

М 376115

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

АКСЕНОВА ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА

ВНУТРЕННИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ
ЖИДКОСТЕЙ В ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

(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 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, С.Н.С.

Козлов В.М.

Ведущее предприятие— Институт высоких температур АН СССР

Защита диссертации состоится "29" ИЮНЯ 1981 г.
на заседании специализированного совета К 053.15.08 при
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ор-
дена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н.Э. Баумана по адресу:

107005, Москва, 2-й

С диссертацией можн

Автореферат разслан

Ученый секретарь
специализированного совета
д.т.н., профессор

МЗ 46115

Актуальность работы. Пузырьковое кипение жидкостей в каналах с малым гидравлическим диаметром широко применяется в современной технике, особенно в энергетической, авиационной, металлургической и других отраслях промышленности. Это обуславливает актуальность изучения процесса кипения в целях с целью выявления закономерностей теплообмена и изыскания путей его интенсификации. Разработка общей теории формирования двухфазного потока и переноса тепла при кипении в вертикальных плоских щелях в значительной мере сдерживается недостаточностью модельных представлений о механизме кипения, его внутренних характеристиках.

Целью работы является изучение основных закономерностей внутренних характеристик процесса пузырькового кипения жидкостей в вертикальных плоских щелевых каналах таких как: скорость роста и всплытия, отрывной диаметр и время жизни паровых пузырей, частота действия центра парообразования и разработка методов их расчета.

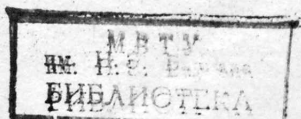
Научная новизна. В работе проведены исследования образования, роста и всплытия паровых пузырей в условиях регулируемого изменения плотности теплового потока. Обнаружено влияние режимных и геометрических параметров, свойств рабочей жидкости и схемы питания канала на скорость роста, скорость всплытия, условия отрыва паровых пузырей и частоту действия центра парообразования при кипении в стесненных условиях.

В работе предложена уточненная физическая модель существования паровых пузырей в канале, на основе которой получены расчетные соотношения для внутренних характеристик процесса. Полученные расчетные зависимости хорошо согласуются с результатами эксперимента.

На основе анализа результатов по внутренним характеристикам процесса кипения в щелях найдены некоторые особенности кипения в щелях по сравнению с кипением в большом объеме при естественной конвекции.

Предложена методика обработки результатов кинематографического исследования кипения с помощью специального устройства ввода визуальной информации в ЭВМ и соответствующих программ ввода и обработки информации.

Практическая ценность. Результаты проведенного исследования дали дополнительные обоснования практической применимости



М 34615

кипения в щелевых прослойках, как эффективного способа тепло- и массопереноса. Обнаруженные эффекты влияния плотности подводящего теплового потока, геометрии канала и схемы питания канала, теплофизических свойств жидкости на динамические характеристики процесса могут использоваться для корректировки данных по паросодержанию, интенсивности теплоотдачи при разработке теплопередающих устройств в различных областях техники.

Реализация работы. Результаты работы использовались при разработке: систем охлаждения силовых полупроводниковых приборов, щелевых теплообменников специальных устройств и т.д. Акты о внедрении прилагаются.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на VI Международной конференции по тепло- и массообмену (Торонто, Канада, 1978 год), на II Всесоюзной школе-семинаре "Газодинамика и теплообмен в энергетических установках" (Минск, 1979 год), на Всесоюзной научно-технической конференции "Тенденции в развитии машиностроения и приборостроения" (МВТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1980 год).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано три печатные работы. Кроме того, материалы исследований использованы при составлении 4 научно-технических отчетов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 155 страниц, включая 95 страниц текста, 35 рисунков, 18 таблиц, список литературы на 10 страницах, включающий 93 работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе показана связь коэффициента теплоотдачи с внутренними характеристиками процесса. Проводится обзор опубликованных работ по исследованию внутренних характеристик процесса кипения в большом объеме в условиях естественной конвекции. Установлено, что имеющиеся результаты экспериментов и расчетов по многочисленным формулам могут расходиться на один-два порядка. На основе анализа имеющихся моделей кипения в щелях сделан

вывод о том, что условия зарождения и роста паровой фазы качественно отличаются от подобных условий при кипении в большом объеме. Поэтому зависимости для расчета пузырькового кипения в свободном объеме не могут быть непосредственно использованы для расчета динамических характеристик при кипении в плоских щелях и нуждаются в экспериментальной проверке.

В связи с этим были поставлены следующие задачи исследования:

а) провести экспериментальное исследование роста и всплывания парового пузыря в условиях симметрично обогреваемого плоского щелевого канала и выявить влияние различных факторов на динамику парового пузыря;

б) уточнить физическую модель процесса зарождения и роста паровой фазы для проточных щелей;

в) получить расчетные соотношения для определения скорости роста, характеристик момента отрыва, скорости всплывания паровых пузырей и частоты действия центра парообразования;

г) разработать методику обработки результатов кинематографического исследования кипения при помощи ЭВМ.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки, на которой проводилось исследование; методика подготовки и проведения эксперимента по кинематографическому исследованию динамики кипения в щелях, а также проводится анализ погрешностей определенных теплотехнических величин.

Экспериментальный стенд для исследования внутренних характеристик процесса кипения в щелевых каналах состоял из: рабочего участка, системы электропитания, водяного контура, блока кино- и фоторегистрации и системы контрольно-измерительной аппаратуры.

Схема рабочего участка приведена на рис. 1. В корпусе 1, изготовленном из нержавеющей стали Х18Н9Т, устанавливались измерительный элемент 2 и оптическое стекло 3. На наружной поверхности оптического стекла 3 был нанесен токопроводящий слой, позволяющий использовать стекло не только для визуализации процесса, но и как нагревательный элемент. Уплотнение измерительного элемента 2 и оптического стекла 3 в корпусе 1 производилось с помощью специальных прижимных рамок 4 и термостойких резиновых прокладок 5. Требуемый зазор между плоскостями щели выставлялся с помощью калиброванных плоскопараллельных

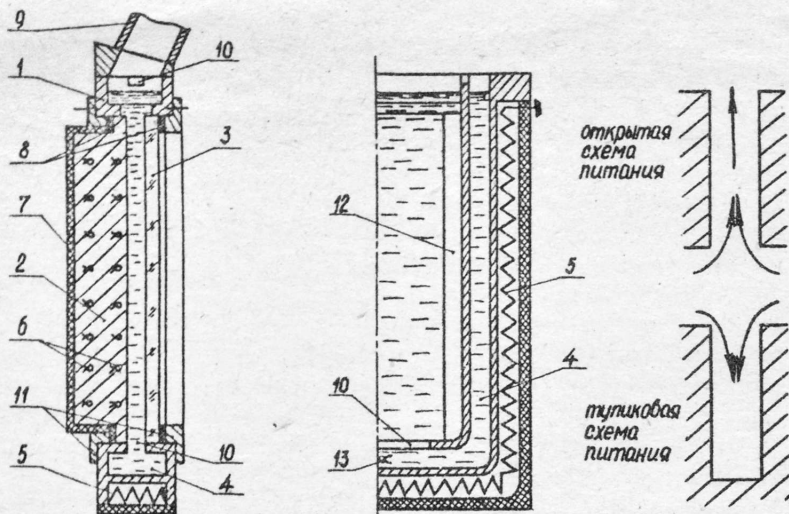


Рис. 1. Схема экспериментального участка.

прокладок 12. В нижней части корпуса выфрезерован паз 10, соединяющий щель и обводной канал 4. Открывая и закрывая паз 10, можно осуществить две схемы питания канала: проточную, когда движение паровых пузырей совпадает с направлением движения жидкости, и тупиковую: движение пара происходит навстречу движению жидкости из обводного канала. Наличие нагревателя обводного канала 5 позволяло избежать потерь тепла через торцевую поверхность установки. Температура жидкости в обводном канале контролировалась термопарой 13, установленной непосредственно в обводном канале. В верхней части корпуса 1 крепился конденсатор 9, в котором для выравнивания давления в щели с атмосферным предусмотрен штуцер. Измерительный элемент 2 выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в виде плиты с 9 поперечными блоками, каждый из которых имел индивидуальный нагревательный элемент 14. Такая конструкция позволяет избежать перетечек тепла по высоте канала. В каждом блоке по оси канала были установлены две хромель-алюмелевые термопары диаметром 0,12 мм на расстоянии 2,0 мм и 9,7 мм от рабочей поверхности. Для уменьшения тепловых потерь рабочий элемент покрыт слоем теплоизоляции 7.

Перед началом опытов все рабочие поверхности тщательно обезжиривались.

Опыты проводились на вертикальных щелях с открытой схемой питания канала и симметричным подводом тепла на дистиллированной воде и 96% этаноле. Процесс кипения организовывался при атмосферном давлении. Ширина канала в опытах менялась от 0,4 мм до 8 мм, плотность теплового потока от $5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ до $3 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Методика проведения экспериментов была следующей. В собранный рабочий сосуд заливалась исследуемая жидкость, которая с помощью нагревателя обводного канала разогревалась до температуры насыщения. Затем на нагревательный элемент и оптическое стекло подавалась тепловая нагрузка. Происходил выход рабочего участка на режим. Длительность переходного периода была определена в предварительных экспериментах по приработке поверхности нагрева и составляла для свежеприготовленной поверхности 8,5 часов, а в дальнейшем сократилась до 1,5 часа.

После выхода установки на стационарный режим работы производился замер температур и велась кино- и фотосъемка процесса роста и всплывания парового пузыря на одном из действующих в щели центров парообразования. Киносъемка проводилась скоростной кинокамерой СКС-1М со скоростью до 2000 кад./сек на аэрофотопленку А-2. Обычно для одного из режимов отнималось 300-400 метров пленки, что позволяло проследить историю 200-250 пузырей.

Максимальная погрешность измерения теплотехнических величин составляла: плотности теплового потока - 5,8%, температуры стенки - 3%, коэффициента теплоотдачи - 11%.

В третьей главе излагается методика обработки результатов кинематографического исследования пузырькового кипения в щелях с помощью специального устройства ввода визуальной информации в ЭВМ.

В состав устройства ввода входили следующие узлы: анализирующее устройство, узел квантования видео-сигнала, узел измерения координаты Y , узел выбора шага квантования по координате X и узел управления. Блок-схема сопряжения устройства ввода с вычислительной машиной приведена на рис. 2.

Анализирующее устройство производило преобразование контуров изображения из непрерывной формы в дискретную с помощью плоской (построчной) развертки. Построчная развертка изображе-



Рис. 2. Блок-схема сопряжения устройства ввода с ЭВМ.

Специфика математического обеспечения автоматической обработки кинограмм состояла в том, что наряду с алгоритмами вычисления различных характеристик изображения присутствуют и алгоритмы ввода информации об изображении в ЭВМ. Поэтому его удобно разделить на две части:

- программы предварительной обработки кинограмм, предназначенной для обслуживания устройства ввода информации в ЭВМ, реализованные на внутреннем языке конкретной ЭВМ, с которой сопряжено устройство ввода информации (в данном случае это ЭВМ "Днепр");

- программы окончательной обработки фото- и кинограмм, функцией которых является вычисление отдельных характеристик объекта (диаметра, координата центра тяжести, площадь, периметр парового пузыря и т.д.).

Для работы программы предварительной обработки кинограмм характерно параллельное протекание нескольких процессов (поступление информации на устройство ввода, обработки информации и т.д.). Программы подобного класса принято строить таким образом, что один из процессов считается фоновым и протекает постоянно в то время, как другие прерывают его по мере необходимости. Обмен информацией между процессами протекает через буферные запоминающие устройства. В нашем случае целесообразно было сделать

ния производилась световым лучом. В тот момент времени, когда анализирующий луч попадал на контур изображения (в нашем случае на контур пузыря), в фотоэлементе, который непрерывно связан с анализирующим лучом, появлялся видеосигнал. С учетом импульсов опорного генератора по видеосигналу можно было определить координаты точки контура.

процесс обработки информации об изображении фоновым, а два других — прерывающими.

Задачей фоновой программы "Обработка информации об изображении" являлось разделение всей входной информации на кадры в виде двумерной матрицы точек изображения, где по одной размерности фиксируется номер строки, а по другой — абсциссы точек изображения. Изображение вводилось в виде серии объектов, которые отделены друг от друга сплошными вертикальными линиями (ВЛ), то есть производилась параллельная обработка нескольких киноплёнок.

Необходимо отметить, что изображение сопровождалось помехами: отдельные точки, штрихи, линии в плоскости кадра; кроме того, линии изображения могли претерпевать разрыв. Поэтому один из процессоров осуществлял отбрасывание ложных точек (помех) с помощью стробирования. Сущность стробирования заключается в прогнозировании на основании информации " i "-ой строки областей наиболее вероятного появления изображения в $(i + 1)$ строке.

Программа окончательной обработки кинограмм: приводила изображение кадра к стандартному виду (изображение парового пузыря свободное от помех); вычисляла для каждого кадра значения необходимых характеристик изображения: текущий, горизонтальный, вертикальный и эквивалентный диаметр парового пузыря, площадь проекций паровой фазы на плоскость кадра, координата центра тяжести и т.д.

Точность расчета внутренних характеристик с помощью машинной обработки кинограмм составила 5%.

В четвертой главе излагаются результаты экспериментального исследования динамики роста и всплывания парового пузыря в вертикальных плоских щелевых каналах, полученные на основе количественной обработки кинограмм.

Выявлено, что скорость роста парового пузыря на вертикальной стенке щели независима от теплового потока, ширины щели, сочетания материала поверхности и рабочего тела и рода жидкости можно разбить на три участка, отличающихся темпом изменения радиуса в зависимости от времени. Длительность и положение участков определяются влиянием вышеперечисленных параметров. Так рост теплового потока от $5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ до $10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ при $\delta = 0,4$ мм вызывает увеличение скорости роста в 1,4 раза для

воды и 1,6 раза для 96% этанола при кипении на поверхности из нержавеющей стали. Аналогичное влияние вызывает уменьшение ширины щели.

Установлено, что в процессе развития парового пузыря на центре парообразования происходит эволюция формы парового пузыря, выражающаяся в опережающем темпе роста в вертикальном направлении по отношению к горизонтальному. Особенно это заметно для менее вязких жидкостей в щелях с $b \leq 0,7$ мм при высокой плотности теплового потока.

Темп роста парового пузыря зависит так же от схемы питания канала. На рис. 3 представлено сравнение динамики роста парового пузыря в открытых и закрытых каналах. Сопоставляя приведенные зависимости, можно сделать вывод, что при тупиковой схеме происходит интенсификация роста, вероятно, за счет дополнительного подвода тепла к пузырю из застойной зоны перетреты жидкости, образующейся в нижней части канала.

Кроме того, было проведено сравнение динамики роста парового пузыря при кипении в щелях и свободном объеме жидкости (рис. 3). Получено, что использовать расчетные зависимости для кипения в большом объеме нельзя, так как имеется большое качественное и количественное несоответствие.

Момент отрыва паровых пузырей определяется теми же факторами, что и скорость роста. Особенно сказывается уменьшение размеров щели. Так при тепловом потоке $2 \cdot 10^4$ Вт/м² увеличение отрывного диаметра в 1,6 раза для воды и в 2,1 раза для 96%-х этанола происходит при сужении щели от 0,8 мм до 0,4 мм, в то время как аналогичное увеличение значения достигается при постоянной ширине щели с пятикратным увеличением плотности теплового потока.

На основе статистической обработки результатов получены кривые распределения значений диаметров паровых пузырей при росте и отрыве от центра парообразования. На рис. 4 в качестве примера таких кривых показано эмпирическое распределение отрывных диаметров. При небольших тепловых потоках закон распределения значений D с большой точностью соответствует нормальному закону распределения, но с ростом тепловых потоков появляется небольшая отрицательная асимметрия, вызванная особенностью работы центров парообразования при этих режимах. При больших тепловых потоках, как правило, отрыв больших пузырей со-

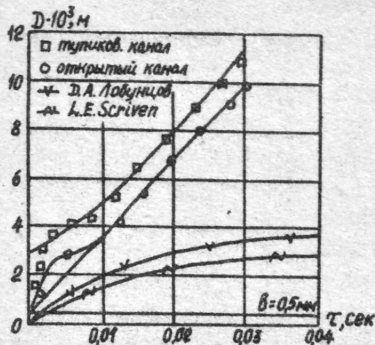


Рис. 4. Распределение отрывных диаметров при кипении воды в щелях.

Рис. 3. Динамика роста парового пузыря при кипении в щелях ($q = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$).

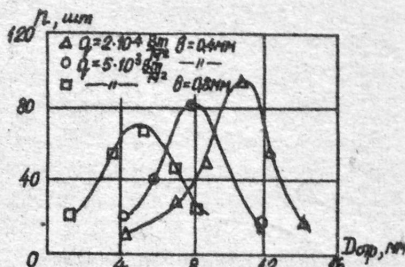


Рис. 5. Влияние плотности теплового потока и ширины щели на $\bar{D}$.

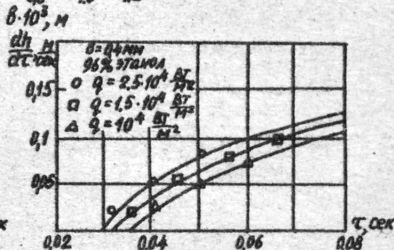
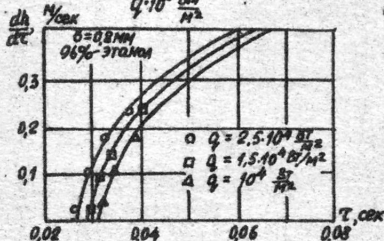
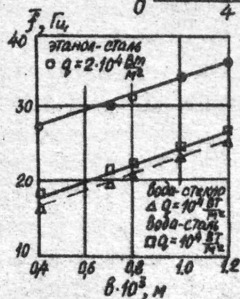
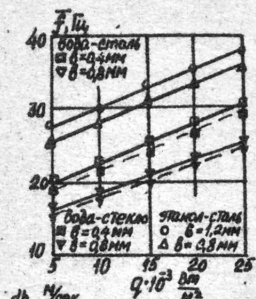


Рис. 6. Скорость всплывания паровых пузырей при кипении этанола в щелях.

проводается отрывом более мелких паровых пузырей, что и приводит к увеличению разброса данных.

Установлено, что при кипении в щелях время ожидания является очень малой величиной и составляет 13% от времени жизни независимо от геометрии щели, рода жидкости и плотности теплового потока.

Средняя частота действия центра парообразования определялась как наиболее устойчивое значение в частотных характеристиках работы центра. Полученные на основе статистической обработки результаты по $\bar{f}$ использовались в дальнейшем для выявления влияния параметров на активность работы центра парообразования.

Выявлено, что активность действия центра парообразования увеличивается с ростом плотности теплового потока и расширением канала, а так же с изменением теплофизических свойств жидкости (увеличение числа Прандтля). Диапазон изменения средней частоты отрыва был достаточно большой и составил для воды

$f = 15 \div 30$ Гц и для 96% - этанола $f = 22 \div 45$ Гц при изменении плотности теплового потока от $5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ до $2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ и ширине щели $\delta = 0,4 \text{ мм} \div 1,5 \text{ мм}$ (рис. 5).

При исследовании скорости всплывания паровых пузырей получено, что в процессе подъема пузыря в канале он продолжает расширяться со скоростью в два раза меньше, чем при росте на центре парообразования. Это вызвано, вероятно, изменением толщины микрослоя жидкости между паровым пузырем и стенками канала и уменьшением времени всплывания по отношению к времени жизни. Анализ результатов по движению центра тяжести (рис. 6) показывает: всплывание идет с постепенным замедлением и выходом к предельной постоянной скорости всплывания, что качественно согласуется с выводами В.А. Григорьева, проводившего исследование всплывания одиночных газовых пузырей в щелевых каналах; на величину скорости перемещения центра парового пузыря оказывает влияние ширина щели, вязкость жидкости и плотность теплового потока.

В пятой главе описывается физическая модель процесса развития паровых пузырей при кипении в условиях симметричного подвода тепла к щелевому каналу; приводятся обобщенные зависимости для внутренних характеристик процесса.

На основе изучения кинограмм получено, что в процессе ки-

пения в щелях история развития парового пузыря состоит из трех периодов. На первой стадии паровой пузырь растет аналогично кипению в большом объеме на вертикальной стенке. После соприкосновения с противоположной стенкой канала, происходит сплющивание и образование второго микрослоя, что сопровождается резким увеличением темпа роста. На третьем, заключительном этапе, когда $D = D_{\text{amp}}$ происходит отрыв и всплытие парового пузыря, причем при всплытии диаметр парового пузыря увеличивается, за счет притока тепла от стенок щели.

При описании процесса были приняты следующие основные допущения: все тепло подводимое в канал, расходуется на генерацию пара; основная доля тепла подводится через микрослой жидкости; в процессе роста и всплытия паровой пузырь имеет форму кругового цилиндра; толщина жидкой пленки δ между пузырем и стенкой канала много меньше ширины щели θ ; физические параметры жидкости и пара постоянны и зависят только от $T_{\text{нас}}$.

Для определения скорости роста парового пузыря составляем уравнение теплового баланса:

$$r \rho_n \frac{dV}{dt} = 2q \cdot \pi R^2 \quad (1)$$

После введения соотношений для объема парового пузыря и теплового потока в окрестности центра парообразования, проводим интегрирование при следующих начальных условиях ($T = T_0$ при $R = \theta/2$) и получаем, что

$$R(\tau) = \frac{\theta}{2} \left[1 + \frac{\alpha_{\text{кон}} \cdot \theta}{\lambda_*} \cdot \frac{c_{p*} \rho_* \Delta T}{r \rho_n} \cdot \frac{\lambda_*}{c_{p*} \rho_*} \cdot \frac{\tau - T_0}{\theta^2} \right] \quad (2)$$

Так как величина $T_0 \ll T$, то она в уравнении (2) можно пренебречь. Вводя безразмерные локальное число Нуссельта и число Якоба, уравнение (2) перепишем как

$$R(\tau) = \frac{\theta}{2} \left[1 + Nu_{\text{кон}} \cdot \frac{Ja \cdot a_*}{\theta^2} \tau \right] \quad (3)$$

Из анализа системы уравнений, описывающих теплообмен и движение жидкости в окрестности центра парообразования, были выбраны безразмерные числа, определяющие интенсивность теплоотдачи. Обобщая результаты для кипения воды и 96% - этанола (рис. 7), получаем, что

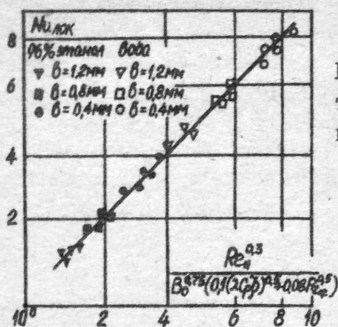


Рис. 8. Обобщение опытных данных по времени жизни парового пузыря при кипении в щелях.

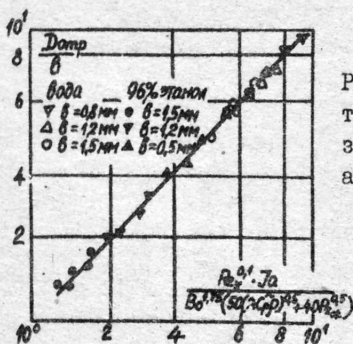


Рис. 10. Обобщение экспериментальных результатов по $\bar{F}$ при кипении в щелях.

Рис. 7. Локальный коэффициент теплоотдачи в окрестности центра парообразования.

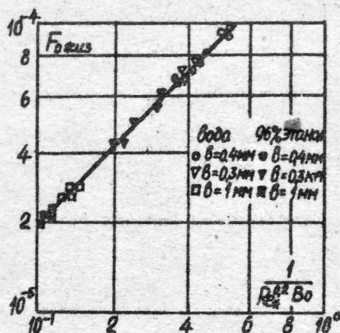
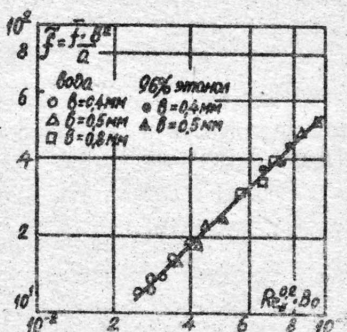


Рис. 9. Сопоставление результатов эксперимента с обобщенной зависимостью для отрывного диаметра парового пузыря.



$$Nu_{\text{лок}} = \frac{Re_*^{q_3}}{Bo^{q_7}} \cdot \frac{1}{0,1(\lambda C_p \rho)^{q_5} + 0,08 P_{z*}^{q_5}} \quad (4)$$

Подстановка соотношения (4) в (3) и введение безразмерного числа Фурье позволяет записать следующую зависимость для скорости роста парового пузыря на центре парообразования:

$$\frac{D(\tau)}{\delta} = \frac{Re_*^{q_3} \cdot Ja \cdot F_0}{Bo^{q_{75}} [0,1(\lambda C_p \rho)^{q_5} + 0,08 P_{z*}^{q_5}]} \quad (5)$$

На основе π -теоремы были выявлены два комплекса, соотношение которых определяет момент отрыва парового пузыря от стенки канала. Экспериментально получено (рис. 8), что

$$F_{0*из} = 0,002 \cdot \frac{1}{Re_*^{q_2} \cdot Bo} \quad (6)$$

Так как момент отрыва заключает вторую стадию существования парового пузыря, согласно принятой модели, то подстановка выражения (6) в уравнение (5) и учет того факта, что первое слагаемое в (5) много больше единицы в момент отрыва, позволяет получить соотношение диаметра пузыря и ширины щели в момент отрыва:

$$\frac{D_{\text{отр}}}{\delta} = \frac{Re_*^{q_1}}{Bo^{q_{75}}} \cdot \frac{Ja}{50(\lambda C_p \rho)^{q_5} + 40 P_{z*}^{q_5}} \quad (7)$$

Обобщение экспериментальных результатов по отрывным диаметрам паровых пузырей и сопоставление их с формулой (7) показано на рис. 9.

Средняя частота отрыва определяется как обратная величина суммы времени жизни и времени ожидания. Отсюда на основе формулы (6) с учетом того, что $\tau_{\text{отр}} = 0,15 \tau_{\text{жиз}}$, следует, что

$$\bar{f} = 435 \cdot \frac{a_*}{\delta^2} Re_*^{q_2} \cdot Bo \quad (8)$$

Полученная расчетная зависимость (8) позволяет обобщить результаты эксперимента по активности работы центра парообразования (рис. 10).

Скорость всплытия парового пузыря в щелевых каналах определяется действием подъемной силы, силы инерции и силы сопротивления движению. На основе баланса сил, вводя, что

по результатам эксперимента, получаем уравнение для движения центра масс парового пузыря

$$\frac{d}{d\tau} \left(\tau^2 \frac{dh}{d\tau} \right) + 16 \nu_* \frac{\tau^2}{\beta^2} \cdot \frac{dh}{d\tau} = \tau^2 g \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_*} \right) \quad (9)$$

Решая уравнение (9) с начальными условиями (при $\tau = \tau_{\text{отр}}$, $\frac{dh}{d\tau} = 0$), получаем в безразмерном виде

$$Re_0 = \frac{Ar_0}{16} \cdot \frac{(F_0 - F_{0\text{отр}})(F_0 + F_{0\text{отр}} - \frac{1}{\beta P_{*2}})}{F_0^2} \quad (10)$$

В момент отрыва, когда $F_0 \gg F_{0\text{отр}}$, скорость парового пузыря достигает своего предельного значения согласно уравнению (10):

$$\left(\frac{dh}{d\tau} \right)_{\infty} = \frac{g(\rho_* - \rho_n)}{16 \mu_*} \beta^2 \quad (11)$$

ВЫВОДЫ

1. Механизм кипения в плоских щелях (рассматривается естественная конвекция) качественно отличается от кипения в большом объеме. Поэтому экспериментальные и теоретические зависимости для расчета внутренних характеристик процесса, полученные для большого объема, не могут быть использованы для определения аналогичных величин при кипении в стесненных условиях.

2. Получены экспериментальные результаты по динамике роста и всплывтия паровых пузырей в вертикальных щелевых каналах с открытой схемой питания в случае симметричного подвода тепла. Выявлено влияние ширины канала, тепловой нагрузки, схемы питания канала, свойств рабочей жидкости и сочетания материала поверхности и рабочего тела на указанные величины. Показано, что увеличение плотности теплового потока, уменьшение ширины щели и уменьшение числа Прандтля и комплекса $\lambda \beta \rho$ приводит к интенсификации роста паровой фазы, увеличению отрывного диаметра пузыря, но при этом скорость всплывтия паровых пузырей оказывается недостаточной и происходит быстрое запаривание канала.

3. Предложены расчетные зависимости для определения внутренних характеристик процесса кипения в щелях на основе физической модели процесса, разработанной по результатам изучения кинограмм. Полученные расчетные зависимости справедливы для следующего диапазона изменения безразмерных комплексов:

$$1,7 \leq Re_* \leq 8; \quad 0,5 \leq Ja \leq 20; \quad 2 \leq Re_* \leq 200; \quad 0,02 \leq Bo \leq 5; \\ 0,006 \leq \lambda \beta \rho \leq 1,6.$$

4. Разработана методика непосредственной и точной обработки кинограмм, полученных при исследовании процесса кипения в щелевых каналах, на ЭВМ с использованием специального устройства ввода визуальной информации в ЭВМ и пакета программ ввода и обработки визуальной информации.

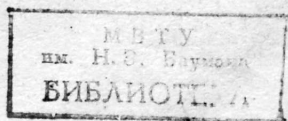
5. Установлена связь между локальным коэффициентом теплоотдачи в окрестности центра парообразования и отрывным диаметром парового пузыря. Показано, что увеличение теплоотдачи достигается за счет увеличения отношения размера парового пузыря, растущего на центре парообразования, к моменту отрыва к ширине щели. Поэтому в каналах с малой шириной щели при увеличении плотности подводимого теплового потока, где $\frac{D_{отр}}{\delta}$ достигает значения порядка $20 + 30$, наблюдается резкое увеличение теплоотдачи, что подтверждается всеми предыдущими исследованиями процесса кипения в стесненных условиях.

6. Как и при кипении в большом объеме в щелевых каналах наблюдается на металлических поверхностях нагрева изменение значения коэффициента теплоотдачи во времени при подведении постоянной плотности теплового потока, т.е. происходит процесс приработки поверхностей. Но в отличие от кипения в большом объеме время "старения" поверхностей составляет всего несколько часов (7-8 час.). Процесс приработки наблюдается при каждом новом переходе к следующему значению теплового потока, но время стабилизации значения коэффициента теплоотдачи составляет уже от 0,5 до 1 часа.

7. Результаты работы использовались при проектировании системы охлаждения тиристорных преобразователей тягового электропривода и систем "Агрегата тепла и холода".

Условные обозначения.

α - температуропроводность; δ - ширина щелевого канала;
 C_p - теплоемкость; D - диаметр; $\frac{dh}{dt}$ - скорость центра тяжести парового пузыря; g - ускорение свободного падения;
 q - плотность теплового потока; r - скрытая теплота парообразования; R - радиус; T - температура; V - объем;
 α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопро-



водности; μ - динамическая вязкость; ν - кинематическая вязкость; ρ - плотность; σ - коэффициент поверхностного натяжения; τ - время; $Ar_g = g(1 - \frac{\rho_n}{\rho_*})\delta^3/\nu_*^2$ - число Архимеда; $Bo = g(\rho_* - \rho_n)\delta^2/\sigma$ - число Бонда; $Fo = a\tau/\delta^2$ - число Фурье; $Ja = C_p \cdot \rho_* \cdot \Delta T / r \cdot \rho_n$ - число Якова; $Nu_{лок} = \alpha_{лок} \cdot \delta / \lambda_*$ - число Нуссельта; $Pr_* = \nu_* / a_*$ - число Прандтля; $Re_* = q \cdot \delta / r \cdot \rho_n \cdot \nu_*$ - число Рейнольдса для кипения; $Re_\delta = \frac{dq}{d\tau} \cdot \delta / \nu_*$ - число Рейнольдса при всплывании; $\lambda C_p \rho = (\lambda C_p \rho)_* / (\lambda C_p \rho)_{cm}$ - безразмерный комплекс, характеризующий соотношение теплофизических свойств жидкости и материала поверхности.

Индексы: $ст$ - стенка; α - жидкость; $л$ - пар; ∞ - на бесконечности; нас - на линии насыщения; отр - отрыв; жиз - жизни; ож - ожидания.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

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

2. Б.М. Миронов, Е.С. Аксенова, А.Д. Блинов. Некоторые особенности "старения" поверхности нагрева при кипении жидкостей в щелевых каналах. - Труды Моск. лесотех. ин-та, 1980, вып. 130, с. 116-129.

3. Е.С. Аксенова, Б.М. Миронов. Динамика парового пузыря в стесненных условиях. - В кн. Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тез. докладов Всесоюзной конференции / Моск. высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана. - М.: МВТУ, 1980, с. 41-42.

Л-86195 от 22.05.81 г. объем I п.л. тир. 100 экз. зак. 843

Типография МВТУ им. Н.Э. Баумана