

ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Аль-Афиф Муфид

АПЕРИОДИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ Потока
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОГРЕВАЕМЫХ КАНАЛАХ

Специальность 05.14.14
тепловые и ядерные электростанции и
энергоустановки (тепловая часть)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса-1997

621.039
621.1

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00373740 (O)

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Одесском Государственном Университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Герлига Владимир Антонович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Хабенский Владимир Бенцианович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Сухов Андрей Константинович
кандидат технических наук, ст. н. сотрудник Олесевиц Евгений Кириллович


Ведущая организация: Государственный научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности Минэкобезопасности Украины, г. Киев

Защита диссертации состоится "15" мая 1997 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного ученого совета Д 05.06.02. при Одесском Государственном Политехническом Университете по адресу: Украина, Одесса, пр. Шевченко 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского Государственного Политехнического Университета.

Автореферат разослан "12" апреля 1997 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета

 А. С. Мазуренко

АВ 37.400

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемы обеспечения теплогидравлической устойчивости потока теплоносителя встречаются во всех областях техники, где имеет место передача или преобразование тепловой энергии посредством движущихся газовых, парожидкостных и жидкометаллических теплоносителей.

Апериодическая неустойчивость потока теплоносителя в обогреваемом канале проявляется в виде самопроизвольного "ухода" режимных параметров по аperiодической траектории со стационарного режима при достижении границы устойчивости.

При этом в дальнейшем возможны три исхода: 1) устанавливается новый стационарный режим, при котором значения рабочих параметров не совпадают со значениями их на прежнем, не возмущенном режиме; 2) с временем устанавливается автоколебательный режим; 3) греющий канал (канал реактора, трубка котла, парогенерирующая трубка других теплообменных устройств и т.д.) разрушается из-за эксплуатационной недоступности нового установившегося режима (кризис кипения, недопустимо высокая температура стенки газового канала) или из-за недопустимых циклических температурных напряжений.

Для проектантов, расчетчиков и эксплуатационников атомных реакторов и других теплообменных устройств важно знать физический механизм аperiодической неустойчивости, качественное влияние различных параметров на границу аperiодической устойчивости потока. В связи с этим, тема диссертационной, связанной с разработкой указанных вопросов является актуальной.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является выявление физической природы причин, вызывающих аperiодическую неустойчивость в различного рода греющих и парогенерирующих каналах, а также анализ влияния на границу аperiодической

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

неустойчивости различных геометрических и режимных параметров.

Для достижения этой цели были поставлены следующие, ранее не нашедшие решения, задачи:

- Применительно к аperiodической неустойчивости провести классификацию тепловых и гидравлических граничных условий, которые позволяют сократить число типов аperiodической неустойчивости и более эффективно выполнять качественный анализ влияния параметров потока на границу неустойчивости.

- Сформулировать системы трех характерных механизмов, которые могут приводить к образованию на гидравлической характеристике участка неоднозначности за счет: 1) появления в обогреваемом канале участков с поверхностным и объемным кипением (с небольшим весом паросодержанием);

2) наличии в обогреваемом канале большого перегреваемого участка;

3) наличии в обогреваемом канале или на части обогреваемого канала опускного направления движения теплоносителя. Определить физические причины, приводящие к появлению участков неоднозначности на гидравлической характеристике при трех указанных механизмах и рассмотреть для каждого из них влияние конструктивных и режимных параметров на поведение границы аperiodической неустойчивости потока.

- Получить аналитическую зависимость для анализа влияния параметров на границу аperiodической устойчивости потока при появлении на выходе из канала участка поверхностного или объемного кипения и перегревательного участка.

- Провести систематический анализ влияния местных и распределенных гидравлических сопротивлений - входного недогрева, плотности теплового потока, длины и эквивалентного диаметра канала, вида обогрева, составляющих перепад давлений и других параметров на границу аperiodической неустойчивости. Установить наиболее дестабилизирующие факторы.

- Выполнить аналитическую оценку и установить критерии для определения границы устойчивости при наличии перегревательного участка.

- Произвести более полный, чем в других работах, анализ влияния параметров греющего и нагреваемого теплоносителя на образование балластных зон на перегревательном и неперегревательном участках.

- Выполнить систематический анализ влияния геометрических режимных параметров на границу области устойчивости при опускном направлении движения теплоносителя.

Методика исследования состоит в расчетном и аналитическом анализе гидравлических характеристик обогреваемых каналов.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- в выявлении причин существования на гидравлической характеристике обогреваемого канала участков с отрицательной производной перепада давления на канале по расходу теплоносителя, и соответственно, выявлении механизмов возникновения неустойчивости при наличии в канале участка с кипением, участка перегрева пара либо участка с опускным направлением движением;

- в получении аналитических зависимостей для определения границы устойчивости и для анализа влияния режимных и конструктивных параметров на устойчивость потока при наличии в канале участка с кипением, участка перегрева пара либо участка с опускным направлением движением;

- в системном анализе влияния параметров на характеристики колебаний типа - колебания перепада давления.

Практическая ценность исследования состоит в результатах анализа влияния режимных и конструктивных параметров обогреваемых каналов на границу устойчивости при различных механизмах возникновения аperiodической неустойчивости, которые позволяют конструкторам и проектистам создавать надежные прямоточные теплообменники.

Достоверность обеспечивается использованием известных и апробированных уравнений движения теплоносителя (уравнения количества движения теплоносителя, уравнение энергии и уравнение неразрывности), использованием экспериментальных зависимостей для теплообмена и трения, проверенных автором диссертации, практическим внедрением.

На защиту выносятся:

- установленные автором механизмы развития аperiodической неустойчивости, возникающей при различных граничных условиях;
- полученные результаты анализа влияния на границы аperiodической устойчивости различных геометрических и режимных параметров обогреваемого канала с учетом поверхностного и объемного кипения, с учетом участка перегрева, с учетом подъемного и опускного движения и с учетом изменения перепада давлений на канале во время развития неустойчивости.

Внедрения. Результаты внедрены и используются в учебном процессе Одесского Политехнического Университета при подготовке специалистов по эксплуатации АЭС, а также в Государственном научно-техническом центре ядерной и радиационной безопасности Минзкобезопасности Украины, подтвержденные актом внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и одобрены на научных семинарах кафедры реакторов Севастопольского военно-морского института (1994 г.), на научном семинаре отдела интенсификации теплообмена ИТФ АН Украины (1994 г.), в НПЦ Минзкобезопасности Украины, а также на научном семинаре кафедры АЭС Одесского Политехнического Университета (1995 г.). По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, список литературы (53 наименования). Объем работы 188 стр., в том числе 52 рис. В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор литературы, посвященный изучению аperiodической устойчивости в теплогидравлических установках и излагается постановка задачи исследования.

Показано, что несмотря на существование значительного числа публикаций, посвященных изучению аperiodической неустойчивости потока теплоносителя в обогреваемых каналах, к настоящему времени не продуманы механизмы возникновения этой неустойчивости для различных каналов (каналы с поверхностным и объемным кипением, каналы с большим участком перегрева, каналы с нисходящим движением и т.п.). Кроме того, не проанализировано и не обобщено влияние различных краевых условий, в которых работает канал, на механизм развития его неустойчивости. В рамках публикаций остался всесторонний анализ влияния конструктивных и режимных параметров на границы аperiodической устойчивости для обогрева каналов, работающий при различных граничных условиях и имеющих различные механизмы возникновения аperiodической неустойчивости.

Указанные недоработки легли в основу задач, решению которых посвящена данная диссертация.

Во второй главе проводится анализ тепловых и гидравлических граничных условий и обобщение основных понятий по механизму возникновения и развития аperiodической неустойчивости. Для упрощения анализа неустойчивости теплоносителя рассматриваются три наиболее характерные для тепловой и атомной энергетики типы граничных условий: аperiodическая неустойчивость потока в одиночном канале, работающем при фиксированном перепаде давлений и постоянной температуре на входе (неустойчивость гидродинамически изолированного канала); аperiodическая неустойчивость потока в

системе параллельных каналов (межканальная неустойчивость), суммарный расход и входная температура постоянны во времени, перепад давлений на каналах изменяется во времени; аperiodическая неустойчивость потока в контуре циркуляции (общеконтурная неустойчивость).

Второй тип граничных условий подразумевает, что рассматривается неустойчивость группы каналов, составляющих заметную часть от общего числа каналов в исследуемом теплообменном устройстве или рассматривается неустойчивость параллельно работающих неидентичных элементов или парогенераторов. При этом имеет место гидродинамическое взаимодействие устойчивых и неустойчивых каналов, приводящее к распределению расходов в них и к изменению перепада давления на теплообменнике. Этот тип граничных условий используется только при определении границы аperiodической неустойчивости и обычно не пригоден для определения параметров потока при наступлении неустойчивости, т.к. возможно опрокидывание потока в неустойчивых каналах и нарушение условия $T_{вх} = \text{const}$.

В реальных условиях третий тип граничных условий проявляется: в случае, когда общеконтурная неустойчивость предшествует межканальной неустойчивости потока в многоканальном теплообменнике, когда возмущение перепада давления в элементе (теплообменнике) с параллельными каналами при межканальной неустойчивости соизмеримо с перепадом давления в контуре циркуляции и оказывает влияние на изменение общеконтурного расхода, приводя к появлению общеконтурной неустойчивости.

Далее рассматривается физическая картина развития неустойчивости в канале, имеющем неоднозначную гидравлическую

характеристику при постоянном перепаде давлений на нем и для случая, когда перепад давлений на канале обеспечивается насосами различного типа, напорная характеристика которых не зависит от расхода.

Выводим условие аperiodической неустойчивости обогреваемого канала, работающего в граничных условиях второго типа:

$$-\frac{d\Delta P_{k1}}{dG} > K \frac{d\Delta P_{k2}}{dG}, \quad K = \frac{\Delta G_{k2}}{\Delta G_{k1}}$$

где: ΔP_{K1} — статическая гидравлическая характеристика теплонапряженного канала с неоднозначной характеристикой; ΔP_{K2} — статическая гидравлическая характеристика осредненного канала группы устойчивых параллельных каналов, K — отношение изменения расходов теплоносителя в среднем устойчивом и неустойчивом каналах при заданном суммарном расходе через систему параллельных каналов. Из анализа полученного неравенства видно, что гидродинамическое влияние параллельных каналов друг на друга при прочих равных условиях приводит к повышению аperiodической устойчивости по сравнению с изолированным каналом при постоянном перепаде давлений.

В третьей главе рассматриваются механизмы возникновения аperiodической неустойчивости и влияние параметров канала на границу устойчивости в случае, когда неоднозначность гидравлической характеристики обусловлена появлением на выходе из обогреваемого канала участка с кипением.

Для упрощенного случая записывается полная производная потеря давления на канале по расходу и подробно анализируется влияние

следующих факторов на стабильность потока.

влияние местных гидравлических сопротивлений, влияние давления, влияние недогрева теплоносителя на входе в канал, влияние плотности теплового потока, длины и эквивалентного диаметра канала, влияние распределения и вида обогрева, влияние гравитационной составляющей перепада давлений и коэффициента проскальзывания пара. Многие из полученных результатов указанного анализа являются не очевидными. Так, с одной стороны, увеличение недогрева теплоносителя на входе в канал при неизменном расходе и выходной энтальпии дестабилизирует поток. В другой стороны, увеличение недогрева теплоносителя при постоянных расходе и мощности влияет уже не однозначно на стабильность потока: если первоначальная выходная энтальпия была меньше энтальпии максимума модуля производной $(\frac{\partial p}{\partial t})_{\text{вых}}$ - стабилизирует и если больше - дестабилизирует.

В четвертой главе рассматривается аperiodическая неустойчивость в каналах с неоднозначной гидравлической характеристикой за счет наличия в нем перегревательного участка.

Показывается, что неоднозначный характер гидравлической характеристики определяется перепадом давления на трение по длине канала. Для выявления указанного характера поведения распределенного по длине канала сопротивления трения рассматриваются полученные расчетным путем (совместно с А. Козловым) графики изменения длин участков перегрева, кипения и экономайзерного (рис. 1) и графики изменения потерь давления на этих участках (рис. 2) в зависимости от изменения расхода рабочей среды. Из рисунков видно, что для рассматриваемого примера нелинейный характер уменьшения длины перегревательного участка с

Изменение длин участков в канале при изменении расхода;

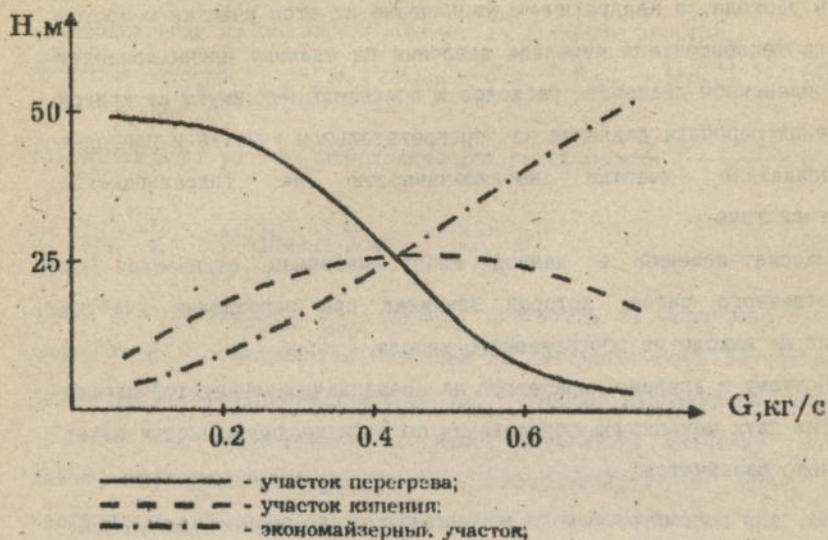


Рис. 1.

Изменение потерь давления на различных участках в зависимости от расхода;

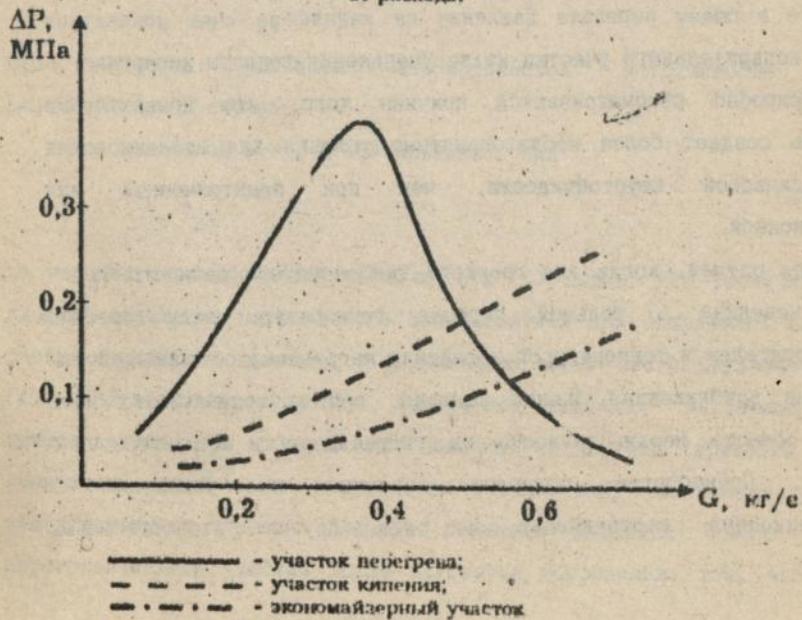


Рис. 2.

ростом расхода, и квадратичное увеличение на этом участке с ростом расхода теплоносителя перепада давления на единицу длины приводит в определенном диапазоне расходов к появлению максимума на кривой изменения перепада давления на перегревательном участке и приводит к появлению участка неоднозначности на гидравлической характеристике.

Рассматриваемый в данной главе механизм отличается от рассмотренного ранее, который возникал при зарождении участка кипения на выходе из обогреваемого канала.

Поэтому и влияние параметров на аperiodическую неустойчивость для этих двух механизмов образования области неоднозначности может несколько различаться.

Так, для рассматриваемого механизма возникновения неустойчивости увеличение давления может дестабилизировать процесс, т.к. уменьшает долю перепада давления на трение на испарительном участке в общем перепаде давления на канале за счет сокращения длины испарительного участка из-за уменьшения теплоты испарения.

Подробно рассматриваются причины того, что конвективный обогрев создает более неблагоприятные условия для возникновения аperiodической неустойчивости, чем при электрической или радиационной.

Для случая, когда для греющего теплоносителя разность $T_{вх} - T_{вых}$ невелика и большой перепад температур между греющим теплоносителем и температурой насыщения нагреваемого теплоносителя получена приближенная оценка условия, при котором может иметь место область неоднозначности на гидравлической характеристике канала. Пренебрегая потерями давления на ускорение и гравитационную составляющую и ряде других второстепенных

предположениях из уравнения количества движения энергии

$$\frac{d\Delta P''}{dG} = \frac{\xi_{\text{отк}}}{d_{\text{отк}} F^2 \rho'} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) \cdot G \left[\frac{3}{4} \psi H_{\text{исп}} + a H_{\text{ис}} - \frac{3}{2} a H_{\text{исп}} - \frac{3}{2} a H_{\text{отк}} \right], \quad (1)$$

откуда следует условие аperiodической устойчивости $\left(-\frac{d\Delta P''}{dG} > 0 \right)$

$$a H_{\text{ис}} - \left(\frac{3}{2} a - \frac{3}{4} \psi \right) H_{\text{исп}} - \frac{3}{2} a H_{\text{отк}} > 0, \quad (2)$$

здесь $a = \rho' / \bar{\rho}_{\text{пер}} \cdot \bar{\rho}_{\text{пер}}$ - средняя плотность на перегревательном участке, ψ - общепринятая поправка на негомогенность двухфазного потока на испарительном участке, $\Delta p_{\text{к}}$ - перепад давлений на канале.

Так как левая часть (2) имеет наименьшее значение, когда длина перегревательного участка приближается к нулю, то неравенство (2) можно записать в виде

$$\frac{\gamma}{1 - \gamma_{\text{вх}}} > \frac{a}{\frac{3}{4} \psi - a}, \quad (3)$$

что является условием аperiodической устойчивости в рассматриваемом случае.

Для змеевиков $\psi = 1$ и (2) принимает вид

$$\frac{\gamma}{1 - \gamma_{\text{вх}}} > 2 \quad (4)$$

Из условия аperiodической устойчивости (4) видно, что увеличение входной энтальпии нагреваемого теплоносителя при сохранении всех других параметров приводит к увеличению левой части неравенства (4) и стабилизирует поток. Увеличение давления нагреваемого теплоносителя при сохранении величины недогрева приводит к уменьшению левой части неравенства (4) за счет уменьшения γ и дестабилизирует поток. Падение перепада давления трения на перегревательном участке после максимума обусловлено тем, что в

этой области интенсивность уменьшения длины перегревательного участка превышает квадратичное увеличение расхода. Для равномерной плотности теплового потока из выражения (1) следует, что максимум потери давления от трения на перегревательном участке достигается, когда длина перегревательного участка достигает $1/3 N_k$. Фактически с этой длины перегревательного участка отсутствует избыточная поверхность перегрев и увеличение расхода приводит к уменьшению температуры пара на выходе из канала.

Изменение коэффициента ψ (поправка на неомогенность двухфазного потока) в зависимости от массового расхода и давления нагреваемого теплоносителя в соответствии с условием (3) также может влиять на аperiodическую неустойчивость потока. При $\psi > 1$ для низких массовых расходов и низких давлений правая часть неравенства (3) уменьшается (стабилизация потока), а при $\psi < 1$ (большие массовые расходы и большие давления) происходит дестабилизация потока.

Для случая, когда удельный тепловой поток, сохраняя постоянное значение на эконмайзерном и испарительном участках, имеет различные величины, т.е. $q_{\text{исп}} \neq q_{\text{эк}}$, получено условие устойчивости в виде

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{q_{\text{эк}}}{s \cdot v_k \cdot q_{\text{исп}}} > 2 \quad (5)$$

т.е. уменьшение отношения дестабилизирует поток.

В пятой главе рассматривается влияние параллельности каналов на способы регулирования параметров и на стабильность работы парогенераторов.

На основе полученных различий в условиях возникновения

апериодической неустойчивости в циркулярном контуре с многоканальным парогенератором и в отдельном изолированном канале дается объяснение экспериментальным данным, полученным в работе Белякова И.И., Бреуса В.И. и Логинова Д.А. "Исследование гидравлической устойчивости парообразующих элементов при конвективном обогреве" (Атомная энергия, 1988 г., т.65, вып.1, с.12-17). Испытывалась система двух параллельных модулей парогенераторов. Каждый модуль состоял из трех параллельных змеевиков, расположенных в общем кожухе. На первом этапе изучалась устойчивость работы одного модуля. В результате получена гидравлическая характеристика с падающим участком. Причем при расходах, соответствующих падающему участку не наблюдалось ни общекоонтурной, ни межканальной неустойчивости.

Общеконтурная неустойчивость была исключена главным образом применением поршневого насоса для подачи нагреваемой среды. Отсутствие межканальной неустойчивости в змеевиках, работающих на падающей ветви гидравлической характеристики, является следствием того, что несмотря на идентичность параллельных змеевиков, их гидравлическая характеристика отличается от гидравлической характеристики модуля, который состоит из этих змеевиков. Изменения расходов в змеевиках при постоянном общем расходе греющей среды через модуль вынуждены происходить в противофазе и при хорошем перемешивании греющего теплоносителя. Получаем, как указывалось ранее, гидравлическую характеристику без падающего участка. Было замечено, что при уменьшении общего расхода ниже уровня, соответствующего минимуму гидравлической характеристики ($\rho_w < 1500 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$), отмечается значительная развертка расходов в модулях: расход в одном модуле находится на правой ветви, а

другого - на падающем участке. Устойчивая работа этого модуля обеспечивалась существованием второго параллельного модуля, т.к. величина модуля производной $\frac{d\Delta P}{dG}^M$ на правой ветви характеристики больше величины модуля производной $\frac{d\Delta P}{dG}^M$ на неустойчивой ветви характеристики.

В отличие от колебательной неустойчивости экспериментальное изучение аperiodической неустойчивости системы с большим числом параллельных элементов путем моделирования на теплофизическом стенде с двумя элементами является некорректным.

В парогенераторах в перегревательном участке при снижении расхода нагреваемого теплоносителя или снижении входной температуры греющего теплоносителя часть перегравательной поверхности может оказаться выключенной из процесса теплообмена вследствие весьма малого температурного напора между греющим и нагреваемым теплоносителем на этом участке. Эту часть поверхности, расположенную на выходном или испарительно-экономайзерном участке парогенератора, называют балластной зоной. Теплопередающая поверхность в балластной зоне практически не участвует в процессе теплопередачи. Образованию балластной зоны на испарительно-экономайзерном участке ($G = \text{const}$, $T_{\text{вх}} = \text{const}$) способствуют следующие факторы: снижение входной температуры греющего теплоносителя; повышение давления и соответственно температуры насыщения нагреваемого теплоносителя; уменьшение расхода греющего теплоносителя. В литературе найдено критическое отношение расходов греющего и нагреваемого теплоносителя $(G/D)_{\text{кр}}$. При $\frac{G}{D} > \left(\frac{G}{D}\right)_{\text{кр}}$ балластная зона расположена на перегравательном участке при $\frac{G}{D} < \left(\frac{G}{D}\right)_{\text{кр}}$ на испарительном. Представленная картина балластных зон позволяет нам далее рассмотреть связь образования этих зон и

перемещения их с аperiodической неустойчивостью потока в нагреваемой среде. При наличии балластной зоны на перегревательном участке потери давления на нее определяют перепад давлений на парогенераторе. Если случайное отклонение параметров приводит к отношению расходов меньше критического $\left[\frac{G}{D} < \left(\frac{G}{D} \right)_{кр} \right]$, то начинается перемещение балластной зоны. При этом происходит увеличение испарительного и экономайзерного участков за счет образования на них балластной зоны и уменьшение перегревательного участка.

Изменение входной температуры греющего теплоносителя при заданном расходе также оказывает существенное влияние на границу аperiodической устойчивости если на частичных уровнях мощности избыточная поверхность парогенератора.

Для стабилизации потока можно увеличить входную температуру греющего теплоносителя. Уменьшение давления нагреваемого теплоносителя уменьшает температуру насыщения, увеличивает температурный напор между греющим и нагреваемым теплоносителем, а также повышает аperiodическую устойчивость потока.

Сокращение перегревательного участка уменьшает потери давления на парогенераторе и при заданном перепаде давления увеличивает расход нагреваемой среды, т.е. появляется область многозначности гидравлической характеристики.

Из условия

$$\left(\frac{D}{G} \right)_{кр} = \frac{\text{энтальпия пара на выходе из парогенератора, взятая при температуре входа греющего теплоносителя} - \text{энтальпия насыщения нагреваемого теплоносителя}}{\text{входная энтальпия греющего теплоносителя} - \text{энтальпия греющего теплоносителя, взятая при температуре насыщения нагреваемого теплоносителя}}$$

видно, что при перемещении балластной зоны на испарительно-экономайзерный участок из-за сокращения

перегревательного участка нелинейным образом увеличивается расход нагреваемого теплоносителя и уменьшается энтальпия на выходе из парогенератора. При этом для условий большой тепловой инерции отношение расходов G/D может стать в динамическом режиме больше критического и начинается обратный процесс сокращения балластной зоны на испарительно-экономайзерном участке и процесс перемещения зон может носить периодический характер. Скорость перемещения балластных зон будет зависеть от теплоинерционных характеристик греющего и нагреваемого теплоносителя, теплопередающей стенки.

Периодическое перемещение балластной зоны по поверхности нагрева может вызвать пульсации температуры поверхностей нагрева с размахом, лежащим между входной температурой греющего теплоносителя, а также к возможному выбросу пароводяной смеси в выходной сборный коллектор.

На основании анализа опубликованных в технической литературе экспериментальных данных в диссертации выявлено влияние различных режимных параметров на границу устойчивости однофазного потока при опускном и обратном движении теплоносителя. На границы области аperiodической устойчивости однофазного потока в канале при малых скоростях теплоносителя ($Re < 1000$) существенное влияние оказывают такие факторы: нарушение ламинарной устойчивости потока в канале при малых скоростях опускного движения теплоносителя в нем; теплообмен канала с верхней смесительной камерой; распределение температуры теплоносителя в верхней и нижней смесительных камерах с учетом стратификационных эффектов. В диссертации рассмотрено отдельно влияние каждого из этих процессов на устойчивость течения в канале.

В шестой главе дан подробный анализ теплогидравлической

неустойчивости особой природы, приводящей к возникновению в парогенерирующем канале периодических установившихся колебаний расхода теплоносителя и перепада давления. В литературе этот вид неустойчивости называется колебаниями перепада давления. Характерными особенностями неустойчивости типа колебания перепада давления является наличие сжимаемого объема на входе в обогреваемый канал и развитие колебаний в области неоднозначности гидравлической характеристики.

Неустойчивость данного вида может возникать: в теплофизических стендах, где сжимаемые объемы на входе в экспериментальный участок часто используются в качестве компенсатора объема, для сглаживания колебаний давления (расхода) создаваемого питательным насосом и для гидродинамической изоляции канала; в парогенераторах АЭС с брызгерным реактором в жидкометаллическом теплоносителе; в системах аварийного расхолаживания АЭС с ВВЭР и других системах.

В диссертации детально изложен механизм возникновения и развития теплогидравлической неустойчивости, на основании которого впервые дается связь динамических характеристик системы с периодом и амплитудой колебаний расхода и давления.

Показано, что колебания входного расхода высокой частоты на фоне низкочастотных колебаний расхода и перепада давления, часто присутствующие в эксперименте, являются следствием появления теплогидравлической неустойчивости типа волн плотности при снижении расхода теплоносителя до малых значений в процессе цикла колебаний перепада давления. Появление колебаний волн плотности на фоне колебаний перепада давления не является строго обязательным и зависит от характеристик экспериментальной установки и в первую

очередь от величины входного и выходного сопротивлений и давления в системе.

В диссертации впервые проанализирован характер поведения предельного цикла при колебаниях перепада давления от режимных параметров. На основе простой математической модели, которая для наглядности была преобразована к уравнению Ван-дер-Поля, в диссертации выполнен системный анализ качественного влияния конструктивных и режимных параметров на характер колебаний и границу устойчивости, который полностью подтвержден имеющимися в литературе экспериментальными результатами. Показано, что увеличение газового объема сжимаемой емкости, уменьшение давления в системе, увеличение градиента наклона ветви гидравлической

в системе, увеличение градиента наклона ветви гидравлической характеристики в области неоднозначности приводит к расходу и перепада давления. При малых входных недогревах уменьшение величины входного недогрева приводит к уменьшению области неустойчивости колебаний перепада давления и стабилизирует систему. При больших и умеренных входных недогревах теплоносителя с увеличением входного недогрева с одной стороны несколько уменьшает область неустойчивости потока, а с другой стороны, увеличивается период и амплитуда колебаний расхода и перепада давления. Таким образом, существует область входного недогрева, наиболее неблагоприятная для устойчивости потока. Влияние подводимой мощности к каналу на границу устойчивости проявляется через деформацию гидравлической характеристики. При этом устойчивость системы снижается с увеличением подводимой мощности, а период и амплитуда колебаний расхода и перепада давления увеличиваются.

ВЫВОДЫ

По выполненной диссертационной работе можно сделать следующие выводы.

1. Впервые применительно к аperiodической неустойчивости приведена классификация тепловых и гидродинамических условий, которая позволяет более эффективно выполнять качественный анализ влияния параметров на границу устойчивости.

2. Впервые сформулирована с общих позиций система трех характерных механизмов, которые могут приводить к образованию на гидравлической характеристике участков неоднозначности за счет: 1) появления на выходе из обогреваемого канала участков с поверхностным и объемным (в небольшом весовом праросодержании) кипением; 2) наличие в обогреваемом канале большого пароперегретаемого участка; 3) наличие в обогреваемом канале или на части обогреваемого канала, спускного направления движения теплоносителя. Эти три участка неоднозначности на гидравлической характеристике могут существовать по отдельности или перекрываться.

3. Определены физические причины, приводящие к появлению участков неоднозначности на гидравлической характеристике при трех указанных механизмах появления аperiodической неустойчивости и рассмотрено для каждого из них влияние конструктивных и режимных параметров на поведение границы аperiodической устойчивости потока.

4. Получена простая аналитическая зависимость для анализа влияния параметров на границу аperiodической устойчивости потока при появлении на выходе из канала участка поверхностного или объемного (при небольших весовых праросодержаниях) кипения.

Впервые проведен систематический анализ влияния местных и распределенных сопротивлений, входного недогрева, плотности теплового потока, длины и эквивалентного диаметра канала, вида обогрева и других параметров на границу устойчивости и предложены оптимальные методы повышения устойчивости системы.

Показано, что наиболее сильное дестабилизирующее влияние выходного дросселирования наступает в районе значений равновесного паросодержания, равного нулю.

5. Впервые сформулирован физический механизм образования области неоднозначности на гидравлической характеристике при наличии перегреваемого участка в обогреваемом канале.

Этот механизм аperiodической неустойчивости существенно отличается от механизма аperiodической неустойчивости вызванной появлением на выходе обогреваемого канала участка с кипением и поэтому характер влияния параметров на границу устойчивости для этих двух механизмов неустойчивости может быть противоположным. Так например, при механизме обусловленном перегреваемым участком дросселирование на выходе из канала может повышать устойчивость системы.

6. В диссертации впервые выполнен систематический анализ качественного влияния параметров на границу аperiodической устойчивости для механизма, обусловленного наличием пароперегреваемого участка в канале.

7. В диссертации получена простая аналитическая оценка и критерий для количественного определения границы аperiodической устойчивости при наличии перегреваемого участка.

8. Выявлены причины и механизмы ухудшения аperiodической неустойчивости потока при конвективном обогреве. Получен критерий устойчивости, позволяющий оценивать границу устойчивости при

конвективном обогреве и анализировать влияние параметров и системы регулирования на повышение устойчивости поток в таких системах.

9. Выполнен более полный, чем в других работах анализ влияния параметров греющего и нагреваемого теплоносителя на образование балластных зон на перегревателем и испарительно-экономайзерном участках. Оценены условия возникновения неустойчивости, обусловленной балластными зонами для условий работы реальных парогенераторов АЭС с натриевым греющим теплоносителем.

10. Выполнен систематический анализ влияния геометрических и режимных параметров на границу области устойчивости при спускном направлении движения теплоносителя.

Для указанных условий получены критерии, позволяющие выполнить качественный анализ влияния параметров на границу устойчивости и получить количественную оценку для определения границы области аperiodической устойчивости при опускном направлении движения теплоносителя.

11. Впервые выполнен систематический анализ влияния конструктивных и режимных параметров на характеристики колебаний и границу устойчивости при неустойчивости типа колебаний перепада давлений. Рекомендованы оптимальные способы повышения устойчивости системы для данного типа неустойчивости.

ПУБЛИКАЦИИ НА ТЕМУ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аль-Афиф Муфид. О причинах аperiodической неустойчивости в элементах энергетического оборудования. // Научные труды молодых ученых. Одесский Государственный Политехнический Университет. 1997. стр. 125-127.
2. Аль-Афиф Муфид. Аperiodическая неустойчивость при наличии

участка перегрева. // Научные труды молодых ученых. Одесский Политехнический Университет. 1997 стр. 127-130.

3. Аль-Афиф Муфид. Апероодическая устойчивость системы двух обогреваемых каналов. // Труды Одесского политехнического университета. 1997.

4. Аль-Афиф Муфид, Хабенский В.В. Неоднозначность гидравлической характеристики при наличии перегревательного участка. //Одесс. Политехн. Ун-т. Деп. в ГНТБ Украины 23.05.1995., Рег.1248-Ук95.-сил. 36с.

5. Аль-Афиф Муфид, Хабенский В.В. Неустойчивость ПГ типа "Колебания перепада давления". //Одесс. Политехн. Ун-т. Деп. в ГНТБ Украины 23.05.1995., Рег. 1249-Ук95.-сил. 32с.

SUMMARY

Al-Afif Mufeed. Anperiodic instability of a flow of heat carrier in a warming up canals.

The Thesis for the degree of candidate of technical science in 05.14.1' speciality - Heat and Nuclear Electric Power Stations and Energy Plants (technical part), Odessa State Politechnic University, 1997.

The thesis contains the results of researches on anperiodic instability in a warming up canals. There are shown mechanisms of origins of anperiodic instability. The influence of regime and geometric data on the border of their stable work in heat exchange apparatus was revealed.

АННОТАЦИЯ

Аль-Афиф Муфид. Апероодическая неустойчивость потока теплоносителя в обогреваемых каналах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 - тепловые и ядерные электростанции и энергоустановки (Тепловая часть), Одесский Государственный Политехнический Университет, Одесса, 1997.

Диссертация содержит результаты исследований аperiodической неустойчивости в обогреваемых каналах. Вскрыты механизмы возникновения аperiodической неустойчивости, выявлено влияние режимных и геометрических параметров на границы их устойчивой

АННОТАЦІЇ

Аль-Афіф Мухфід. Аперіодична нестійкість потоку теплоносія в каналах, що обігриваються. Диссертация (у формі рукопису) на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14. - Теплові та атомні електростанції та енергоустановки (теплова частина). Одеський Політехнічний Університет (Україна), 1997. Захищаються розроблені механізми розвитку аперіодичної нестійкості в будь-яких теплообмінниках та аналіз впливу режимних і геометричних параметрів на границю аперіодичної нестійкості процесу в теплообмінниках (5 наукових публікації).

Ключові слова: аперіодична нестійкість, канал, теплоносій, кипіння.

Подписано к печати 8.04.97. Формат 60x84/16. Бумага газетная.
Печать офсетная. 1,34 усл. печ. л. 1,44 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 79

Одесский государственный политехнический университет.
270044, Одесса, пр. Шевченко, 1.

Ar 37.460
AB 37.460