

На правах рукописи

Тхей Лвин У

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН
И КРИЗИС КИПЕНИЯ ВОДЫ
В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ИЗМЕНЕНИЯ
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Автор:

Москва 2007

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, заведующий кафедрой МИФИ (ГУ)

Харитонов В. С.

Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук,
заведующий лабораторией ИТФ СО РАН

Павленко А. Н.

кандидат физико - математических наук,
старший научный сотрудник ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Евдокимов И. А.

Ведущая организация:

Московский энергетический институт (технический университет)

Защита состоится “16” мая 2007 г. в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.130.04 в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете) по адресу:

115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “____” апреля 2007 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,

д. ф.-м. н., профессор

Е.М. Кудрявцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Протекание кризисных явлений при нестационарном нагреве имеет ряд особенностей, изучение которых необходимо как для развития общей теории кризиса теплообмена при кипении, так и для решения ряда практических задач, связанных с анализом работоспособности элементов теплообменного и энергетического оборудования в условиях импульсного энерговыделения.

За последние годы выполнен ряд работ по изучению нестационарного теплообмена и кризиса кипения воды при быстром изменении мощности тепловыделения. Эти работы продемонстрировали сложность процессов теплообмена, развивающихся в жидкости вблизи теплоотдающей поверхности, а также различие подходов к представлению и обобщению данных. Известные физические модели нестационарного кризиса кипения имеют ограниченную область применения и не могут быть обоснованно использованы для построения общей методики расчета динамических характеристик теплообмена при изменении во времени тепловой нагрузки. Также отсутствуют систематические экспериментальные данные по влиянию на нестационарный теплообмен и кризис кипения недогрева жидкости до температуры насыщения, начального тепловыделения и ряда других режимных параметров.

С учетом отмеченных обстоятельств по-прежнему сохраняет свою актуальность изучение особенностей и основных фундаментальных характеристик нестационарных тепловых процессов на поверхности нагрева при быстром увеличении мощности энерговыделения.

Целью диссертационной работы является исследование нестационарной теплоотдачи и кризиса кипения воды в условиях быстрого изменения мощности тепловыделения и развитие на этой основе моделей теплообмена в кипящей жидкости, учитывающих влияние различных режимных факторов на характеристики нестационарных тепловых процессов, происходящих на теплоотдающей поверхности.

Научная новизна диссертационной работы:

- В опытах с квазистационарным нагревом установлено, что критическая плотность теплового потока при кипении воды на горизонтальной цилиндрической поверхности малого диаметра меньше, чем для нагревателей большого диаметра, однако наблюдается более сильный ее рост с увеличением недогрева жидкости до температуры насыщения.
- Показано, явление кризиса кипения воды в условиях быстрого изменения мощности тепловыделения в нагреваемой стенке можно охарактеризовать совокупностью критических параметров: плотностью теплового потока в жидкость $q_{кр}$, температурным напором $\Delta T_{кр}(\tau_{кр})$ и интервалом времени от момента начала роста нагрузки до достижения кризиса $\tau_{кр}$.
- Установлена взаимосвязь между критическими параметрами. При относительно невысоких нагрузках (для насыщенной воды $q_{кр1} \leq q_{кр} \leq 1,5 \cdot q_{кр1}$) величина $\tau_{кр}$ превышает время роста парового пузыря до момента его отрыва. В этом случае механизм кризиса связан с неустойчивостью пристенного двухфазного слоя, паросодержание в котором возрастает вплоть до момента наступления кризиса. Однако с увеличением набрасываемой тепловой нагрузки ($q_{кр} \geq 1,5 \cdot q_{кр1}$) величина $\tau_{кр}$ начинает резко сокращаться. При этом кризис наступает в результате слияния в сплошную паровую пленку паровых пузырей без их отрыва от теплоотдающей поверхности.
- Показано, что нестационарный критический тепловой поток увеличивается с ростом недогрева жидкости. Однако при высоких уровнях набрасываемой мощности такая зависимость не наблюдается.
- Получены новые экспериментальные данные по влиянию на характеристики нестационарного кризиса кипения начальной нагрузки нагревателя перед набросом дополнительной мощности. Установлено, что длительность режимов теплообмена, предшествующих кризису,

определяется гидродинамической и тепловой обстановкой вблизи нагревателя.

- Развита физические модели кризиса кипения воды при нестационарном нагреве, в которых учтены особенности протекания кризисных явлений в недогретой до температуры насыщения воде, а также влияние начальной тепловой нагрузки нагревателя.
- Разработана методика расчета динамических характеристик процесса теплообмена в метастабильной области, основанная на аппроксимации теплового потока от нагревателя в жидкость с учетом параметров, определяющих закипание воды и кризис теплообмена.

Практическая значимость работы определяется важностью полученных результатов для уточнения и развития существующих моделей нестационарного кризиса теплообмена. Помимо этого разработанные расчетные рекомендации и модели могут быть использованы в методиках анализа динамических режимов работы элементов энергетического оборудования с целью определения критериев безопасной эксплуатации этого оборудования в условиях импульсных тепловых нагрузок.

Достоверность полученных результатов подтверждается отработкой методики измерений в тестовых экспериментах, оценками величин погрешностей измерений, сравнением экспериментальных и теоретических результатов с данными других авторов.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- Экспериментальная зависимость плотности первого критического теплового потока от недогрева воды до температуры насыщения и диаметра нагревателя.
- Новые опытные данные по характеристикам нестационарного кризиса кипения насыщенной и недогретой воды в условиях ступенчатого увеличения мощности нагрева и при наличии начального тепловыделения в нагревателе.

- Физические модели кризиса кипения воды при быстром возрастании мощности тепловыделения, учитывающие особенности протекания кризисных явлений в насыщенной и недогретой до температуры насыщения воде, а также влияние начальной тепловой нагрузки нагревателя.
- Методика расчета параметров кризиса кипения при нестационарном нагреве, позволяющую описать тепловой режим до момента перехода к пленочному кипению.

Вклад автора. Изложенные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при его участии.

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертационной работе, были представлены на Четвертой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск «Гидропресс» 23-26 мая 2005 года), XXVIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 12-14 октября 2005 года), Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2006), Научных сессиях МИФИ в 2006 и 2007 годах.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 49 рисунков и библиографию, включающую 93 наименования. Полный объем диссертации – 140 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована цель работы, отмечена новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведен обзор работ по нестационарному кризису теплообмена. Теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей протекания тепловых процессов при нестационарных

тепловых воздействиях оказывается существенно более сложным, по сравнению со случаем стационарного нагрева, из-за появления в таких задачах дополнительного параметра – времени. В нестационарных условиях наступление кризиса теплообмена начинает определять совокупность параметров (критический тепловой поток, перегрев поверхности, интервал времени до момента наступления кризиса), а не только величина критического теплового потока. Возникает также неопределенность в определении величины критического теплового потока в нестационарных условиях: вводятся понятия минимального критического теплового потока и нестационарного критического теплового потока. Анализ опубликованных российских и зарубежных работ, посвященных упомянутым вопросам, позволил сформулировать следующие выводы:

- В настоящее время имеется достаточно большое число работ, посвященных нестационарному кризису кипения жидкостей при быстром изменении тепловыделения в нагревателе. В большинстве опубликованных работ по нестационарному кризису кипения воды исследовалось влияние на величину нестационарного критического теплового потока темпа нарастания тепловой нагрузки при ее изменении по линейному или экспоненциальному закону. Исследование кризиса теплообмена в воде при ступенчатом увеличении мощности тепловыделения, характеристики которого важны для построения моделей нестационарного кризиса кипения, практически не проводились.
- Не изучена взаимосвязь между нестационарным критическим тепловым потоком и интервалом времени перехода к пленочному режиму кипения воды. Данные по зависимости перегрева теплоотдающей поверхности от отводимого теплового потока в момент наступления нестационарного кризиса теплоотдачи в литературе практически не представлены.

- Отсутствуют систематические данные по влиянию различных режимных факторов: недогрева жидкости до температуры насыщения, начальной тепловой и гидродинамической обстановки на характеристики нестационарных тепловых процессов.
- Большинство теоретических результатов по определению характеристик нестационарного кризиса теплообмена получено применительно к криогенным жидкостям. Во всех теоретических работах предполагалось, что тепловой поток, отводимый в жидкость равен генерируемому в нагревателе.

На основании сделанных выводов поставлены задачи исследования.

Во второй главе диссертации описана схема экспериментальной установки (рис. 1), методика проведения опытов и оценка погрешностей.

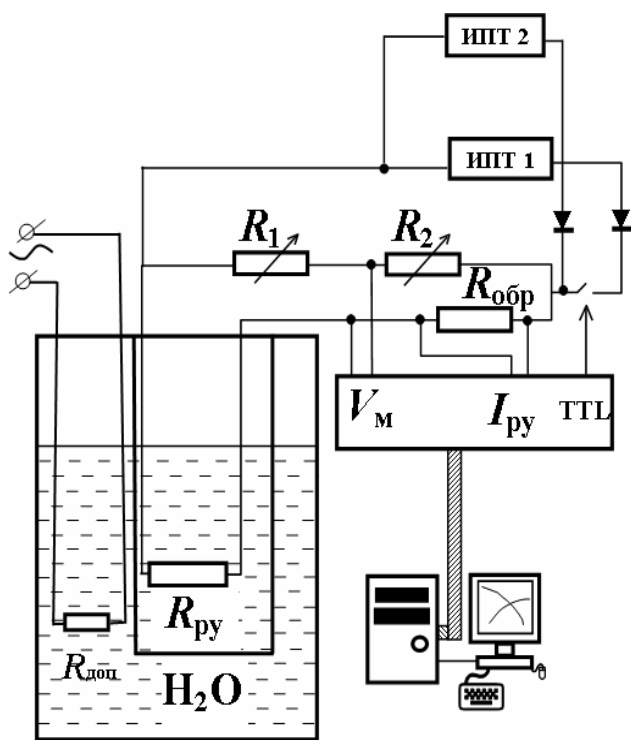


Рис. 1. Схема электропитания рабочего участка с приборами для регистрации параметров нестационарных тепловых процессов: $R_{ру}$ - рабочий участок; $R_{обр}$ - образцовое сопротивление; R_1, R_2 - переменные сопротивления, $R_{доп}$ - дополнительный нагреватель

Основными элементами установки являются:

- заполненный химически очищенной водой (стандарт ОСТ 95 10134 – 91) термостатируемый стеклянный сосуд объемом около 3 л с рабочим участком и дополнительным нагревателем;
- система измерения температуры воды T_0 в термостате;
- система измерения параметров нестационарных тепловых процессов;
- система электропитания рабочего участка.

Рабочий участок – тепловыделяющий элемент – представляет собой платиновую проволоку диаметром $d = 100$ мкм. Тепловыделяющий элемент одновременно служил и термометром сопротивления. Все измерения выполнялись с рабочим участком, расположенным горизонтально в большом объеме воды при атмосферном давлении.

В опытах со стационарным подводом тепла измерения производились по стандартной четырехпроводной схеме. При исследовании нестационарных режимов теплообмена в условиях ступенчатого наброса мощности импульс формировался тиристорным ключом, замыкавшим цепь питания рабочего участка. Плотность теплового потока $q(\tau)$ на поверхности нагревателя рассчитывалась по уравнению теплового баланса.

Разность между средней температурой платиновой проволоки и температурой воды измерялась с погрешностью около 2 К. Погрешность при определении плотности теплового потока q и коэффициента теплоотдачи α в стационарных измерениях составила не более 5 % и 20 % соответственно. Относительная погрешность при измерении интервалов времени была менее 1 %. Согласно проведенным оценкам суммарная погрешность при определении набрасываемой плотности теплового потока $q_n(\tau)$ составила не более 15 %.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию кризиса теплообмена при кипении воды.

Знание закономерностей теплоотдачи в установившихся условиях необходимо при анализе процесса нестационарного теплообмена. Поэтому была выполнена серия экспериментов по исследованию кипения воды в условиях стационарного теплоподвода ($d q/d \tau \rightarrow \infty$).

На рис. 2 представлена кривая кипения насыщенной воды под атмосферным давлением, полученная при медленном увеличении тепловой нагрузки нагревателя от нулевого уровня. По мере роста теплового потока, рабочий участок охлаждается естественной конвекцией (кривая АВ). При достижении перегрева закипания (точка В) на теплоотдающей поверхности

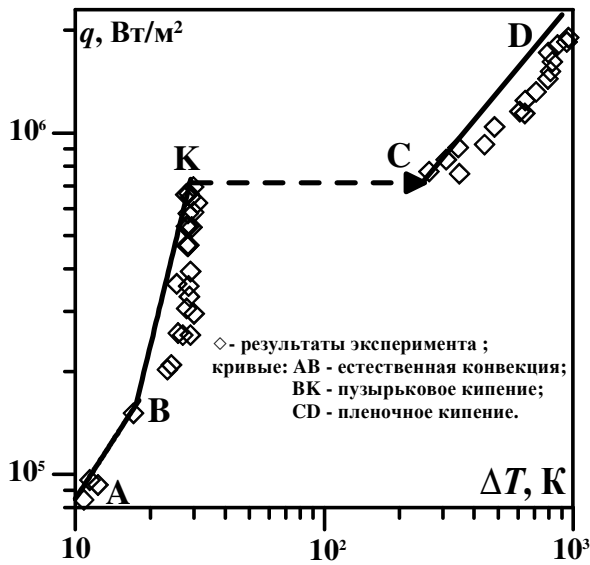


Рис. 2. Кривая кипения насыщенной воды под атмосферным давлением

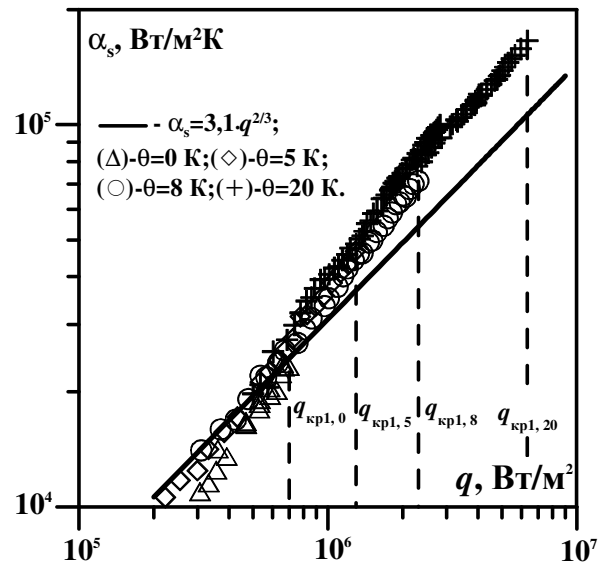


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных недогревов $\theta = T_s - T_{ж}$

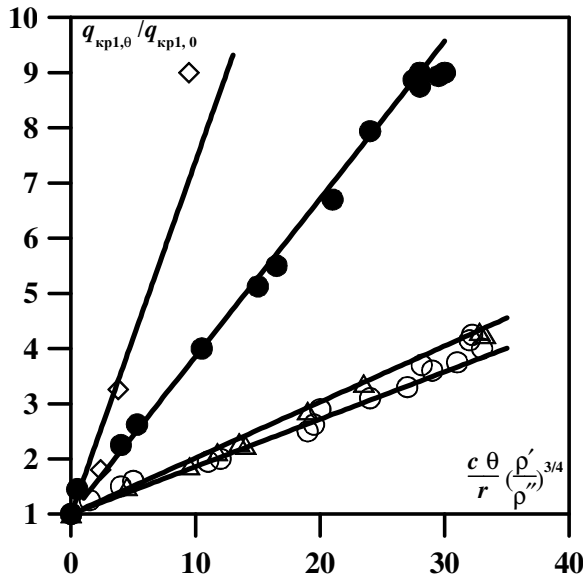


Рис. 4. Зависимость $q_{кр1}$ от недогрева воды под атмосферным давлением. Цилиндрические горизонтально ориентированные нагреватели:
 О - 3,2 мм, Δ - 0,5, ● - 0,2
 (Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С., 1964),
 ◇ - 0,1 (данные автора)

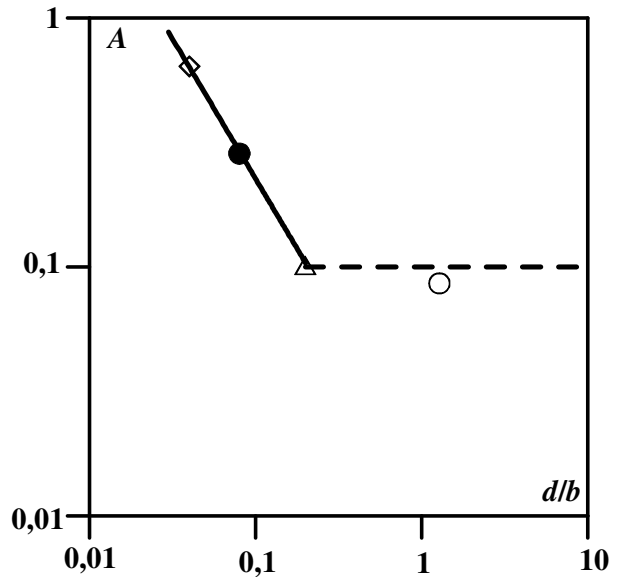


Рис. 5. Зависимость коэффициента A от относительного размера нагревателя:
 - - - - $A = 0,1$,
 — — — — $A = 0,017 \left(\frac{d}{b}\right)^{-9/8}$

образуются паровые пузыри. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки, приводит к тому, что температурный напор $\Delta T = T - T_s$ меняется по линии ВК. При достижении значения первого критического теплового потока происходил кризис пузырькового кипения, который сопровождался значительным ростом температуры нагревателя (КС). Если, не доходя, до значения $q_{кр1}$ начать уменьшать тепловой поток q , то перегрев поверхности меняется по той же линии KB, при этом гистерезиса кривой кипения в области пузырькового кипения воды не наблюдается.

На следующем рисунке (рис. 3) приведены данные по зависимости коэффициента теплоотдачи от теплового потока при пузырьковом кипении воды под атмосферным давлением для различных значений недогрева жидкости до температуры насыщения θ . Как видно из рисунка, недогрев практически не влияет на коэффициент теплоотдачи рассчитанный по перегреву теплоотдающей стенки относительно температуры насыщения $\alpha_s = q / (T_n - T_s)$.

На рис. 4 в безразмерных координатах представлены зависимости критического теплового потока от недогрева воды для горизонтально ориентированных цилиндрических нагревателей. Полученные экспериментальные данные подтверждают линейную зависимость $q_{кр1}$ от недогрева жидкости (Кутателадзе С.С., 1979):

$$q_{кр1,\theta} = 1 + A \frac{c\theta}{r} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{3/4}, \quad (1)$$

где c , r , ρ' , ρ'' - теплоемкость, скрытая теплота парообразования, плотность насыщенной жидкости и пара, соответственно. При этом $A \approx 0,1$ для нагревателей с большим относительным диаметром $d/b > 1$ ($b = \sqrt{\sigma / g(\rho' - \rho'')}$ – постоянная Лапласа, а σ - коэффициент поверхностного натяжения). В случае цилиндрических нагревателей с малым параметром $d/b < 1$ коэффициент A начинает зависеть от диаметра нагревателя d .

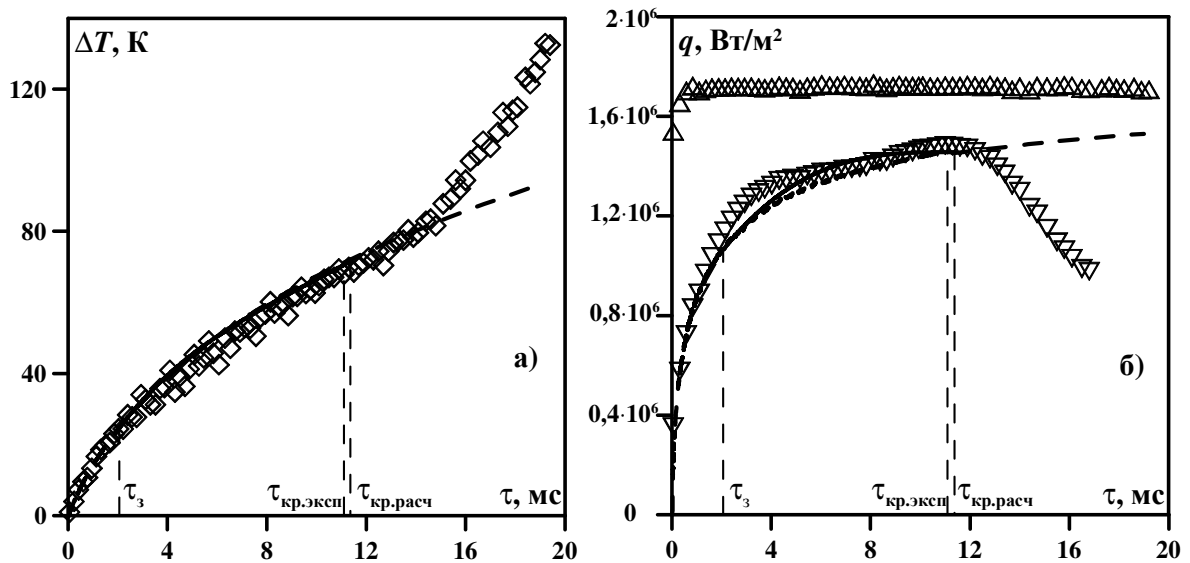


Рис. 6. Зависимость перегрева нагревателя ΔT (а) и плотности теплового потока q (б) от времени τ при $q_n = 1,7 \cdot 10^6$ Вт/м²: \diamond - ΔT , ∇ - q , \triangle - q_n - данные эксперимента, - - - - расчет по уравнениям нестационарной теплопроводности, — - — - расчет по уравнениям (2) – (6) модели

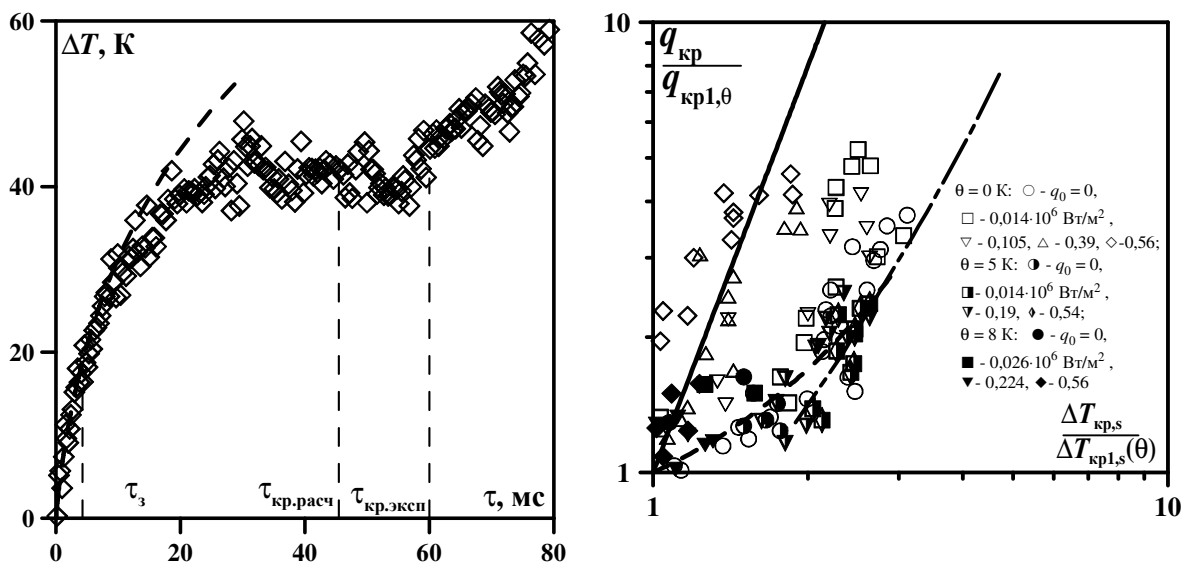


Рис. 7. Зависимость перегрева нагревателя ΔT от времени τ при $q_n = 0,8 \cdot 10^6$ Вт/м² (обозначения те же, что и на рис. 6)

Рис. 8. Нестационарный критический тепловой поток $q_{кр}/q_{кр1,\theta}$ в зависимости от критического перегрева стенки $\Delta T_{кр,s}/\Delta T_{кр1,s}(\theta)$:
 — - — - зависимость для стационарного режима кипения,
 - - - - расчет по формуле (2),
 — . — . — - расчет по уравнениям (2 - 6) с использованием $q(\tau)$, $\Delta T(\tau)$ найденных из решения сопряженной задачи теплопроводности

Автором было получено эмпирическое соотношение для расчета коэффициента A для тонких цилиндрических нагревателей (рис. 5.).

Исследование характеристик нестационарного кризиса кипения было выполнено в условиях резкого увеличения тепловой нагрузки. В первой серии экспериментов измерения выполнены в насыщенной воде при атмосферном давлении. На рис. 6 и рис. 7 приведены некоторые типичные экспериментальные зависимости перегрева нагревателя $\Delta T(\tau)$ и набрасываемого теплового потока $q_n(\tau)$ от времени. При тепловых нагрузках q_n значительно превышающих $q_{кр1}$ (рис. 6) возникает режим, который можно классифицировать как режим теплообмена при метастабильном пузырьковом кипении. Перегрев стенки непрерывно и плавно увеличивается. Отводимый тепловой поток q монотонно растет, достигает в некоторый момент времени своего максимального значения и затем начинает убывать, вследствие перехода к пленочному кипению (рис. 6 б). Параметры в данной точке – тепловой поток $q_{кр}$, температурный напор $\Delta T_{кр}$, интервал времени $\tau_{кр}$ – будем рассматривать как набор параметров, определяющих кризис кипения при нестационарном нагреве. Когда набрасываемая мощность лишь немного выше $q_{кр1}$ ($q_{кр1} \leq q_n \leq 1,5 q_{кр1}$), наблюдаются значительные пульсации температуры нагревателя (рис. 7), вызванные, по-видимому, сильным перемешиванием жидкости в пристенном слое отрывающимися от поверхности нагрева паровыми пузырями. Продолжительность таких режимов может составить значительную величину от нескольких десятков миллисекунд до нескольких секунд. Плотность теплового потока на поверхности нагрева в течение всего периода метастабильного пузырькового кипения практически совпадает с набрасываемой тепловой нагрузкой. Момент наступления кризиса $\tau_{кр}$ определялся по резкому росту перегрева теплоотдающей поверхности.

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние недогрева воды до температуры насыщения на характеристики нестационарного кризиса теплообмена. В опытах недогрев воды θ при атмосферном давлении

составлял 5 и 8 К. Анализ полученных в этих экспериментах данных позволил заключить, что закономерности переходных процессов в насыщенной и недогретой воде качественно совпадают. При этом вся совокупность данных по зависимости нестационарного критического теплового потока от критического перегрева может быть описана уравнением вида (рис. 8):

$$\frac{q_{кр}}{q_{кр1,\theta}} = \exp\left(m\left(\frac{\Delta T_{кр,s}}{\Delta T_{кр1,s}(\theta)} - 1\right)\right). \quad (2)$$

В этом уравнении $\Delta T_{кр1,s}(\theta)$ критический температурный напор, соответствующий величине $q_{кр1,\theta}$, все перегревы рассчитаны относительно температуры насыщения, $m \approx 0,53$.

Было выполнено исследование влияния начального уровня тепловыделения перед набросом дополнительной мощности на характеристики нестационарного кризиса кипения воды. В этих опытах тепловая нагрузка нагревателя резко увеличивалась от некоторого заданного начального уровня q_0 до q_n . Всего было проведено три серии экспериментов (с насыщенной и недогретой водой с $\theta = 5$ К и 8 К) при нескольких значениях q_0 (в интервале от 0,014 до $0,56 \cdot 10^6$ Вт/м²), соответствующих различным начальным режимам теплосъема: естественной конвекции ($q_0 < q_{нк}$), начала кипения ($q_0 \approx q_{нк}$) и развитого кипения ($q_0 > q_{нк}$). В любых условиях, если в результате наброса дополнительной мощности суммарная нагрузка нагревателя превышала стационарный критический тепловой поток, то режим пузырькового кипения воды перед кризисом теплообмена был всегда неустойчив, и спустя некоторый промежуток времени начинался быстрый рост температуры теплоотдающей стенки (кризис теплообмена при нестационарном нагреве).

При высоких значениях начальной тепловой нагрузки q_0 ($q_0 > q_{нк}$) и близких q_n параметры нестационарного кризиса кипения $q_{кр}$, $\Delta T_{кр}$, $\tau_{кр}$ могут сильно изменяться в зависимости от структуры и паросодержания кипящего

пристенного слоя в момент времени, непосредственно предшествующий набросу мощности. Этот вывод подтверждается результатами экспериментов, в которых применялось фотографирование процесса кипения на теплоотдающей поверхности до момента наброса. Показано, что при одинаковом уровне начального тепловыделения доля поверхности, занятая паром s_0 , может сильно различаться, так при $q_0 = 0,56 \cdot 10^6$ Вт/м² параметр s_0 принимает значения от 0,15 до 0,4.

В целом анализ представленных данных позволяет заключить, что при небольших значениях начальной тепловой нагрузки ($q_0 < q_{нк}$) теплообмен на исходной стадии процесса оказывает мало заметное влияние на параметры нестационарного кризиса кипения, в то время как развитое пузырьковое кипение с отрывом паровых пузырей от поверхности нагревателя при больших начальных нагрузках ($q_0 > q_{нк}$) приводит к значительному уменьшению как критического интервала времени, так и критического теплового потока (рис. 9).

В четвертой главе физические модели развития нестационарного кризиса кипения в условиях быстрого изменения тепловой нагрузки. Весь нестационарный процесс рассматривается как последовательно сменяющие друг друга стадии. Первая стадия – стадия нестационарной теплопроводности до момента закипания (длительностью τ_3). Вторая стадия – стадия метастабильного кипения с последующим переходом к пленочному кипению вследствие слияния растущих на поверхности паровых пузырей в паровую пленку (длительностью $\tau_{сл}$).

Перегрев стенки $\Delta T(\tau)$ и тепловой поток в жидкость $q(\tau)$ на первой стадии процесса рассчитываются из совместного решения уравнений нестационарной теплопроводности, записанных для нагревателя с изменяющимся во времени энерговыделением $q_n(\tau)$ и жидкости. Перегрев поверхности относительно температуры насыщения $\Delta T_{3,s}$ при закипании воды под атмосферным давлением от теплового потока в жидкость в этот же

момент времени определяется в модели по уравнению (Ebrardt J., Vernier Ph., 1982)

$$\Delta T_{3,s} = 0.048 q_3^{0.45}, \quad (3)$$

которое хорошо описывает известные экспериментальные данные (рис. 10). Затем по определенным таким образом значениям $\Delta T_{3,s}$, q_3 и интервала времени до закипания жидкости τ_3 находилась производная $q'_3 = \frac{dq(\tau_3)}{d\tau}$, которая необходима для дальнейших расчетов по модели.

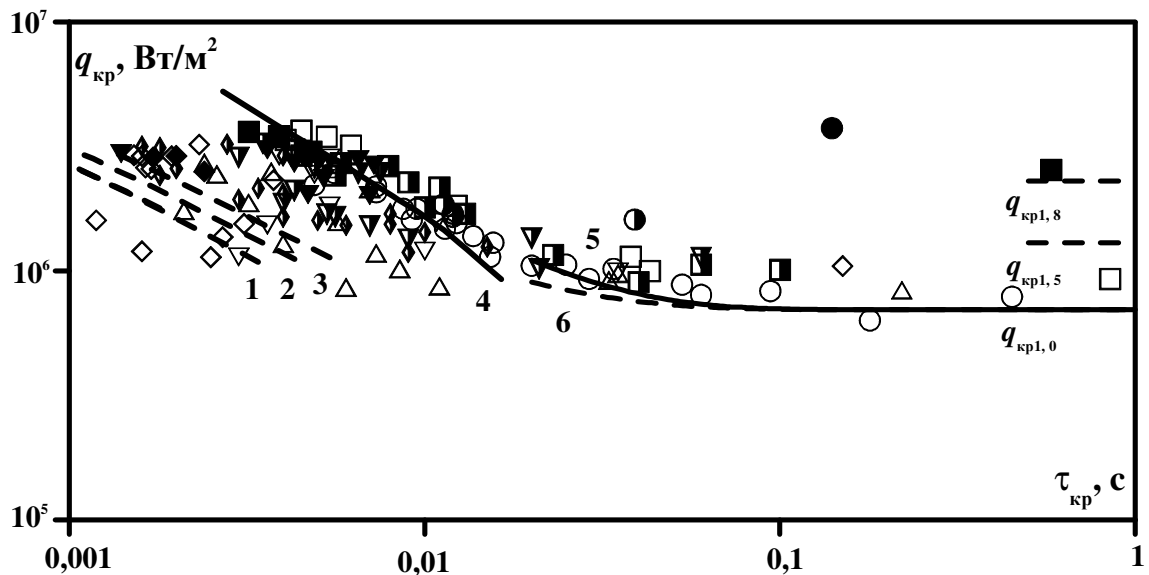


Рис. 9. Влияние нестационарного критического теплового потока на величину интервала времени до начала перехода к пленочному кипению, обозначения те же, как на рис. 8: 1 - расчет по формуле (7) при $s_0 = 0,2$, 2 - при $s_0 = 0,15$, 3 - при $s_0 = 0,1$, 4 - расчет по формулам (2 - 6), 5 - расчет по формуле (8), $\phi_0 = 0$, 6 - при $\phi_0 = 0,5$

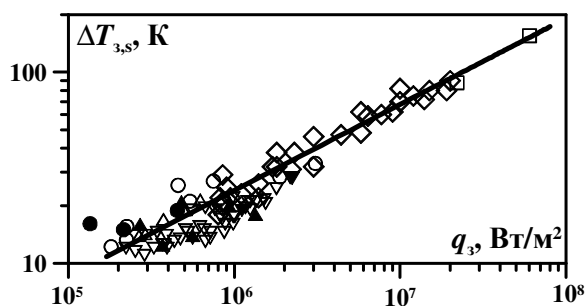


Рис. 10. Зависимость перегрева нагревателя $\Delta T_{3,s}$ от теплового потока q_3 при закипании насыщенной и недогретой воды под атмосферным давлением: ∇ - Rosenthal M.W., 1957, \circ - Lurie H., Johnson H.A., 1962, \blacktriangle - Tachibana F., Akiyama M., Kawamura H., 1968, \bullet - Johnson H.A., 1971, ∇ - Сакураи, Сиоцу, 1977, \triangle - Нгем, Мерте, Винтер, Беер, 1981, \diamond - Ebrardt J., Vernier Ph., 1982, \square - Derewnicki K.P., 1985, — - уравнение (3)

Для расчета второй стадии нестационарного процесса и определения параметров кризиса $q_{кр}$, $\Delta T_{кр}$ и критического интервала времени $\tau_{кр}$ рассматриваются две модели. Первая модель применима в случае, когда плотность теплового потока $q_{кр}$ достаточно велика и нестационарный кризис теплоотдачи происходит до момента за малый промежуток времени, когда паровые пузыри не успевают оторваться от поверхности. В этом случае, для определения характеристик кризиса в насыщенной воде с нулевым уровнем начального тепловыделения необходимо решать систему уравнений (3 - 6):

$$q(\tau) = q_n(\tau) - \frac{d}{4}(c\rho)_n \frac{d(\Delta T(\tau))}{d\tau}; \quad (4)$$

$$q(\tau) = (q_{кр} - q_3) \left[(\xi - 2) \left(\frac{\tau - \tau_3}{\tau_{кр} - \tau_3} \right)^3 + (3 - 2\xi) \left(\frac{\tau - \tau_3}{\tau_{кр} - \tau_3} \right)^2 + \xi \left(\frac{\tau - \tau_3}{\tau_{кр} - \tau_3} \right) \right] + q_3; \quad (5)$$

$$\int_{\tau_3}^{\tau_{кр}} q(\tau) \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau - \tau_3}{\tau_{кр} - \tau_3} \right) \right) d\tau = \pi r \rho'' f(Ja) \sqrt{aI} \sqrt{\tau_{кр} - \tau_3}, \quad (6)$$

где $f(Ja) = 0,3 \cdot Ja + \sqrt{0,09Ja^2 + 12Ja}$, $Ja = \left(\frac{c_p \rho'}{\rho'' r} \right) \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{1}{\tau_{кр} - \tau_3} \cdot \int_{\tau_3}^{\tau_{кр}} (\Delta T(\tau)) d\tau \right)$,

$$\xi = \frac{q'_3 (\tau_{кр} - \tau_3)}{q_{кр} - q_3}, \quad I = \int_0^1 \sin \left(\frac{\pi x}{2} \right) \sqrt{1-x} dx \approx 0,357.$$

Уравнение (5) представляет собой полученную на основе анализа экспериментальных данных аппроксимацию теплового потока, отводимого в жидкость. Результаты расчета зависимостей $\Delta T(\tau)$ и $q(\tau)$ и параметров нестационарного кризиса кипения воды представлены на рис. 6.

Выполненное расчетное исследование показало, что в случае, когда перед набросом дополнительной мощности $q_n(\tau)$ в нагревателе уже имеется начальная нагрузка q_0 и тепло отводится в жидкость естественной конвекцией, расчет $\Delta T(\tau)$ и $q(\tau)$ также может проводиться по уравнениям (2 - 6). Если до момента дополнительного увеличения мощности тепловыделения тепло от нагревателя отводится в режиме пузырькового кипения, то $\tau_3 = 0$, $q_3 = q_0$, а q'_3 находится из решения уравнения

нестационарной теплопроводности в нагревателе с граничным условием $\alpha_0 = q_0 / \Delta T_0$. При этом связь между $\Delta T_{кр}$ и $q_{кр}$ определяется уравнением как и для стационарного режима теплоотдачи $q_{кр} = (3,1 \Delta T_{кр})^3$, а уравнение (6) приводится к виду

$$\int_0^{\tau_{сл}} q(\tau) \left(1 - (1 - s_0) \cos \left(\frac{\pi \tau}{2 \tau_{сл}} \right) \right) d\tau = \pi r \rho'' (1 - s_0) f(Ja) \sqrt{a} I \sqrt{\tau_{сл}}, \quad (7)$$

где s_0 – доля поверхности нагревателя, занятая паром, $\tau_{сл}$ – длительность интервала времени метастабильного кипения, тогда $\tau_{кр} = \tau_3 + \tau_{сл}$. Результаты расчетов при различных значениях параметра s_0 представлены на рис. 9. Как видно, начальная тепловая и гидродинамическая обстановка около нагревателя существенным образом влияет на критический интервал времени.

При умеренных тепловых нагрузках ($q_{кр1} \leq q_{кр} \leq 1,5 \cdot q_{кр1}$) передача тепла от нагревателя в течение значительного промежутка времени происходит в условиях, когда в пристенном слое жидкости происходит интенсивное парообразование. Растущие в перегретой жидкости паровые пузыри, достигнув определенного размера, отрываются от теплоотдающей поверхности. Объемное паросодержание двухфазного пограничного слоя при этом непрерывно растет со временем. Когда оно становится близким к единице, наступает кризис теплоотдачи. Для расчета длительности стадии метастабильного кипения в этом случае получено уравнение:

$$\frac{q_{кр1}}{f} (\exp(\tau_{сл} f) - \varphi_0) = \int_0^{\tau_{сл}} q_n(\tau) \exp(\tau f) d\tau, \quad (8)$$

здесь φ_0 – начальное объемное паросодержание пограничного слоя (при отсутствии начального тепловыделения ($\varphi_0=0$)), а f – частота отрыва паровых пузырей (50 с^{-1} для насыщенной воды под атмосферным давлением). Результаты расчетов по (8) представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что начальное паросодержание φ_0 достаточно слабо влияет на параметры нестационарного кризиса.

Для учета влияния недогрева воды до температуры насыщения на параметры нестационарного кризиса кипения воды была разработана дополнительная физическая модель. В данной модели предполагается, что паровые пузыри растут до определенного момента времени τ_{\max} и достигают своего максимального радиуса R_{\max} . До момента τ_{\max} ($\tau < \tau_{\max}$) паровые пузыри растут в перегретом относительно температуры насыщения слое. Когда паровой пузырь на стадии своего роста попадает в недогретый до насыщения слой воды ($\tau > \tau_{\max}$), его скорость роста $\dot{R}(\tau)$ становится равной нулю. Затем пузырь остается в контакте с теплоотдающей поверхностью достаточно долгое время. Таким образом, в модели предполагается, что интервал времени от момента образования паровой фазы до начала перехода к пленочному кипению $\tau_{\text{сл}}$ меньше, чем время жизни парового пузыря или время до момента их отрыва от поверхности нагрева $\tau_{\text{отр}}$.

Для этого случая, когда $\tau_{\text{сл}} < \tau_{\max}$, получено приближенное решение, связывающее параметры нестационарного кризиса кипения недогретой до температуры насыщения воды:

$$q_{\text{кр}} \approx \frac{2r\rho''f(Ja_{\text{кр}})\sqrt{a}}{\sqrt{\tau_{\text{сл}}}} \left(\frac{1}{t^*} \cdot \frac{\int_{1-t^*}^1 \exp(-x)\sqrt{1-x} dx}{\int_{1-t^*}^1 \exp(-x) dx} \right), \quad (9)$$

где $t^* = \tau_{\max} / \tau_{\text{сл}}$ – параметр. На рис. 11 линией представлены результаты расчетов по формулам (2) и (9). На этом же графике нанесены данные автора.

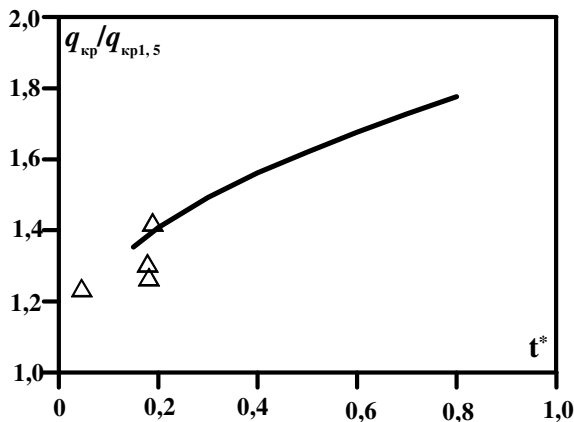


Рис. 11. Зависимость относительного критического теплового потока $q_{\text{кр}}/q_{\text{кр}1,5}$ от параметра t^* при $\tau_{\max} = 1,66$ мс:
 — расчет по формулам (3), (9);
 Δ - данные эксперимента

Из рисунка видно, что при $q_{кр}/q_{кр1,5} \approx 2,0$ переход к пленочному кипению происходит при временах порядка τ_{max} . В этом случае интервал времени $\tau_{сл}$ можно рассчитывать по методике для насыщенной воды.

Для проверки работоспособности разработанной расчетной методики было выполнено сопоставление результатов расчета нестационарного критического теплового потока с экспериментальными данными Tachibana F. et al и Сакураи, Сиоцу, в опытах которых тепловая нагрузка изменялась во времени по линейному $q_n(\tau) = 1,16 \cdot 10^6 (\tau/\tau_0)$ и экспоненциальному закону $q_n(\tau) = 4,5 \cdot 10^3 \exp(\tau/\tau_0)$. Результаты сравнения приведены на рис. 12 в координатах $q_{кр}, \tau_0$.

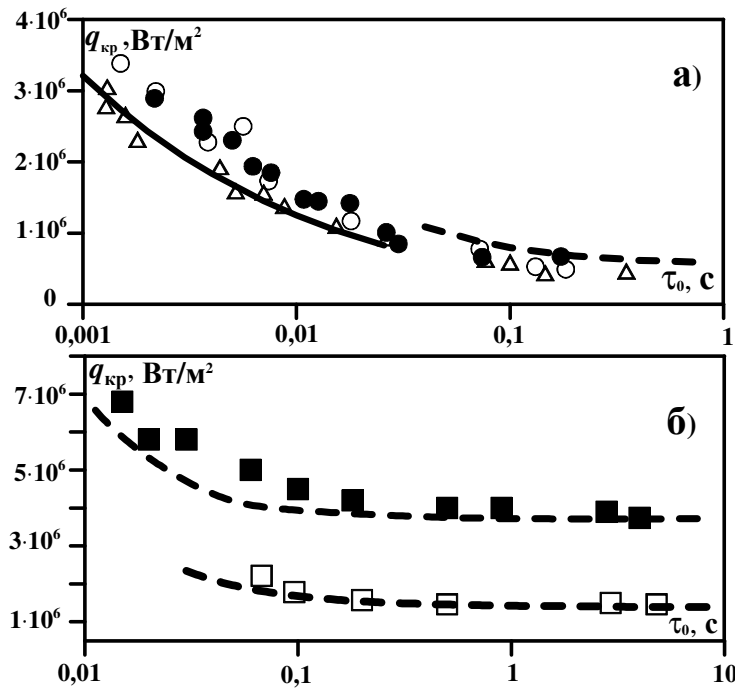


Рис. 11. Сравнение результатов расчета нестационарного критического теплового потока по предлагаемым моделям кризиса теплообмена с опытными данными: (а) - данные Tachibana F. et al, 1968 для нагревателей толщиной 0,01 мм - Δ ; 0,05 - \bullet ; 0,1 - \circ ; (б) \square , \blacksquare - данные Сакураи, Сиоцу, 1977 для давлений 0,1 МПа и 0,588 МПа соответственно; — - расчет по (2-6) при $\delta_n = 0,05$ мм, - - - - расчет по (8)

Основные результаты и выводы диссертационной работы

- В опытах с квазистационарным нагревом получены новые результаты, существенно дополняющие известные из литературы экспериментальные данные. Установлено, что плотность первого критического теплового потока при кипении воды на горизонтальной цилиндрической поверхности малого диаметра меньше, чем для

больших нагревателей, однако наблюдается более сильный ее рост с увеличением недогрева жидкости до температуры насыщения.

- Получены новые экспериментальные данные по характеристикам нестационарного кризиса кипения насыщенной и недогретой воды в условиях ступенчатого увеличения мощности нагрева. Показано, что в отличие от случая квазистационарного нагрева, явление кризиса кипения воды в условиях быстрого изменения мощности тепловыделения в нагреваемой стенке можно охарактеризовать совокупностью критических параметров, к которым следует отнести интервал времени от момента начала роста нагрузки до достижения кризиса $\tau_{кр}$, плотность теплового потока $q_{кр}$ и температурный напор в этот момент времени $\Delta T_{кр}$.
- Установлена взаимосвязь между нестационарным критическим тепловым потоком $q_{кр}$ и интервалом времени до наступления кризиса метастабильного кипения $\tau_{кр}$. Показано, что когда $q_{кр}$ лишь немного выше критической для стационарных условий (для насыщенной воды $q_{кр1} \leq q_{кр} \leq 1,5 \cdot q_{кр1}$) величина $\tau_{кр}$ может изменяться в пределах от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. В этом случае в режиме метастабильного кипения наблюдаются значительные пульсации температуры нагревателя, вызванные сильным перемешиванием жидкости в пристенном слое отрывающимися от поверхности нагрева паровыми пузырями. Механизм кризиса здесь связан с неустойчивостью пристенного двухфазного слоя, паросодержание в котором возрастает вплоть до момента наступления кризиса. Однако с увеличением набрасываемой тепловой нагрузки ($q_{кр} \geq 1,5 \cdot q_{кр1}$) величина $\tau_{кр}$ начинает резко сокращаться, а кризис наступает в результате слияния в сплошную паровую пленку паровых пузырей без их отрыва от теплоотдающей поверхности.
- Показано, что нестационарный критический тепловой поток увеличивается с ростом недогрева жидкости. Вместе с тем полученные

опытные данные указывают на сравнительно слабое влияние недогрева жидкости на нестационарный критический тепловой поток при быстром переходе к пленочному кипению в области больших тепловых нагрузок.

- Получены новые экспериментальные данные по влиянию на характеристики нестационарного кризиса кипения начальной нагрузки нагревателя перед набросом дополнительной мощности. При небольших значениях начальной тепловой нагрузки, меньших теплового потока начала кипения, теплообмен на исходной стадии процесса оказывает мало заметное влияние на нестационарный критический тепловой поток. Развитое пузырьковое кипение с отрывом паровых пузырей от поверхности нагревателя при больших начальных нагрузках приводит к значительному уменьшению как критического интервала времени, так и критического теплового потока. При высоких значениях плотности теплового потока на поверхности нагрева критический интервал времени может сильно изменяться в зависимости от структуры и паросодержания кипящего пристенного слоя в момент, непосредственно предшествующий набросу мощности.
- На основе полученных новых экспериментальных данных были развиты, разрабатываемые на кафедре теплофизики МИФИ физические модели кризиса кипения воды при нестационарном нагреве. В новых моделях учтены особенности протекания кризисных явлений в недогретой до температуры насыщения воде, а также влияние начальной тепловой нагрузки нагревателя.
- Разработана методика расчета динамических характеристик процесса теплообмена при нестационарном нагреве. Решение полученной замкнутой системы уравнений позволяет рассчитать параметры нестационарного кризиса. Результаты расчетов по предложенной методике хорошо согласуются как с данными автора, так и данными других известных работ.

Публикации по теме диссертации

1. Экспериментальное и теоретическое исследование кризиса теплоотдачи в условиях быстрого изменения мощности тепловыделения / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // 4-я международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 23-26 мая 2005 г. Тезисы докладов. Подольск, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2005. С. 53.
2. Экспериментальное и теоретическое исследование кризиса теплоотдачи в условиях быстрого изменения мощности тепловыделения / В.И. Деев, В.Б. Круглов, К.В. Куценко и др. // 4-я международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 23-26 мая 2005 г. Сб. трудов конференции. Секция 3: «Экспериментальное обоснование технических решений при проектировании и вводе в эксплуатацию АЭС», № 11. Подольск, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2005 (*электронная форма публикации*).
3. Кризис кипения воды при быстром изменении мощности тепловыделения / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // XXVIII Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 12-14 октября 2005 г. Тезисы докладов. Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 2005. С. 71,72.
4. Кризис кипения воды при быстром изменении мощности тепловыделения / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // XXVIII Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 12-14 октября 2005 г. Материалы семинара, № 036, Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 2005 (*электронная форма публикации*).
5. Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи при кипении воды, недогретой до температуры насыщения, в условиях импульсного энерговыделения / В.И. Деев, М.А. Калиш, С.А. Калиш и др. // Научная

- сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2006. Т. 8. С. 135, 136.
6. Критический тепловой поток при кипении воды в условиях нестационарного тепловыделения / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2006. Т. 8. С. 137, 138.
 7. Моделирование нестационарных тепловых процессов при кризисе кипения недогретой до температуры насыщения воды / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2006. Т. 8. С. 139.
 8. Теплоотдача и кризис кипения воды при быстром нагреве теплоотдающей стенки / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-4, Москва, 23-27 октября 2006 г.). Т.4. М: Издательский дом МЭИ, 2006. С. 79-82.
 9. Методика расчета динамических характеристик кризиса кипения воды при быстром нагреве теплоотдающей стенки / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // Инженерная физика. 2006. № 4. С. 32-37.
 10. Экспериментальное исследование влияния начального тепловыделения в нагревателе на кризис кипения воды при набросе мощности / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин и др. // Научная сессия МИФИ-2007, Москва, МИФИ, 22-26 января 2007 г. Сб. научных трудов. М.: МИФИ, 2007. Т. 8. С. 139.
 11. Critical heat flux modeling in water pool boiling during power transients / V.I. Deev, Htay Lwin Oo, V.S. Kharitonov et al // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.016 (*принято в печать*).