наук,
доцент Ганчев Б.Г.

Ведущее предприятие — Институт высоких температур
Академии наук СССР

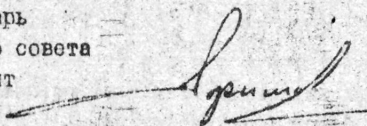
Защита состоится "17" октября 1983 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" при Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус "Энергомашиностроение".

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, МВТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю специализированного совета К.053.15.05.

Автореферат разослан "15" сентября 1983 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доцент



Ефимов С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из наиболее эффективных путей улучшения технико-экономических показателей теплообменной аппаратуры является использование теплопередающих элементов с кипящими теплоносителями. Возможности отводить максимальные количества теплоты при минимальных температурных напорах и одновременная термостабилизация охлаждаемых деталей и узлов обусловлены специфическими особенностями процесса кипения. Работами, проведенными в ИВТ АН СССР, МВТУ, МЭИ, ОТИХП, убедительно показано, что организация процесса кипения в отечественных условиях является одним из средств повышения интенсивности теплоотдачи при кипении.

С этой точки зрения актуальным является изучение вопросов, связанных с физическими особенностями процесса роста парового пузыря, с определением характера влияния режимных и геометрических параметров процесса кипения на толщину микрослоя жидкости, отделяющего поверхность нагрева от паровой фазы, так как именно испарение микрослоя определяет теплоотдачу при кипении в узких щелевых каналах.

Цель исследования заключается: а) в проверке корректности допущения об отсутствии свободно-конвективного движения в щелевом канале; б) в разработке методики экспериментального исследования процесса формирования и развития микрослоя при кипении в узких щелевых каналах; в) в исследовании влияния на толщину микрослоя геометрических и режимных параметров, а также некоторых физических свойств жидкости; г) в разработке методики инженерного расчета характеристической толщины микрослоя и интенсивности теплоотдачи.

Методы исследования. Поставленные цели достигаются: а) путем проведения численного решения двумерной системы уравнений Навье-Стокса, выполненного двумя различными методами; б) путем экспериментального исследования процессов формирования и развития микрослоя, выполненного с использованием скоростной киносъемки интерференционной картины, для получения которой применялся интерферометрический стол СИИ-1.

Научная новизна. Впервые в отечественной практике экспериментально измерены толщины микрослоя жидкости, отделяющего

паровую фазу от поверхности нагрева при кипении в щелевых каналах. Установлена степень влияния плотности теплового потока на толщину микрослоя; получены данные о размерах "сухого" пятна, формирующегося в окрестности центра паробразования. Разработана модель физического механизма отрыва парового пузыря от центра паробразования при кипении в щелевых каналах.

Диссертант выносит на защиту:

- результаты численного исследования возможности существования свободно-конвективного движения в тупиковом щелевом канале;
- результаты экспериментального исследования микрослоя жидкости, полученные при кипении в щелевом канале;
- модель физического механизма отрыва пузыря от центра паробразования;
- результаты обобщения полученных экспериментальных данных;
- методику расчета характеристической толщины микрослоя и теплообмена при кипении в узких щелевых каналах.

Практическая ценность полученных результатов заключена в предложенной методике расчета толщины микрослоя и в разработанной методике определения коэффициента теплоотдачи при кипении в узких каналах.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в расчете теплообмена при кипении жидкостей в теплопередающих элементах.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на VI Международной конференции по теплообмену (Торонто, Канада, 1978), на VI Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов (Ленинград, 1979), на Всесоюзной конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980), на научно-технической конференции "Вклад молодых ученых и специалистов в научно-технический прогресс в свете решений XXVI съезда КПСС и XIX съезда ВЛКСМ" (Севастополь, 1983), на Московском межвузовском семинаре по тепло- и массообмену (Москва, 1983), на IV Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффектив-

ности энергетических установок" (Звенигород, 1983).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано три печатные работы. Материалы исследований использованы при составлении 4 научно-технических отчетов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Работа изложена на 133 страницах, включающих 76 страниц текста, 46 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 57 наименований на 7 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, которые выносятся диссертантом на защиту.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору опубликованных исследований, касающихся вопросов, связанных с изучением механизмов теплообмена при кипении, внутренних характеристик процесса кипения, процессов формирования и развития микрослоя.

Микрослойная модель теплообмена при кипении подвергалась аналитическому исследованию в ряде работ Д.А.Лабунцова, В.А.Григорьева, Г.Ф.Смирнова, М.Купера, Дж.Мэрри, Р.Джада и др. Работы, в которых предпринимаются попытки теоретического рассмотрения задачи об образовании и развитии микрослоя, можно разделить на две группы. В первой — решающее значение придается гидродинамическим факторам, влияющим на течение жидкости в микрослое. Решение уравнения (или системы уравнений) движения приводит Г.Ф.Смирнова, Е.М.Пузырева, М.Купера, С.Котак и других к соотношению:

$$\delta_0 \sim \sqrt{\nu_{ж} \tau}, \quad (1)$$

которое справедливо при кипении в большом объеме. Аналитические оценки толщины микрослоя, формирующегося при кипении в стесненных условиях, обычно сводятся к зависимости вида:

$$\delta \sim \nu_{ж}^m (\mu_{ж} U_0 / \rho)^n, \quad (2)$$

причем рекомендации различных авторов относительно выбора ве-

личин М и N отличаются друг от друга.

В рамках второго подхода решается нестационарная задача теплопроводности многослойной системы пластин, состоящей из обогреваемой стенки (конечной или полубесконечной толщины) и тонкой пристеночной пленки испаряющейся жидкости. Такая методика анализа толщины микрослоя позволяет определить динамические характеристики, но для этого необходимо задавать начальную толщину микрослоя.

Экспериментальные исследования микрослоя жидкости немногочисленны и, в основном, проведены при кипении в большом объеме недогретой жидкости. В работах Р.Джада, Г.Лвуэка, Р.Шарпа убедительно показано, что для измерения толщины микрослоя жидкости предпочтительно применение оптических методов. При кипении в стесненных условиях детального изучения микрослоя жидкости, насколько известно автору, проведено не было. В опытах И.Катто и М.Содзи кипение в горизонтальной щели моделировалось вдувом воздуха в жидкость. Для измерения толщины микрослоя при кипении в щелевом канале А.Д.Коба использовал емкостной датчик толщины пленки, что не давало возможности изучения распределения толщины микрослоя по радиусу пучка, а сами результаты скорее характеризуют паросодержание канала.

На основании проведенного аналитического обзора литературных данных были сформулированы задачи настоящего исследования.

Вторая глава содержит результаты исследования свободно-конвективного движения жидкости в щелевом канале, выполненного с целью проверки корректности сделанного ранее в МВТУ допущения о том, что теплота от стенок канала при кипении отводится только за счет испарения микрослоя жидкости.

Исследование было проведено численными методами в два этапа. На первом^{*} — решалась двумерная система нестационарных уравнений движения, энергии и неразрывности. Схема расчетной модели доказана на рис. 1. В расчетах использовалась неравномерная сетка 30×100 , имеющая сгущения на границах, что давало

^{*} Исследование проведено автором совместно с С.А.Даниловым, В.М.Мироновым и Г.Б.Петражицким.

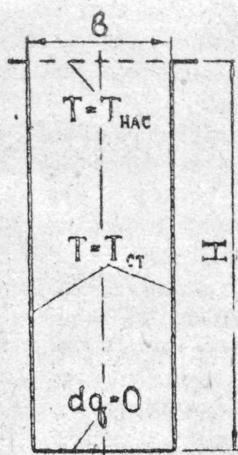


Рис. 1. Схема расчетной области

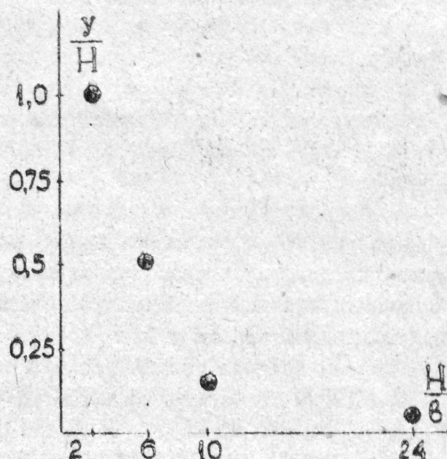


Рис. 2. Относительная глубина проникновения течения в канал

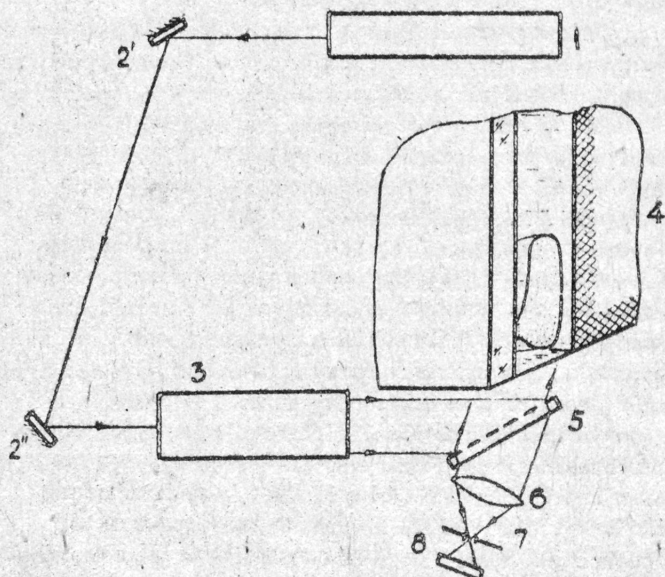


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра

возможность снизить аппроксимационные погрешности и получить более мелкие детали течения вблизи границ области. Для численного решения системы уравнений использовался метод Б.Л.Григорова и В.И.Полежаева.

На втором этапе автором решалась система стационарных уравнений Навье-Стокса методом С.Патакара на неравномерной сетке 10×20 .

Применение указанных различных численных методов позволило установить, что в рассматриваемой области формируется стационарное двухвихревое свободное-конвективное движение. Глубина проникновения течения в канал существенно зависит от соотношения между шириной канала и его высотой, что показано на Рис. 2. Щелевой канал, который используется в экспериментах, имеет высоту 120 мм, ширины канала меняются от 0,32 до 0,8 мм, а величины H/δ - от 375 до 150.

Таким образом, результаты проведенного численного исследования подтвердили корректность сделанного ранее допущения об отсутствии в щелевом канале конвективного переноса теплоты от стенок к жидкости.

Третья глава диссертации содержит описание методики проведения и обработки результатов экспериментального исследования, оборудования, использованного в экспериментах.

Проведенный обзор литературы показал, что при изучении микрослой жидкости предпочтительно использование интерферометрического метода исследования в сочетании со скоростной киносъемкой. Для получения интерференционной картины, возникающей в отраженном свете и аналогичной кольцам Ньютона, на базе интерферометрического стола СИН-1 был собран интерферометр, схема которого показана на рис. 3. Источником света 1 в интерферометре служит гелий-неоновый лазер ЛГ-38 с мощностью излучения в одномодовом режиме 50 мВт и длиной волны 0,6328 мкм. Пучок света, излучаемый лазером, с помощью зеркал полного отражения 2 и 2' направляется в автоколлиматор 3 с выходной апертурой 50 мм. Для нормального освещения рабочего участка 4 используется полупрозрачная светоделительная пластинка 5. Свет, отраженный от границы раздела микрослой - пар и прошедший светоделитель 5, фокусируется собирающей линзой 6. В фокусе линзы 6 размещается оптический фильтр 7, который служит для подавления помех. Далее

пучок света направляется в объектив регистратора в интерференционной картины. В качестве регистратора использовалась 35-мм скоростная киносъемочная камера ПШТАЦЕТ-35 с размером кадра 18x24 мм. Киносъемка проводилась на аэрофотопленку марки "ИЗО-ПАНХРОМ тип 22" чувствительностью 1000 ед. ГОСТ. Скорость киносъемки выбиралась в зависимости от условий проведения опыта и составляла от 500 до 900 кадров в секунду. Обработка киноматериала проводилась в малогабаритной проявочной машине РИКО в соответствии с инструкцией изготовителя кинопленки (ПО "СИМА", г. Шостка).

В опытах использовался рабочий сосуд, применявшийся ранее в исследованиях С.Д. Корнеева и Х.К. Курбанова. Такая методика проведения эксперимента позволила избежать внесения дополнительных систематических погрешностей, о чем можно было судить по результатам контрольных опытов.

Схема рабочего участка показана на рис. 4. Корпус I имеет

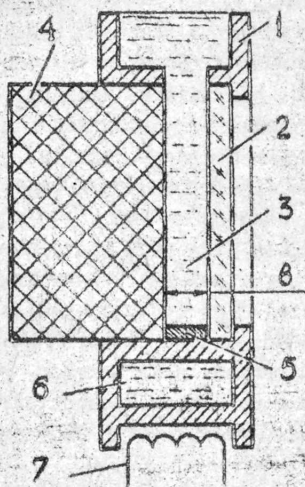


Рис. 4. Схема рабочего участка

окно, куда устанавливается оптическое стекло 2. На поверхность стекла, обращенную к жидкости, нанесен прозрачный слой двуокиси олова. Нагрев осуществляется пропусканием через напыление электрического тока. Вторая поверхность, образующая щелевой канал 3, является плоской диффузной стенкой измерительного элемента 4. Эта поверхность была теплоизолирована для обеспечения гарантированного парообразования на стекле 2. При зарождении паровой фазы на стекле имеется начало отсчета - центр парообразования, где заранее известно, что толщина микрослоя равняется нулю. Если паровой пузырь образуется на

поверхности 4, то говорить можно лишь об изменении (а не об абсолютном значении) толщины микрослоя. Расстояние между стенками

(ширина) канала 6 устанавливается калиброванными прокладками 5. Для снижения тепловых потерь и термостабилизации рабочего участка в корпусе выполнен U-образный канал 6, сообщающийся сверху с целевым каналом. Обогрев U-образного канала осуществляется нагревателем 7. К верхнему торцу корпуса 1 крепится конденсатороотборник и водоохлаждаемый конденсатор пара. Возврат конденсата осуществляется через штуцер, установленный в U-образном канале.

Обработка киноинтерферограмм проводилась с помощью аппарата 5П6-1 и заключалась в обмере интерференционной картины. При этом фиксировались расстояния между центром парообразования и линиями интерференционных максимумов, размеры пузыря, размеры "сухого" пятна.

Заключают третью главу методика обработки экспериментальных данных на ЭВМ и анализ погрешностей измерений.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию и анализу полученных результатов. Одной из основных особенностей процесса парообразования в стесненных условиях является линейная зависимость радиуса пузыря от времени. В настоящей работе в условиях одностороннего обогрева канала получены результаты, находящиеся в хорошем качественном соответствии с данными, накопленными в МВТУ, по кипению в каналах с симметричным подводом теплоты.

По результатам расшифровки киноинтерферограмм были построены профили микрослоя, один из которых показан на рис. 5. В процессе роста парового пузыря форма профиля микрослоя претерпевает изменения. На начальной стадии роста микрослой имеет клиновидный профиль, а поверхность раздела жидкость - пар прямолинейна; в этот период в окрестности центра парообразования "сухого" пятна нет. С течением времени поверхность микрослоя искривляется, появляется "сухое" пятно. Толщина микрослоя, однако, возрастает лишь на его внешней границе; а размеры "сухого" пятна со временем меняются слабо.

С целью придания полученным данным большей общности было проведено построение относительных профилей микрослоя. Обработка всех полученных киноинтерферограмм показала, что независимо от условий проведения экспериментов относительно профиль микрослоя остается неизменным во всем периоде "жизни" пузыря на центре

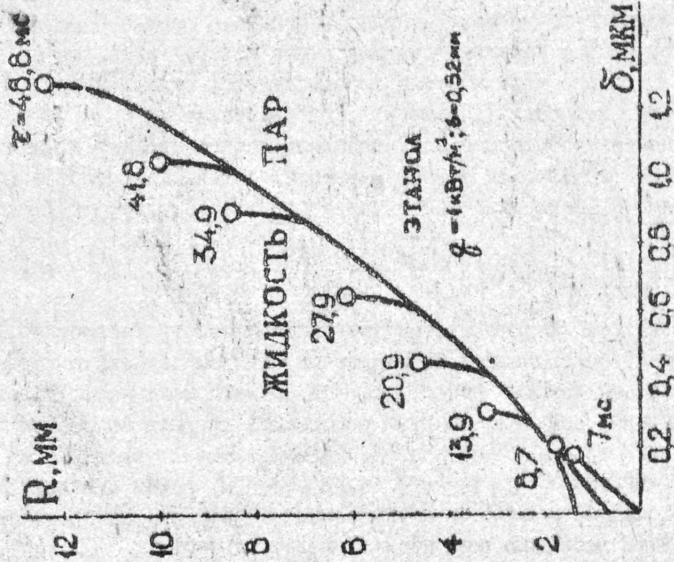


Рис. 5. Профиль микроскопа при
изменении этанола

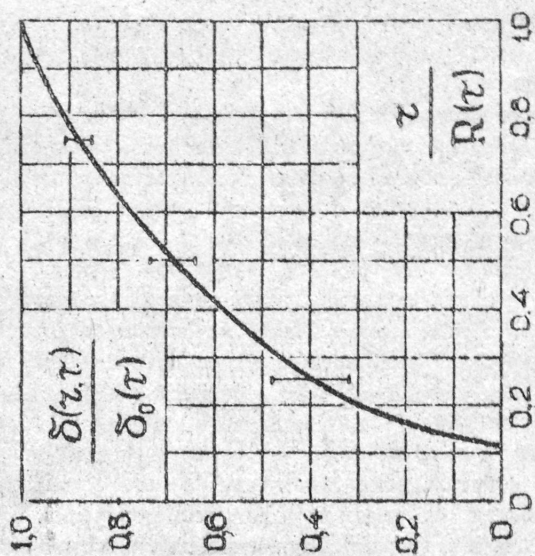


Рис. 6. Осциллограмм при
изменении этанола

парообразования. Отклонения от этого профиля не превышают 20% и, в основном, наблюдаются в начальной стадии роста, что иллюстрируется рис. 6.

Сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами Г.Явурека, Р.Джада и К.Воутсинаса показало, что при кипении в большом объеме профиль микрослоя не остается автомодельным, как это получено в настоящей работе. Было проведено также сравнение полученных автором данных с размерами "сухого" пятна с предельными схемами развития микрослоя Ф.Мура и Р.Меслера. Получено, что при кипении в узких каналах эволюция формы профиля микрослоя соответствует схеме "неиспаряющегося микрослоя", профили микрослоя, полученные другими авторами при кипении в большом объеме, ближе к другой предельной схеме.

Установлено, что, в отличие от кипения в большом объеме, зависимость толщины микрослоя от времени при кипении в щелевых каналах носит линейный характер. На рис. 7 приведены результаты обработки 140 киноинтерферограмм, относящихся к кипению этанола и хладона-II3 в щелевых каналах разной ширины при различных плотностях теплового потока.

Анализ экспериментальной информации дал возможность разработать модель физического механизма процесса отрыва парового пузыря от центра парообразования, схема которой показана на рис. 8. Согласно модели отрыв сопровождается схлопыванием "ножки" пузыря, которая "удерживает" его на стенке.

На основе обобщения полученных экспериментальных данных предложена формула для расчета краевой толщины микрослоя в момент времени, непосредственно предшествующий отрыву:

$$\delta_{отр} = 172 \cdot 10^{-10} \cdot g^{-1} \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu_{ж}} \right)^{2,38} \cdot \left(\frac{q}{r \cdot \rho_{п}} \right)^{0,38} \quad (3)$$

Предложенная методика расчета интенсивности теплоотдачи при кипении основывается на введенном автором понятии о характеристической толщине микрослоя, под которой понимается условная величина, полученная путем осреднения профиля микрослоя и зависимости толщины микрослоя от времени. Характеристическая толщина микрослоя определяет, таким образом, режим кипения, то есть совокупность внешних и внутренних характеристик процесса. Для расчета этой величины предложено соотношение:

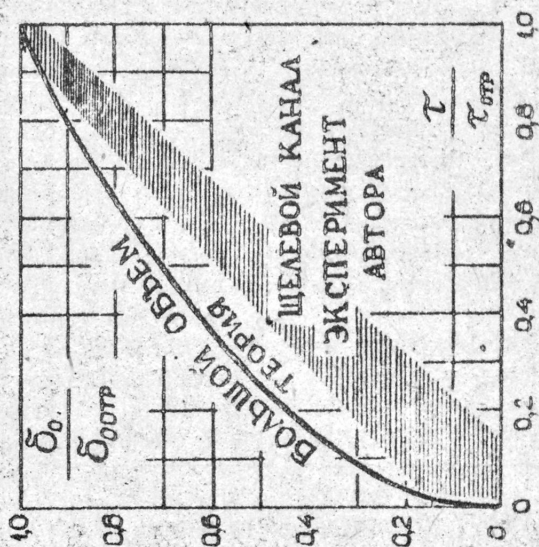


Рис. 7. Зависимость толщины
микрослоя от времени

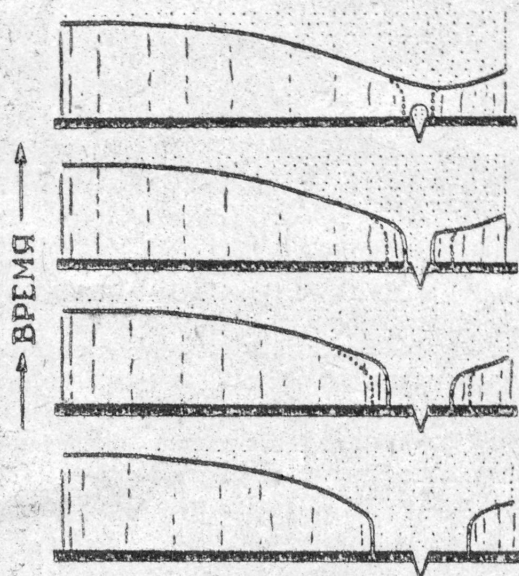


Рис. 8. Модель механизма
отрыва цезири

$$\delta_* = 0,516 \cdot 10^{-10} \cdot g_*^{-1} \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu_*} \right)^{2,36} \cdot \left(\frac{q}{r \cdot \rho_n} \right)^{-0,38} \quad (4)$$

Влияние испарения микроохлаждения проявляется на определенной части поверхности стенок канала, что можно учесть формулой, полученной С.Д.Корнеевым для паросодержания канала. Число Нуссельта при кипении в узком щелевом канале можно определить как:

$$Nu_{ц.п.} = 1,938 \cdot 10^{10} \cdot Re_*^{0,38} \cdot Bo^{2,38} \cdot Ga^{-1,58} \quad (5)$$

Применимость соотношения (5) для расчета теплообмена при кипении воды и водных растворов этанола (эксперименты с этими теплоносителями автором не проводились) в каналах разной ширины при различных плотностях теплового потока была подтверждена в результате сопоставления расчета по формуле (5) с экспериментальными данными С.Д.Корнеева и Х.К.Курбанова, что показано на рис. 9.

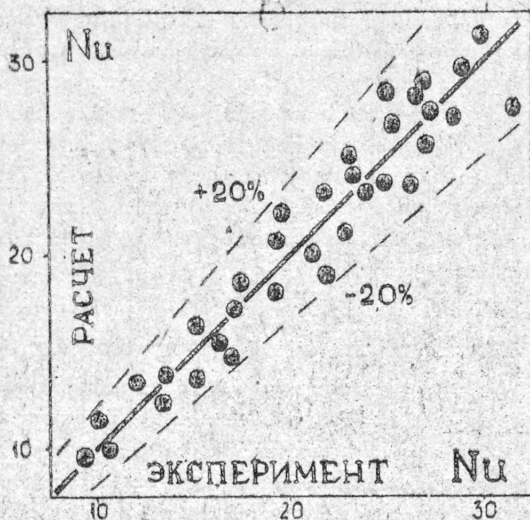


Рис. 9. Сопоставление расчета по (5) с экспериментальными данными

В исследованиях этих авторов ширины канала изменялись от 0,5 до 5 мм, а плотности теплового потока достигали 100 кВт/м^2 . Расхождение расчета по (5) с экспериментальными результатами С.Д.Корнеева и Х.К.Курбанова не превышает 20% и объясняется, по-видимому, тем, что опытные данные относятся к определенному фиксированному расстоянию от дна канала, в то время, как (5) определяет теплоотдачу со всей поверхности стенки канала.

ВЫВОДЫ

1. Кипение в вертикальных щелевых каналах по своему механизму отличается от кипения в большом объеме. Поэтому результаты аналитического и экспериментального определения толщины микрослоя, полученные для большого объема, не могут быть применены для расчета теплоотдачи при кипении в узких щелевых каналах.

2. Для принятой физической модели кипения в щелевом канале проведено численное исследование с целью проверки корректности допущения об отсутствии влияния свободной конвективного переноса теплоты по толщине канала.

Решение показало, что конвективным переносом теплоты поперек щели можно пренебрегать.

3. Разработана методика экспериментального исследования и получены опытные данные о толщине микрослоя жидкости, отделяющего паровой пузырь от вертикальной поверхности нагрева.

Установлены: форма профиля микрослоя, характер влияния ширины щелевого канала, плотности теплового потока и теплофизических свойств жидкости на толщину микрослоя.

Получено, что в отличие от кипения в большом объеме безразмерный относительный профиль микрослоя остается в исследованных условиях неизменным во всем периоде жизни пузыря на центре парообразования.

4. Выявлено, что внутренние характеристики процесса кипения в вертикальных щелях качественно одинаковы как при двухстороннем, так и при одностороннем обогреве канала.

5. Проведенное исследование показало, что рост парового пузыря в вертикальном щелевом канале происходит несимметрично относительно центра парообразования; преимущественным направлением роста является вертикальное. В отличие от кипения в большом объеме при кипении в узких каналах размеры "сухого

цатна", которое формируется в окрестности центра парообразования, меняются мало.

6. Предложена методика расчета характеристической толщины микрослоя при кипении в узких щелевых каналах.

Условные обозначения:

δ - ширина щелевого канала; g - ускорение силы тяжести;
 H - высота щелевого канала; q - плотность теплового потока;
 r - скрытая теплота парообразования; r - радиус-координата;
 R - радиус; T - температура; U - скорость; y - глубина; проникновения конвекция; α - коэффициент теплоотдачи;
 δ - толщина микрослоя; λ - теплопроводность; μ - динамическая вязкость; ν - кинематическая вязкость; ρ - плотность;
 σ - поверхностное натяжение; τ - время.

Безразмерные комплексы:

$Bo = g(\rho_n - \rho_l)\delta^2/\sigma$ - число Бонда;
 $Gr = g\delta^3/\nu_n^2$ - число Галлея;
 $Nu = \alpha\delta/\lambda_n$ - число Нуссельта;
 $Re_n = g\delta/r\rho_n\nu_n$ - число Рейнольдса.

Индексы:

$ж$ - жидкость на линии насыщения; $нас$ - состояние насыщения;
 $п$ - пар на линии насыщения; $о$ - краевое (начальное) значение;
 $отр$ - отрыв; $ст$ - стенка; $ц.п.$ - центр парообразования;
 $*$ - характеристическое значение.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах:

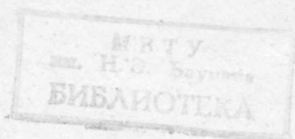
1. Днев М.Д., Миронов Б.М. Исследование микрослоя при кипении в стесненных условиях. - Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тез. докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М.: МЭТУ, 1980, с. 41.

2. Аксенова Е.С., Днев М.Д., Миронов Б.М. Внутренние характеристики процесса кипения в стесненных условиях. - В кн.: Теплообмен 1978. Советские исследования. - М.: Наука, 1980, с. 264-271.

3. Днев М.Д. Экспериментальное исследование испарения микрослоя жидкости при кипении в узких щелевых каналах. -

IV Всесоюзная школа-семинар "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок"; Тез. докладов/ Под ред. А.И.Леонтьева, - М.: МВТУ, 1983, с. 16.

конв



182169 .

Заказ **942**

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-ая Бауманская, д. 5