

М/428756

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

НА ДАЕТСЯ

На правах рукописи

БЛИНОВ АНАТОЛИЙ ДАВЫДОВИЧ

УДК 536.423.1

МЕТОД РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В УЗКИХ КЛИНОВИДНЫХ КАНАЛАХ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

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

Москва - 1985

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

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Леонтьев А.И.

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

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

Ведущее предприятие — ИВТ АН СССР

Защита состоится "18" марта 1985 г. в 16⁰⁰
часов на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус "Авиагосмашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, просьба направлять по адресу:
Московская ул., д. 5, МВТУ им. Н.Э.Баумана,
специализированный совет К.053.15.05.

Автореферат разослан " /

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

M 428756

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работ. В материалах XXVI съезда КПСС предусмотрено на основании достижений науки и техники дальнейшее повышение единичных мощностей машин и оборудования при одновременном уменьшении их габаритов, металлоемкости... Решение подобного рода задач в области энергетики требует поиска новых способов интенсификации процессов теплообмена в различных тепловых машинах и энергетическом оборудовании. Одним из способов интенсификации теплообмена при кипении жидкостей является организация процесса в узких каналах, характерный размер которых (толщина) соизмерим с отрывным диаметром парового пузырька при кипении в большом объеме. Изучение процесса кипения жидкостей в узких кольцевых и плоскопараллельных каналах в МВТУ им. Н.Э.Баумана, МЭИ и ряде других организаций, показало, что с уменьшением толщины канала интенсивность теплообмена возрастает, а величина тепловых потоков, при которых наступает кризис теплообмена, уменьшается по сравнению с кипением в большом объеме. Установлено, что кризис теплообмена в узких каналах проточной схемы питания наступает в верхней части канала, а зона активных центров парообразования расположена в нижней части канала.

С этой точки зрения для сохранения высокой интенсивности теплообмена в области низких и умеренных тепловых потоков и увеличения критических плотностей тепловой нагрузки процесс кипения рационально организовать в узких клиновидных каналах, расширяющихся по ходу движения парожидкостного потока. Изучение этого вопроса является актуальным для развития ряда отраслей современной техники для разработки компактных высокоэффективных теплообменных аппаратов и систем охлаждения испарительного типа при изменяющихся тепловых нагрузках.

Цель работы заключается: а) в исследовании влияния геометрии канала и физических свойств жидкости на интенсивность теплообмена и кризис кипения; б) в разработке метода расчета интенсивности теплообмена в узких каналах при открытой схеме питания.

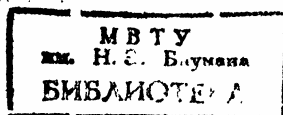
Методы исследования. Поставленная цель достигается: а) экспериментальным исследованием процесса кипения в узких клиновидных каналах; б) путем численного решения одномерного уравнения движения двухфазного потока.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1428756

Блинов А.Д. Метод расчета и



Научная новизна. Впервые: а) определено влияние плотности теплового потока, угла раскрытия канала, толщины зазора на входе в канал, способа обогрева канала и физических свойств жидкости на гидродинамику и теплообмен; б) определены предельные углы раскрытия канала, при которых кипение воды и этанола протекает аналогично большому объему; в) установлены особенности явления "старения" поверхности нагрева при кипении воды в узком клиновидном канале; г) разработан метод и программа численного расчета интенсивности теплообмена для пузырькового режима кипения в узких каналах.

Диссертант выносит на защиту:

— результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении и кризисе кипения жидкостей в узких клиновидных каналах открытой схемы питания;

— физическую модель и метод расчета интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей в узких клиновидных каналах.

Практическая ценность заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы при создании высокоэффективных теплообменных устройств на базе узких клиновидных каналов, работающих в условиях естественной конвекции. Метод может быть использован для расчета интенсивности теплообмена в клиновидных каналах, работающих в условиях невесомости.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы: а) при разработке испарительных зон тепловых труб на базе узких клиновидных каналов для охлаждения тиристоров в преобразователях электроприводов электровозов; б) при разработке устройств для локального охлаждения отливок сложной формы; в) при разработке высокоинтенсивных систем охлаждения ДВС (акты об использовании прилагаются).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на XIV конференции по гидродинамике и теплообмену в конденсированных средах в Институте теплофизики СО АН СССР в 1981 г. (доклад удостоен диплома III степени); на III Всесоюзной школе-семинаре "Проблемы гидродинамики и теплообмена в энергетических установках" (г. Нарва, 1981 г.); на IV Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и

теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок (Звенигород, 1983); на Всесоюзном научно-техническом семинаре по ДВС при МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1983 г.; на международном семинаре "ТЕПЛОФИЗИКА" в МЭИ (г. Москва, 1984 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано две печатные работы, получено три авторских свидетельства. Материалы исследований использованы при составлении 4 научно-технических отчетов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 138 страницах, включающих 62 страницы текста, 46 рисунков; список литературы из 86 наименований на 10 страницах, приложение на 20 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность изучения процессов теплообмена при кипении жидкостей в узких каналах, приведены области их применения в народном хозяйстве, сформулирована цель диссертационной работы и основные результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации дан анализ опубликованных исследований процессов кипения и кризиса в узких кольцевых и плоскопараллельных каналах, на основании которого сделаны следующие выводы:

С уменьшением толщины зазора интенсивность теплообмена возрастает ($\alpha_z \sim \delta^{-4}$), при этом величина критических тепловых потоков существенно уменьшается ($q_{кр} \sim \delta^{1,86}$).

Разработанный Х.К.Курбановым метод расчета локальных коэффициентов теплообмена при естественной конвекции в каналах открытой схемы питания не учитывает изменение толщины зазора по высоте канала.

Практически отсутствуют данные по интенсивности теплообмена и критическим тепловым нагрузкам для узких клиновидных каналов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, методике проведения экспериментов и обработке полученных данных с оценкой погрешности измерений. Установка содержит: ра-

бочий участок, электронагревательную систему, контрольно-измерительную систему и систему кинофоторегистрации процесса кипения.

На рис. 1 приведена схема рабочего участка экспериментальной установки. Клиновидный канал требуемой геометрии, образованный рабочими плоскостями измерительного элемента 2 и кварцевого стекла 4, выставляется с помощью калиброванных прокладок 5 в корпусе I рабочего участка.

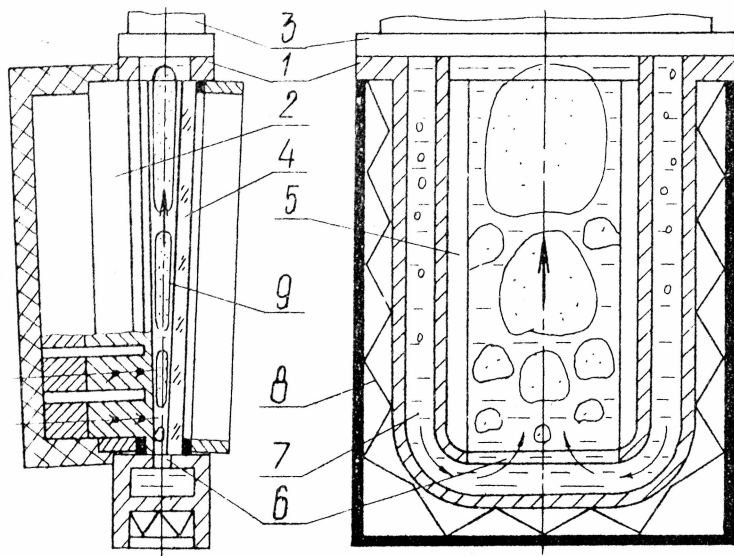


Рис. 1. Схема рабочего участка

По периметру корпуса I выполнен обводной канал 7, позволяющий снизить потери теплоты через горцевую поверхность канала за счет поддержания температуры жидкости в нем равной температуре насыщения с помощью нагревателя 8. Обводной канал 7 сообщается в нижней части с клиновидным каналом с помощью отверстия 6 в корпусе I. Измерительный элемент 2 выполнен в виде плиты с десятью поперечными блоками, к которым крепятся медные призмы с нагревательными элементами. В каждом блоке по оси измеритель-

ного элемента вварены два хромель - копелевых термоэлектрических преобразователя температуры (термопары) на расстоянии 2,0 и 10,0 мм от рабочей поверхности, отполированной до зеркального блеска ($0,05\sqrt{\text{}}$). На наружной поверхности кварцевого стекла 4 нанесен прозрачный слой двуокиси олова, что позволяет использовать стекло 4 не только для визуализации процесса кипения, но и как нагревательный элемент. К верхней части корпуса I крепится конденсатор 3, охлаждаемый проточной водопроводной водой. Конструкция конденсатора позволяет обеспечить циркуляцию конденсата в нижнюю часть обводного канала 7, а также выравнивание давления внутри рабочего участка с атмосферным при помощи специальных штуцеров. Детали поз. I, 2, 3, 5 изготовлены из нержавеющей стали IX18H9T.

Перед проведением опытов была выполнена тарировка измерительного элемента с термопарами и оптического кварцевого стекла, рабочие поверхности которых тщательно обезжиривались. Жидкость заливалась в рабочий участок до уровня, равного 140 мм от входа в узкий канал. После включения тепловой нагрузки установка прогревалась 3 часа при постоянной плотности теплового потока, равной 3 кВт/м^2 . Запись Э.Д.С. термопар производилась после стабилизации показаний ампервольтметра Ц68000 дважды на режиме постоянной нагрузки нагревательных элементов. Время стабилизации показаний термопар на свежеприготовленной поверхности при постоянной плотности теплового потока составляло около 6 часов при кипении воды. После 110 часовой наработки измерительного элемента оно значительно уменьшилось и переход с одного рабочего режима на другой происходил за 30 мин. Опыты проводились при постоянной по высоте канала тепловой нагрузке. В качестве рабочих жидкостей использованы дистиллированная вода, этанол, хлордон - И13. Рабочая поверхность измерительного элемента составляла $44 \times 151,5 \text{ мм}^2$.

Локальная плотность теплового потока рассчитывалась по формуле:

$$q = \bar{\lambda} \frac{T_2 - T_1}{\Delta y} \quad (1)$$

где $\bar{\lambda} = 5,35 [2 + 9,475 \cdot 10^{-4} (T_1 + T_2)]$ - средняя величина теплопроводности измерительного элемента, Вт/м·К;

T_1 и T_2 - показания термомпар в блоке, К;

Δy - расстояние между термомпарами, м.

Локальная величина коэффициента теплообмена определялась так:

$$\alpha_z = \frac{q}{T_{ст,z} - T_{нас}} \quad , \quad (2)$$

Максимальная погрешность в опытах составила: при расчете плотности теплового потока $\approx 12,3\%$; при расчете коэффициента теплообмена $\approx 21\%$.

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена при кипении жидкостей в узких каналах. В узких клиновидных каналах постоянной геометрии при изменении тепловой нагрузки от нуля до $q_{кр}$ имеют место следующие режимы течения двухфазного потока (см. рис. 2). Закипа-

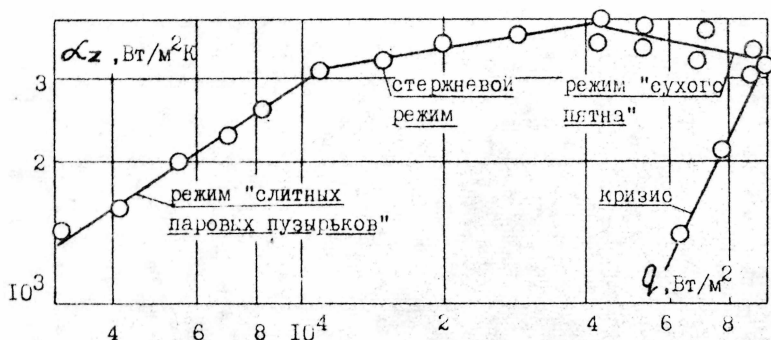


Рис. 2. Режимы кипения этанола в клиновидном канале при атмосферном давлении ($Z = 109$ мм; $\delta_0 = 0,83$ мм; $\beta = 0,0043$ рад)

ние жидкости происходит в верхней части канала. С увеличением тепловой нагрузки активные центры парообразования смещаются вниз по каналу и при $q = 5 \text{ кВт/м}^2$ имеет место режим "одиночных пузырьков" (см. рис. 1), когда скорость всплывания сплюснутых между стенками канала паровых полостей превышает скорость их роста. При дальнейшем увеличении q паровые полости могут достигать размеров, равных ширине канала или сливаться в группы пузырей, разделенных друг от друга пробками жидкости, движущимися вместе

с пузырями. Наступает режим "слитных пузырей", при котором скорость их роста соизмерима со скоростью всплывания центра массы парового пузыря. Активные центры парообразования находятся в нижней части канала, т.к. всплывающие паровые полости подавляют центры в средней и верхней частях канала. Начиная с тепловой нагрузки $Q = 11 \text{ кВт/м}^2$, гидродинамика потока существенно изменяется: происходит переход к "стержневому" режиму течения, когда в центре канала движется пар, а по стенкам тонкая пленка жидкости, на поверхности которой наблюдается волнообразование. Переход к этому режиму сопровождается возникновением устойчивых пульсаций двухфазного потока, которые сохраняются до возникновения кризиса кипения. Возникновение пульсаций объясняется тем, что скорость роста паровых пузырей значительно больше скорости всплывания. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки приводит к появлению "сухих пятен" в верхней части канала, которые смываются набегавшей пленкой жидкости. Частота появления "сухих пятен" совпадает с частотой пульсаций двухфазного потока. Наконец, при $Q_{кр} \approx 100 \text{ кВт/м}^2$ в верхней части канала наблюдается образование устойчивого "сухого пятна", в зоне которого термпары фиксируют резкое увеличение температуры стенки канала. Наступает кризис теплообмена.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при постоянном угле раскрытия канала δ увеличение толщины зазора на входе в канал приводит к снижению интенсивности теплообмена при кипении и увеличению критической плотности теплового потока (см. рис. 3 и 4). Аналогичный результат получен в опытах при постоянной толщине зазора на входе в канал и увеличивающемся угле раскрытия. Определены предельные углы раскрытия клиновидного канала, когда интенсивность теплообмена совпадает с большим объемом: для этанола - $\delta_{пред} \approx 0,0882 \text{ рад } (5^\circ)$; для воды - $\delta_{пред} \approx 0,175 \text{ рад } (10^\circ)$.

При постоянной геометрии канала уменьшение капиллярной постоянной в зависимости от рода жидкости приводит к значительному снижению интенсивности теплообмена и критических тепловых нагрузок (рис. 7).

Графики зависимости критических тепловых потоков от угла раскрытия канала при кипении воды и этанола с различной толщи-

ной зазора на входе в клиновидный канал представляют собой прямые линии в логарифмических координатах (см. рис. 5). Точки их пересечения со значениями плотностей теплового потока, равных $q_{кр}$ в большом объеме, соответствуют предельным углам раскрытия клиновидных каналов $\gamma_{пред}$. Экспериментальные данные по критическим тепловым нагрузкам обобщены в виде следующей зависимости (см. рис. 6):

$$Re_{**} = 0,023 \left(\frac{Ga_n}{\tilde{\rho} \tilde{v}_{cr}} \right)^{0,65}, \quad (3)$$

на основании которой получена формула для расчета критических тепловых нагрузок в клиновидных каналах:

$$q_{кр} = 0,023 \gamma \frac{[\rho_n \rho_n g (\theta_0 + 0,5 \gamma_{кр})^2]^{0,55}}{M_n^{0,5} N_{кр}^{0,35}}. \quad (4)$$

Точность расчета критической тепловой нагрузки по формуле (4) составляет $\pm 20\%$ в следующем диапазоне изменения безразмерных комплексов:

$$Re_{**} = 100 + 5000; \tilde{\rho} = (6 + 50) \cdot 10^{-4}; Ga_n = 25 + 4,5 \cdot 10^5; \tilde{v}_{cr} = (3 + 17) \cdot 10^{-3}; N_{кр} \leq 130 \text{ мм.}$$

Теплофизические свойства теплоносителя необходимо брать при атмосферном давлении и температуре насыщения.

В четвертой главе изложены основы метода расчета интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей в узких каналах (физическая модель представлена на рис. 1). Основной задачей является определение скорости жидкости U_0 на входе в канал. При интегрировании уравнения движения двухфазного потока по высоте канала получено уравнение:

$$\Delta p_{дв} + \Delta p_{кап} = \Delta p_0 + \Delta p_{тр} + \Delta p_{уск} + \Delta p_H, \quad (5)$$

где

$$\Delta p_{дв} = 2g\rho_n \frac{\omega n}{U} \left[1 - \frac{U_0 v_0}{HU} \rho_n \left(1 + \frac{HU}{U_0 v_0} \right) \right] - \text{движущий напор;}$$

$$\Delta p_{кап} = \gamma \frac{\sigma H}{v_0 v_n} \left[2 - \frac{U_0 v_n}{\omega n H} \rho_n \left(1 + 2 \frac{\omega n H}{U_0 v_n} \right) \right] - \text{капиллярный напор;}$$

$\Delta p_0 = 0,25 \rho_{ж} u_0^2$ - потери давления на входе в канал ;

$$\Delta p_{тр} = 2 \rho_{ж} \int_0^H \frac{C_f}{2} u_{ж}^2 \frac{1-\varphi}{\beta} dz + 12 \mu_n \frac{\omega_n}{\beta_0} \left(\frac{H}{\beta_n} \right)^2 - \text{потери на трение};$$

$\Delta p_{уск} = 4 \rho_{ж} u_0 \omega_n H / \beta_n$ - потери на ускорение потока ;

$\Delta p_n \approx 0,5 \rho_{ж} u_0 (u_0 + 2 \omega_n H / \beta_n) (\beta_0 / \beta_n)^2$ - потери на выходе из канала ;

$$U = 2 \omega_n + f u_0; u_{ж} = (u_0 \beta_0 - 2 \omega_n \tilde{p} z) / (u_0 \beta + 2 \omega_n z) / u_0 \beta^2.$$

В работе Курбанова Х.К. - $\varphi = \frac{2 \omega_n z}{u_0 \beta + 2 \omega_n z}$; $u_n = 2 \omega_n z / \beta \varphi$.
Решение уравнения (5) численными методами позволяет найти скорость u_0 и рассчитать истинные объемные паросодержания φ по высоте канала.

Для определения локальных величин коэффициента теплообмена получена расчетная формула:

$$\alpha_z = \left(\frac{1-\varphi}{\alpha_{z,ж}} + \frac{\varphi}{\alpha_{z,п}} \right)^{-1} \quad (6)$$

В первом приближении для определения локальных значений коэффициента теплообмена при прохождении жидких пробок в рассматриваемом сечении канала, можно воспользоваться аналогией Рейнольдса, модифицированной Кольбарном, из которой следует:

$$\alpha_{z,ж} = \frac{C_f}{2} \rho_{ж} C_{рж} u_{ж} Re_{ж}^{-2/3}, \quad (7)$$

где коэффициент трения $\frac{C_f}{2}$ рассчитывается в зависимости от режима течения жидкой фазы.

Коэффициент теплообмена при прохождении паровых сферонцов в рассматриваемом сечении канала определяем по формуле:

$$\text{где } \delta = \sqrt{\frac{6 T_{\text{нас}} \lambda_{\text{ж}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{q_2 \rho_{\text{п}} \rho_{\text{ж}}}} \quad \alpha_{\text{зп}} = \lambda_{\text{ж}} / \delta, \quad (8)$$

- толщина пленки жидкости, отделяющей паровой сфероид от поверхности нагрева.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных дает удовлетворительное совпадение для клиновидных каналов с углами раскрытия $\beta^* < 0,5 \beta^*_{\text{пред}}$ (см. рис. 8).

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что:

- а) с увеличением угла раскрытия клиновидных каналов интенсивность теплообмена снижается по сравнению с плоскопараллельными щелевыми каналами в несколько раз в зависимости от толщины зазора на входе в канал;
- б) предельным углом раскрытия клиновидного канала, при котором коэффициент теплообмена становится равным α в большом объеме (при равных параметрах) является величина: 5° - для этанола и 10° - для воды в исследованных условиях;
- в) с увеличением угла раскрытия клиновидных каналов величина критической тепловой нагрузки возрастает по сравнению с плоскопараллельными щелевыми каналами в несколько раз в зависимости от рода жидкости и толщины зазора на входе в щелевой канал.

2. На основании экспериментальных данных предлагается физическая модель процесса кипения в вертикальных узких клиновидных каналах.

3. На основании предлагаемой физической модели рекомендуется метод расчета интенсивности теплообмена и критической тепловой нагрузки в вертикальных узких клиновидных каналах.

4. Экспериментально установлено, что время "старения" свежеприготовленной поверхности при кипении жидкостей в щелевых каналах меньше в 1,5 - 2 раза по сравнению с большим объемом при равных параметрах.

Условные обозначения:

δ - толщина канала; C_p - теплоемкость; g - ускорение свободного падения; q - плотность теплового потока; ε - скрытая теплота парообразования; T - температура; H - высота канала; Δp - перепад давления; u - средняя по сечению канала скорость; λ - теплопроводность; μ - динамическая вязкость; σ - коэффициент поверхностного натяжения; θ - угол раскрытия канала; $\omega_p = q / \varepsilon \rho_n$ - приведенная скорость парообразования; $\bar{\rho} = \rho_n / \rho_{ж}$ - безразмерная плотность; $\bar{\delta}_{cp} = (\delta_0 + \delta_H) / 2H$ - средняя безразмерная толщина канала; $Re_{ж*} = qH / \varepsilon \mu_n$ - модифицированное число Рейнольдса; $Gr_n = g \bar{\delta}_{cp}^3 (\rho_n / \mu_n)^2$ - число Галлея.

Индексы: $кр$ - критический; $ст$ - стенка; Z - текущая координата; $нас$ - на линии насыщения; $в$ - вход; $п$ - пар; $ср$ - средний; $дв$ - движущий; $кап$ - капиллярный, $тр$ - трение, $уск$ - ускорение; $н$ - выход; $ж$ - жидкость.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

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

2. Блинов А.Д. Экспериментальное исследование теплопередачи при кипении жидкостей в расширяющихся щелевых каналах. - Гидрогазодинамика и теплообмен в конденсированных средах. Новосибирск, ИГи СО АН СССР, 1981, с. 45 - 51.

3. А.с. 985368 (СССР). Рубашка жидкостного охлаждения блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания. / А.Д.Блинов, В.Е.Тимофеев, В.Е.Липатов и др. - Опубл. в Б.И., 1982, № 48.

4. А.с. 1017899 (СССР). Плоская тепловая труба. - А.Д.Блинов, В.Е.Липатов. - Опубл. в Б.И., 1983, № 48.

5. А.с. 1079994 (СССР). Плоская тепловая труба. - А.Д.Блинов, В.Е.Тимофеев. - Опубл. в Б.И., 1984, № 10.

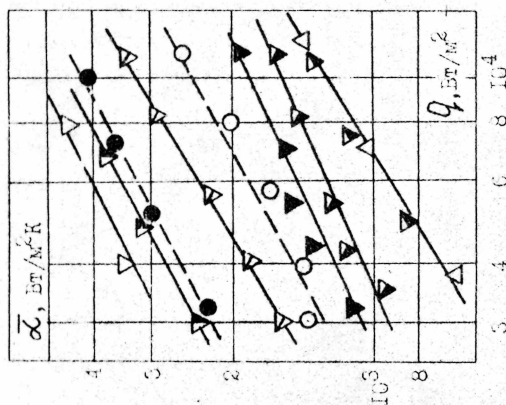


Рис. 3. Зависимости $\bar{\alpha} - q$ при кипении этанола. Давление атмосферное.

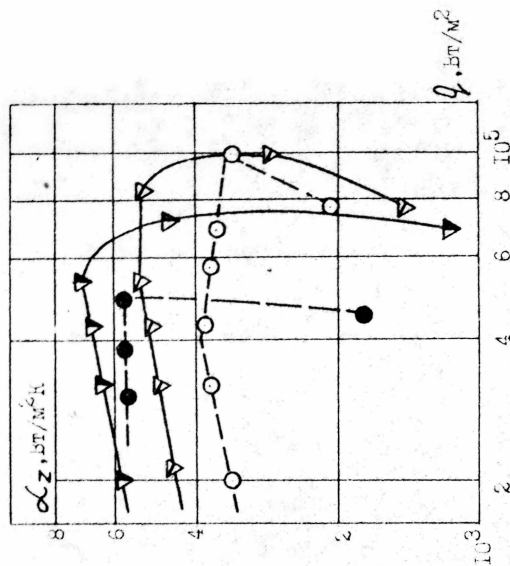


Рис. 4. Изменение локального коэффициента теплообмена при кипении этанола.

$H_{кр} = 109 \text{ мм.}$

Обозначения:

$-\nabla - \theta_0 = 0,3 \text{ мл., } \beta = 0$ (Аксенова Е.С.); $-\Delta -$ большим объемом (Бориницкий В.М.);
 Автор: $-\nabla - \theta_0 = 0,78 \text{ мл., } \beta = 0$; $-\bullet - \theta_0 = 0,43 \text{ мл., } \beta = 0,0045 \text{ рад.}$; $-\Delta - \theta_0 = 0,78 \text{ мл., } \beta = 0,0028 \text{ рад.}$

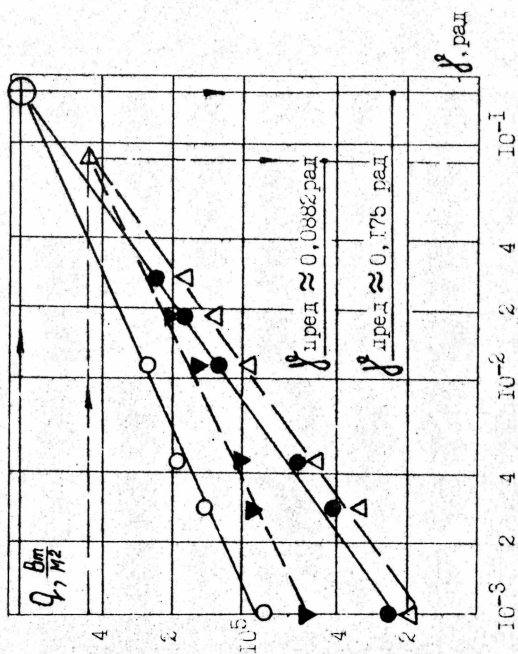


Рис. 5. Изменение критических тепловых потоков от угла закрытия канала.

Обозначения:

Вода: $\oplus$ — большой объем, $Q_{кр} \approx 900$ кВт/м² (О.С. Кутателадзе); $\circ$ — $\theta_0 = 0,8$ мм; $\bullet$ — $\theta_0 = 0,4$ мм;
 Сталь: $\triangle$ — большой объем, $Q_{кр} \approx 450$ кВт/м² (Б.Г. Морозов); $\blacktriangledown$ — $\theta_0 = 0,8$ мм; $\triangle$ — $\theta_0 = 0,4$ мм;
 Алюмин-13 — $\square$ — $\theta_0 = 0,5$ мм; $\gamma = 0,0117$ рад.

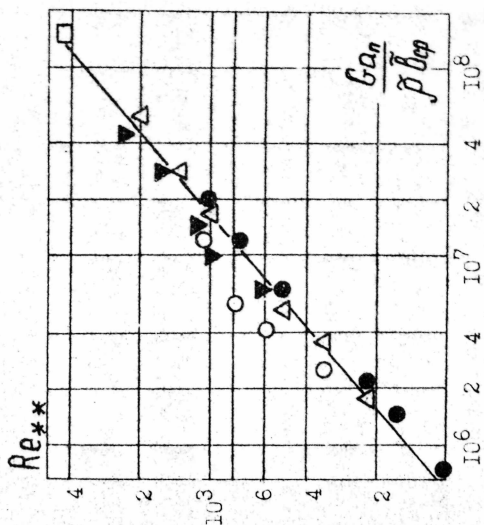


Рис. 6. Обобщение экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам.

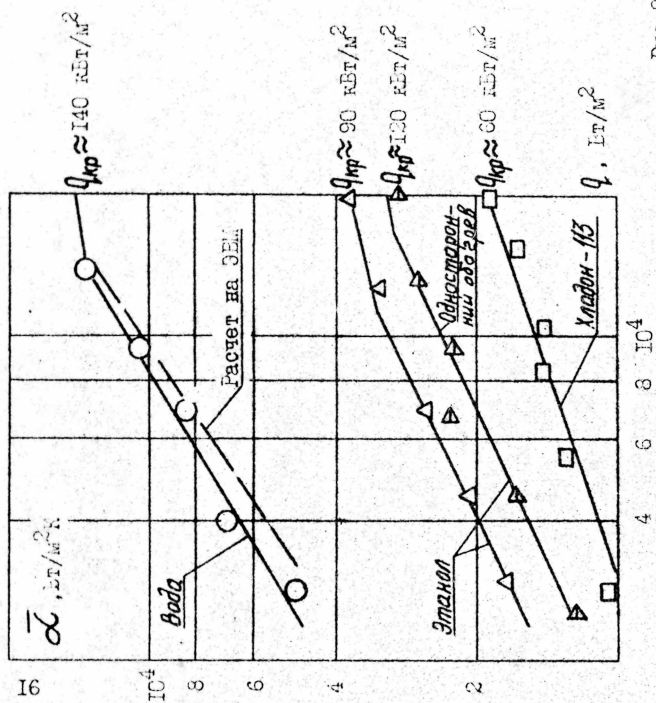


Рис. 7. Влияние физических свойств жидкости на интенсивность теплообмена и кризис ($\beta_0 = 0,5 \text{ мм}$; $\beta = 0,0117 \text{ рад.}$.)

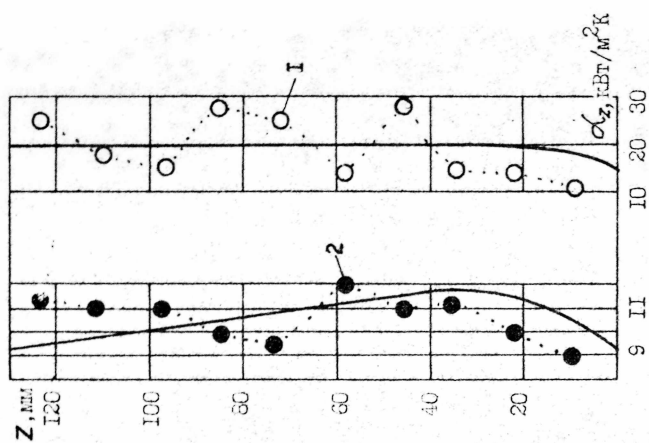


Рис. 8. Изменение коэффициента теплообмена по высоте канала при кипении воды ($q = 9,52 \text{ кВт/м}^2$): I- $\beta = 0,4 \text{ мм.}$; $\beta = 0 \text{ рад.}$; 2- $\beta_0 = 0,5 \text{ мм.}$; $\beta = 0,0117 \text{ рад.}$; — теория.

Объем I п.л.

Тираж 100 экз. Ротапринт МВТУ

Заказ 468

Л - 96680 Подписан к печ. 14.02.85 г.