М 3247545

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени Высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

НИГМАТУЛИН Раис Искандрович

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТРУБЕ С КОСИНУСОИДАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва - 1977

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени Высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

НИГМАТУЛИН Раис Искандрович

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТРУБЕ С КОСИНУСОИДАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

05.I4.05 - Теоретические основы теплотехники

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

М3277895

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1327545
НигматулинР.И.Исследован

Москва - 1977

Работа выполнена во Всесоюзном дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехническом научно-исследовательском институте им.Ф.Э.Дзержинского

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Дорощук В.Е.

Официальные оппоненты - доктор технических наук Сорокин Д.Н.
канд. техн. наук, доцент Ганчев Б.Г.

Ведущее предприятие - Центральный котлотурбинный институт им.И.И.Ползунова.

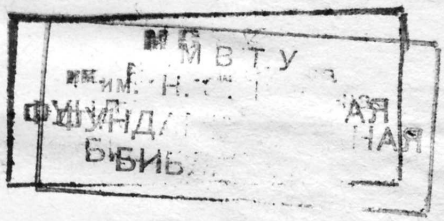
Защита состоится " "_____ 197 г. в ____ час. ____ мин. на заседании специализированного совета шифр К-33/5 " Тепловые машины и теоретические основы теплотехники " при Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: г. Москва, Лефортовская набережная, д.1, факультет " Энергомашиностроение."

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

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба присылать в адрес совета: 107005, 2-ая Бауманская ул.,д.5, МВТУ им. Н.Э.Баумана, учёному секретарю.

Автореферат разослан " "_____ 197 ____ г.

Учёный секретарь специализированного совета к.т.н., доцент Манушин Э.А.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема надежного отвода тепла от высоконапряженных поверхностей нагрева, охлаждаемых пароводяной средой, представляет большой интерес для парогенераторной техники. Приходится считаться с тем фактом, что при определенных режимных параметрах на поверхности нагрева возникает кризис теплообмена, влекущий за собой рост температуры стенки, который по условиям прочности материала может оказаться недопустимым. Изучению кризисных явлений отводится важное место, поскольку правильные их понимания и разработка надежных рекомендаций дают возможность повысить технические характеристики и безопасность работы теплообменных аппаратов.

В настоящее время относительно надежные рекомендации по расчету кризисов теплообмена разработаны применительно к каналам с равномерным тепловыделением. Заметно хуже обстоит дело с изучением кризисных явлений для условий неравномерного, в частности косинусоидального тепловыделения по длине канала, хотя именно этот последний случай представляет особый интерес для практических целей. Противоречивость полученных разными авторами экспериментальных данных затрудняет разработку надежных рекомендаций.

Целью диссертационной работы является:

1. Экспериментальное изучение кризиса теплообмена в парогенерирующих трубах с кольцевой и дисперсной структурами потока при косинусоидальном законе тепловыделения по длине канала в широком диапазоне режимных параметров.

2. Изучение физической природы кризиса теплообмена в парогенерирующих трубах для указанных структурных форм потока.

3. Разработка расчетных рекомендаций.

Методика проведения исследований. В результате анализа опубликованных к настоящему времени экспериментальных работ по кризисам теплообмена в круглых трубах с неравномерным тепловыделением по длине канала удалось выявить ряд причин плохого согласования опытных данных разных авторов. Они обусловлены главным образом особенностями принятых методик эксперименталь-

ного исследования и способов обработки результатов опытов. Все эти обстоятельства были учтены в предлагаемой работе. Опыты проводились на стенде прямоточного типа. Обеспечивалась надежная гидродинамическая стабильность потока, проводилась непрерывная запись температурного режима трубы и фиксация момента возникновения кризиса теплообмена. При обработке опытов использовались существующие представления о возможности возникновения в парогенерирующей трубе двух различных по своим закономерностям кризисов теплообмена.

Научная новизна. Систематические исследования кризисов теплообмена в широкой области режимных параметров при неравномерном тепловыделении проведены впервые. Анализ полученных результатов позволил развить наши представления о физической природе кризисов теплообмена в парогенерирующих трубах при косинусоидальном законе тепловыделения и рекомендовать относительно надежные рекомендации.

Реализация работы. Результаты экспериментального исследования использованы секцией тепломассообмена Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Теплофизика" для разработки межведомственных рекомендаций по расчету кризиса теплообмена при неравномерном тепловыделении по длине канала. Публикация материалов, относящихся к механизму кризиса теплообмена в парогенерирующей трубе, будет способствовать более глубокому пониманию этого сложного физического явления.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях секции тепломассообмена Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Теплофизика" в 1976 г. (г.Москва), на XУП научно-технической конференции молодых учёных и специалистов в 1977 г. (г.Москва, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского), на научно-техническом семинаре в 1977 г. (г.Ленинград, ЦКТИ им. И.И.Ползунова).

Основные положения диссертации опубликованы в шести работах и приняты в качестве доклада на 6-ю международную конференцию по тепломассообмену (Канада, г.Торонто, 1978 г.).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов работы, приложения из семи таблиц на 56 страницах, списка литературы из 93 наименований, изложена на 104 страницах машинописного текста и включает в себя 58 рисунков на 45 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса о кризисах теплообмена в парогенерирующих трубах. Поскольку на эти явления существенное влияние оказывают эффекты, связанные с движением пароводяной среды, дается обзор литературы по структурам двухфазных потоков. Основными структурными формами пароводяного потока являются: пузырьковый, снарядный, кольцевой и дисперсный. Кольцевой режим течения является наиболее важным, так как он охватывает широкую область паросодержаний и встречается в теплообменных аппаратах наиболее часто. Этот режим характеризуется совместным течением жидкости в виде кольцевой пленки по стенке трубы и пара с диспергированными в нем каплями жидкости в центральной части канала (в ядре потока).

В парогенерирующей трубе возможно возникновение кризисов теплообмена первого и второго рода, различающиеся между собой происхождением, а следовательно, и закономерностями. Первый вид кризиса обычно связывается со сменой режимов кипения жидкости (ядерного на пленочное). Он наблюдается при высоких удельных тепловых потоках $q_{кр}$ и небольших значениях массовых паросодержаний x. На рис.I кризису теплообмена первого рода отвечает линия АВ.

По мере увеличения паросодержания рабочей среды в парогенерирующей трубе и связанного с этим роста линейной скорости пара происходит постепенное утонение пристенной жидкой пленки (для кольцевой структуры потока) из-за ее высыхания и срыва капель с поверхности (динамический унос капель). При некотором значении паросодержания $x_{др}$ пленка становится настолько тонкой, что определяющее влияние на характер ее движения начинают оказывать силы вязкости и поверхностного натяжения. Поверхность пленки

становится гладкой и срыв капель прекращается. В этом состоянии пристенная пленка получила название микропленки. Образование последней рассматривается как переход кольцевой структуры потока в дисперсную. После испарения микропленки теплоотдача от стенки трубы резко ухудшается и соответственно температура поверхности нагрева повышается. Это явление названо кризисом теплообмена второго рода. Высыхание жидкой пленки в широкой области P, gW и q происходит как без орошения ее каплями влаги из ядра потока (линия ВС на рис.I), так и с орошением (линия СД). В первом случае граничное паросодержание обозначается $x_{кр}^{0}$ (оно не зависит от q), во втором - $x_{кр}^{+}$

Во второй главе дается обзор литературы по кризисам теплообмена при неравномерном тепловыделении по длине канала. Сделаны следующие выводы:

- Несмотря на значительное число выполненных измерений критических тепловых потоков, в действительности результаты этих измерений трудно обобщить, поскольку опыты на участках с идентичными законами тепловыделения проводились в узком диапазоне массовых паросодержаний.

- При обработке опытов авторы исследований, как правило, не учитывали различную природу кризисов теплообмена в испарительных трубах, что способствовало неправильному толкованию результатов и затрудняло обобщение опытных данных. В ряде работ раннего периода не учитывалась возможность возникновения в экспериментальной установке низкочастотных пульсаций потока, которые могли существенно исказить истинные результаты опытов. На предлагаемые рекомендации не могли не повлиять также различные подходы к фиксации места возникновения кризиса и обработке опытов. Одни исследователи фиксировали кризис и режимные параметры непосредственно в момент появления скачка температуры стенки, другие делали это после того, как место возникновения кризиса смещалось вверх по потоку (что является характерным для косинусоидального закона тепловыделения). Ясно, что режимные параметры в месте возникновения кризиса в обоих случаях были неодинаковыми. В ряде работ место возникновения вообще не фиксировалось, а при обработке опытов за $q_{кр}$

принималось значение q на выходе из экспериментального участка, что, естественно, не всегда соответствовало действительности.

Третья глава посвящена описанию экспериментального стенда и основных его элементов. Схема экспериментальной установки показана на рис.2. Пар от котла закритических параметров поступал на стенд через запорный вентиль I. Далее он последовательно охлаждался в теплообменнике 3, допускающем ступенчатую регулировку температуры рабочей жидкости и теплообменнике 4, позволяющем осуществлять ее плавную регулировку. Для получения нужного давления рабочей среды перед расположенным вертикально участком 6 пар пропускался через систему дроссельных вентилей 5 и 7. Пройдя экспериментальный участок в направлении снизу вверх, образующаяся пароводяная смесь перед выбросом в атмосферу дросселировалась вентилями 7 и охлаждалась в теплообменнике 8. Для измерения расхода рабочей среды использовалась мерная колба 9.

Перед дроссельным вентилем 5 измерялись температура однофазной среды t^* хромель-алюмелевой термопарой I0 и давление p^* манометром I3. По полученным данным находилась энтальпия, а с учетом тепловых потерь в дроссельном вентиле определялась энтальпия среды i_1 на входе в экспериментальный участок. В случае подачи в участок недогретой до кипения воды, энтальпия i_1 находилась по t_1 с помощью термопары II и давлению p_1, измеряемому манометром I4. Эти же устройства служили для определения потерь тепла при прохождении среды через дроссельный вентиль.

Нагрев экспериментального участка осуществлялся пропусканием через него переменного электрического тока промышленной частоты от включенных последовательно автотрансформатора АТМКТ-250 и двух трансформаторов ОСУ-I00.

Опыты проводились на трубах, изготовленных из нержавеющей стали IXI8H9T внутренним диаметром 8 мм и обогреваемой длиной I,8 м. Тепловыделение по косинусоидальному закону создавалось соответствующим увеличением толщины стенки труб от середины к обоим концам. При проведении опытов были использованы два

экспериментальных участка. Один из них имел коэффициент неравномерности тепловыделения $\varepsilon = q_{max}/q_{min}$ =3, другой - II. Часть опытов на втором экспериментальном участке была проведена со смещенным верхним токоподводящим фланцем (у выходного конца трубы) на 0,3 и 0,6 м в направление против потока рабочей среды.

Место возникновения кризиса фиксировалось с помощью 20 термопар, приваренных вдоль образующей экспериментального участка. Показания термопар через специальные усилители-преобразователи ПТ-ТП-68 передавались на шлейфовый осциллограф, с помощью которого записывались их показания.

При проведении опытов после появления скачка температуры стенки в момент возникновения кризиса теплообмена проводились измерения следующих величин: температуры t^* и давления P^* температуры t_1 и давления P_1 , давления P_2 на выходе из рабочего участка, расхода жидкости G , силы тока J и падения напряжения U на экспериментальном участке. Массовое паросодержание в месте возникновения кризиса теплообмена определялось из уравнения теплового баланса:

$$x = x_0 + \frac{Q'_{\text{эл}} - \Delta Q}{rG} \qquad (1)$$

где x_0 - паросодержание на входе в экспериментальный участок; r - скрытая теплота парообразования, дж/кг; ΔQ - величина тепловых потерь, вт; $Q'_{\text{эл}}$ - количество внешнего тепла, подведенного к экспериментальному участку от начала обогрева до места возникновения кризиса:

$$Q'_{\text{эл}} = J^2 R'_0 \frac{\rho_t}{\rho_0} \qquad (2)$$

где R'_0 - электрическое сопротивление экспериментального участка от его начала до места возникновения кризиса при температуре 20°С; ρ_t и ρ_0 - соответственно удельные электрические сопротивления стали IX18H9T при 20° и температуре стенки.

<u>В четвертой главе</u> описываются опыты и обсуждаются полученные результаты. Опыты проводились при давлениях рабочей среды 2,9-16,7 Мн/м^2 и массовых расходах 750-3000 кг/м^2.с. На рис.3, в качестве примера, изображены зависимости удельных тепловых потоков в месте кризиса теплообмена от массового паро-

содержания при P = 6,9 Мн/м^2 и трех значениях ρW . Использованы данные, полученные на экспериментальном участке № I (ε =3). На этом же рисунке нанесены обобщающие зависимости $q = f(x)$ для условий кризиса теплообмена, полученные на трубах с равномерным тепловыделением. Можно видеть, что для каждого значения ρW имеются серии точек, которые группируются вокруг вертикальных прямых линий. Они, как и для равномерного тепловыделения отвечают условию $x''_{кр} = Const$, характеризуя кризис теплообмена второго рода для случая, когда находящиеся в ядре потока капли влаги не выпадают на микропленку. Аналогичную картину можно наблюдать при рассмотрении результатов опытов на экспериментальном участке с более высоким значением ε и при других давлениях. Взаимное попарное расположение вертикальных линий, отвечающих равномерному и неравномерному теплоподводу для одинаковых значений ρW свидетельствует, что на граничное паросодержание $x''_{кр}$ закон тепловыделения влияния не оказывает.

Обычно кризисы теплообмена, возникающие при паросодержаниях, меньших $x''_{кр}$, принято относить к кризису теплообмена первого рода. Если следовать этому положению и в данном случае, то следует признать, что значения $q_{кр}$ при косинусоидальном теплоподводе по длине трубы оказываются в несколько раз более низкими, чем при $q = Const$ (рис.3). Этот факт является справедливым и для других давлений.

Анализ опытных данных позволил установить, что если максимальное значение удельного теплового потока q_{max} (в средней части трубы) не превышает некоторой величины $q_в$, то кризис теплообмена возникает при паросодержании $x''_{кр}$. $q_в$ представляет собой наибольшее значение удельного теплового потока, при котором возможно возникновение кризиса теплообмена второго рода в аналогичных условиях, но в трубе с равномерным тепловыделением (рис.I). При более же высоких q $(q > q_в)$ наблюдается кризис теплообмена первого рода при паросодержаниях $x'_{кр}$ более низких, чем $x''_{кр}$.

Таким образом возможность возникновения того или иного вида кризиса определяется соотношением удельных тепловых потоков q_{max} (в средней части трубы) и $q_в$.

Объяснение отмеченному явлению, естественно, можно найти при изучении закономерностей процессов, определяющих материальный баланс пристенной жидкой пленки.

Пленка утоняется в результате испарения, срыва капель с гребней возмущающих волн, а также уноса влаги с пузырьками пара, покидающими пленку (пузырьковый унос). С другой стороны, пленка может подпитываться каплями влаги, выпадающими на нее из ядра потока. Поскольку "расход" из пленки в обогреваемой трубе всегда превышает "приход", то пленка может полностью исчезнуть в пределах обогреваемого экспериментального участка, создавая таким образом условия для возникновения кризиса теплообмена.

К сожалению, пока отсутствуют достаточные сведения о количественной оценке результатов перечисленных процессов и это затрудняет анализ их суммарного эффекта. Чтобы ответить на интересующий нас вопрос, приходится делать предположение, что $q_в$ является нижней границей удельного теплового потока, при котором начинается пузырьковый унос жидкости из пленки.

Приняв указанное предположение, можно утверждать, что на участке $q > q_в$ появляется дополнительный фактор в виде пузырькового уноса влаги, который способствует более интенсивному истощению жидкой пленки, а значит и возникновению кризиса теплообмена при более низких по сравнению с $x_{кр}^{\circ}$ паросодержаниях $x_{кр}^{-}$. По мере дальнейшего увеличения q данный эффект будет проявляться все в большей мере, а паросодержание $x_{кр}^{-}$ будет соответственно уменьшаться.

Следует отметить, что в отличие от равномерного распределения q при косинусоидальном тепловыделении вдоль экспериментального участка значения удельных тепловых потоков при возникновении кризисов теплообмена первого и второго рода зависят не только от режимных параметров рабочей среды, но также и от положения сечения канала, в котором возникает кризис.

К сожалению, опыты со сколько-нибудь значительным смещением зоны кризиса теплообмена вглубь обогреваемой трубы трудно осуществить, поскольку с увеличением q одновременно возрастает до недопустимого значения (по условиям прочности ме-

талла) температура стенки. Мы обошли эту трудность путем смещения верхнего токоподводящего контакта на экспериментальном участке № 2 на 300 и 600 мм, образовав таким образом экспериментальные участки № 3 и 4. На рис.4 приведены результаты опытов.

Рассмотрим теперь рис.5, на котором изображены эпюры тепловыделения для экспериментальных участков № 1 и № 2, имеющих разные значения ε, но одинаковые $q_{max} = q_B$. Кризис теплообмена возникает в выходном сечении экспериментальных участков. Легко видеть, что с увеличением ε уменьшается значение удельного теплового потока при возникновении кризиса теплообмена второго рода $(q_{\ell 2} < q_{\ell 1})$. Иначе говоря, для косинусоидального закона тепловыделения положение верхней границы вертикального участка, отвечающего условию $x_{\ell p}^{c} = const$ (точки B^1 на рис.3) зависит не только от режимных параметров потока, но также и от параметра ε.

Но точка B^1 служит одновременно нижней границей линии A^1B^1 (рис.3), отвечающей уравнению $q_{кр} = f(x)$. Следовательно, становится очевидным, что и критические тепловые потоки при косинусоидальном законе тепловыделения зависят от параметра ε: с его увеличением (при постоянной длине экспериментального участка) они уменьшаются.

Полученные нами результаты опытов для наиболее высоких давлений свидетельствуют, что вертикаль на графике $q = f(x)$ может вырождаться. Это является следствием смещения при высоких давлениях нижних границ вертикальных участков графиков вверх (в сторону бо́льших q) и тем значительнее, чем больше ρW.

В то же время при косинусоидальном тепловыделении верхняя граница вертикального участка, как уже отмечалось, смещается вниз (в сторону ме́ньших q). Следовательно, при обобщении всей совокупности опытных точек расположение части их вдоль вертикали, могут и не быть ярко выражены.

<u>В пятой главе</u> на основании вышеизложенного разрабатываются расчетные рекомендации кризиса теплообмена в кольцевом режиме течения в парогенерирующей трубе с неравномерным тепловыделением. При этом предполагается, что кризис теплообмена в

кольцевом режиме течения возникает при исчезновении пристенной жидкой пленки.

Как уже указывалось, в отсутствии пузырькового уноса кризис теплообмена возникает при достижении граничного паросодержания $x_{гр}^{o}$, в то время как при наличии интенсивного пузырькового уноса граничное паросодержание уменьшается и его значение можно определить следующим выражением

$$x_{гр}^{-} = x_{гр}^{o} - AD\int_{z_1}^{z_{кр}} F(q)dz \qquad (3)$$

Здесь $F(q)$ является функцией, характеризующей пузырьковый унос жидкости с пленки. Нижний предел интегрирования z_1 является минимальной координатой, которая удовлетворяет одновременно двум условиям:

$$x(z_1) \geq x_к \;;\; q(z_1) \geq q_в \;, \qquad (4)$$

где $x_к$ - паросодержание, при котором начинается кольцевой режим течения.

Для определения граничного паросодержания $x_{гр}^{-}$ в работе сделана попытка использовать опытные данные, полученные при равномерном тепловыделении, для которых составлены достаточно надежные рекомендации. В этом случае $x_{гр}^{-}$ можно записать в следующем виде:

$$x_{гр}^{-} = \begin{cases} x_{гр}^{o} - B(q-q_в) & \text{, если } q > q_в \\ x_{гр}^{o} & \text{, если } q \leq q_в \end{cases} \qquad (5)$$

Здесь $B = tg\alpha$, где α - угол наклона между вертикалью и наклонной прямой, обобщающей экспериментальные точки при равномерном тепловыделении (рис.I).

С учетом уравнения теплового баланса путем математических выкладок из (4), (5) получаем выражение для функции $F(q)$, определяющей пузырьковый унос

$$F(q) = \begin{cases} \dfrac{B(q-q_в)q}{A[x_{гр}^{o} - x_к - B(q-q_в)]} & \text{, если } q > q_в \\ 0 & \text{, если } q \leq q_в \end{cases} \qquad (6)$$

Далее учитывая, что

$$x_{кр}^{\circ} - \frac{\pi D}{A}\int_{z_1}^{z_{кр}} F(q)dz = x_0 + \frac{\pi D}{A}\int_{0}^{z_{кр}} q(z)dz = x_к + \frac{\pi D}{A}\int_{z_к}^{z_{кр}} q(z)dz \,, \qquad (7)$$

получим условие возникновения кризиса теплообмена

$$\frac{\pi D}{A(x_{кр}^{\circ} - x_к)}\int_{z_к}^{z_{кр}} [q + AF(q)]dz = 1 \,, \quad если \quad x_0 < x_к$$

$$\frac{\pi D}{A(x_{кр}^{\circ} - x_0)}\int_{0}^{z_{кр}} [q + AF(q)]dz = 1 \,, \quad если \quad x_0 \geq x_к \qquad (8)$$

Из уравнения (8) с учетом (6) находим сечение возникновения кризиса теплообмена $z_{кр}$. Причем, если на рассматриваемом участке, где имеется тепловыделение $q > 0$ решение уравнения (8) не реализуется, то это говорит об отсутствии кризиса при заданном $q(z)$. Уравнения (8) численно интегрировались на ЭВМ М-222 для различных экспериментальных участков. Использовались наши собственные опыты на четырех участках, а также опыты других авторов, в которых проводилась фиксация места возникновения кризиса.

Как показал анализ экспериментальных данных, наибольшую сложность и неточность при исследовании кризиса теплообмена при косинусоидальном тепловыделении представляет фиксация места возникновения кризиса. Неоднозначность в определении места возникновения кризиса особенно сильно сказывается на результатах исследования при большом градиенте распределения теплового потока по длине канала. В этой связи при обработке экспериментальных данных желательно использовать в качестве основного параметра такую режимную характеристику, которая бы не была связана с параметрами потока в месте возникновения кризиса теплообмена. На наш взгляд такой характеристикой может служить максимальный тепловой поток q_{max} (q_0) в центре трубы, пропорциональный подведенной мощности ко всему экспериментальному участку. То есть в данном случае расчет сводится к определению

$q_{\kappa p}$ из условий (8), при котором при данных входных условиях и геометрии канала возникает кризис теплообмена. Результаты расчета представлены на рис.6, где дается сравнение расчетных и экспериментальных значений $q_{\kappa p}$, реализующих кризис на обогреваемом участке. Можно видеть, что расчетные значения $q_{\kappa p}$ совпадают с экспериментальными с точностью ±I0%. Следовательно, с точностью ±I0% расчет по описанной методике предсказывает факт возникновения кризиса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Проведены систематические измерения режимных параметров характеризующих кризисы теплообмена в условиях кольцевой структуры потока в парогенерирующей трубе (диаметром 8 мм и длиной I800 мм) при косинусоидальном законе тепловыделения. Диапазон давлений составлял: 2,9–I6,7 Мн/м^2, массовых расходов: 750–3000 кг/м^{2}с.

2. Выявлены важные особенности кризисов теплообмена в парогенерирующих трубах при косинусоидальном законе тепловыделения. Они проливают дополнительный свет на физическую природу кризисных явлений.

3. В парогенерирующей трубе с косинусоидальным законом тепловыделения так же, как и при равномерном тепловыделении, могут возникать два вида кризисов теплообмена. Один из них (кризис теплообмена первого рода) может иметь место в тех случаях, когда хотя бы на части трубы удельный тепловой поток превышает величину $q_{в}$, равную максимальному значению q при возникновении кризиса теплообмена второго рода в аналогичных условиях, но при равномерном тепловыделении по длине канала. Значения $q_{кр}$ оказываются существенно более низкими, чем в трубах с равномерным подводом тепла.

Второй вид кризиса теплообмена (второго рода) в трубе с косинусоидальным законом тепловыделения имеет то же происхождение и те же значения граничных паросодержаний $x_{гр}^{\circ}$, что и в трубе с равномерным тепловыделением.

4. Значения критических тепловых потоков при косинусоидальном законе тепловыделения зависят не только от режимных параметров опыта, но также и от расположения того сечения трубы, в котором фиксируется кризис теплообмена первого рода.

5. Определено влияние степени неравномерности и длины обогреваемой трубы на удельные тепловые потоки в момент возникновения кризиса теплообмена.

6. Разработан полуэмпирический метод расчета параметров, характеризующий кризисы теплообмена при косинусоидальном законе тепловыделения. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, в том числе других авторов.

7. Разработка расчетных рекомендаций, базирующихся на определении подведенной мощности, может быть признана приемлемой лишь в том случае, если одновременно имеется возможность нахождения места расположения кризиса теплообмена и локального удельного теплового потока в этом месте.

8. Исследования кризиса теплообмена при кольцевом режиме течения двухфазной среды и косинусоидальном тепловыделении по длине трубы, должно быть продолжено в направлении изучения процессов теплообмена между жидкой пленкой и ядром потока, уточнения механизма кризиса теплообмена первого рода, выяснения условий возникновения кипения жидкости в тонких пленках.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. В.Е.Дорощук, Рс.И.Нигматулин. Исследование влияния неравномерности тепловыделения по длине канала на кризис теплообмена при течении двухфазных потоков в дисперсно-кольцевом режиме течения. Сб. "Физика аэродисперсных систем", Киев, 1976, вып.14. с.128.

2. Рс.И.Нигматулин. Экспериментальное исследование влияния неравномерности тепловыделения по длине канала на кризис теплообмена при течении двухфазных потоков. Сб."Вопросы газотермодинамики энергоустановок", Харьков, ХАИ, 1975, вып.2, с.117-121.

3. Рс.И. Нигматулин. Исследование кризиса теплообмена при неравномерном тепловыделении. Сб."Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах", Новосибирск, ИТ СО АН СССР, 1977, с.300-312.

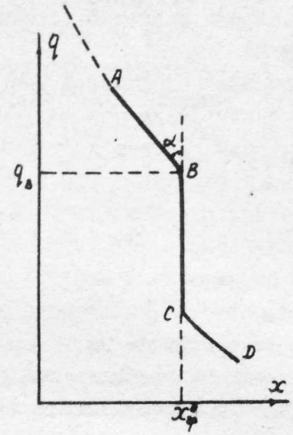


Рис.1. Кризисы теплообмена в парогенерирующей трубе. x_{φ}^{o} - граничное паросодержание; $q_{1в}$ - удельный тепловой поток на границе между кризисами теплообмена первого и второго рода.

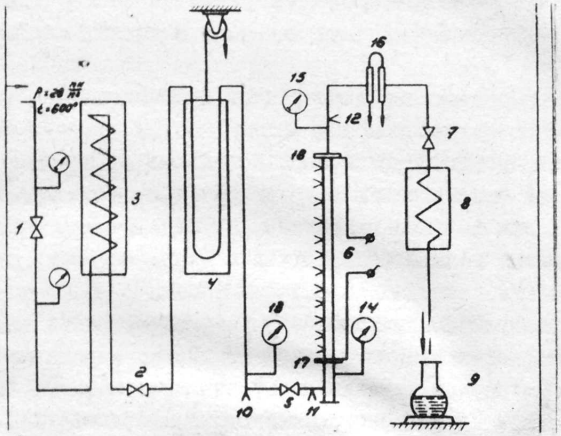


Рис.2. Схема экспериментальной установки
1 - главный запорный вентиль; 2,5,9 - дроссельные вентили; 3,4,8 - теплообменники; 6 - экспериментальный участок; 9 - мерная колба; 10,11,12 - термопары; 13,14,15 -манометры; 16 - токоизолирующий фланец; 17,18 - токоподводящие контакты.

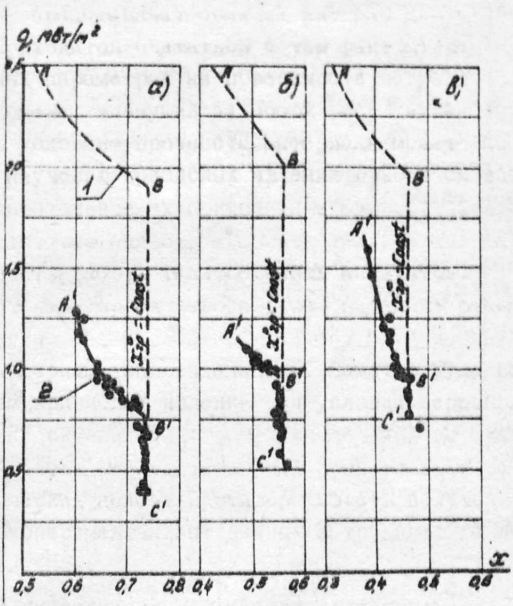


Рис.3. Зависимость $q = f(x)$ для кризисных условий при $P = 6,9$ Мн/м^2

а/ $\rho W = 1000$ кг/м^{2}с; б/ $\rho W = 1500$ кг/м^{2}с;
в/ $\rho W = 2000$ кг/м^{2}с

1 - равномерное тепловыделение; 2 - косинусоидальное тепловыделение, участок № 1 /$\varepsilon = 3$/.

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

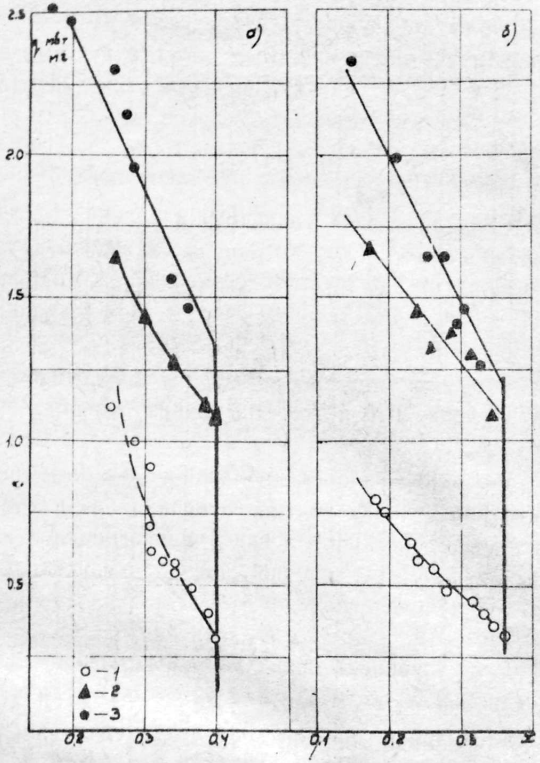


Рис.4. Зависимость $q = f(x)$ для экспериментальных участков №№ 2,3,4 при $P = 9{,}8$ Мн/м^2
а/ $\rho w = 1500$ кг/м^{2}с б/ $\rho w = 2000$ кг/м^{2}с
1 - участок № 2; 2 - участок № 3; 3 - участок №4.

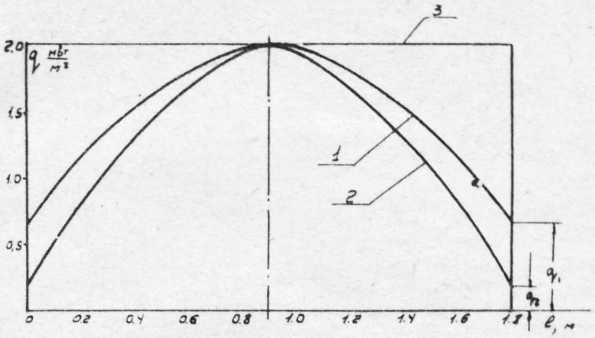


Рис.5 . Эпюры тепловыделения для экспериментальных участков с разными ε при $P = 6{,}9$ Мн/м^2 ; $\rho W = 1500$ кг/м^2 с и одинаковыми значениями q_{max}
1 - $\varepsilon = 3$; 2 - $\varepsilon = 11$; 3 - $\varepsilon = 1$

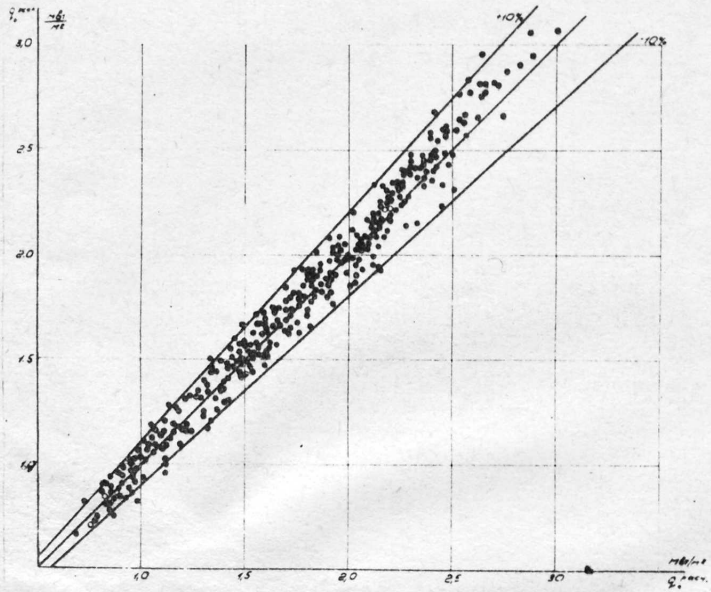


Рис.6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений $P = 6{,}9 \div 14{,}7$ Мн/м^2 ; $\rho W = 750 \div 2000$ кг/м^2 с

Отдел научно-технической информации
Техн. редактор Л.Г. Родина

Л.- 80808 Подп. к печ. 28.XII.77.
I,0 уч.-изд.л. Заказ № I034. Тир. I00 экз.
Ротапринт ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского