

С.М. Дмитриев, Д. В. Спиридонов, А. А. Востриков, Т. С. Дмитриева

Нижегородский государственный технический университет, Россия

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА С ДВУСТОРОННИМ ОБОГРЕВОМ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования нестационарного температурного состояния теплообменной поверхности парогенерирующего элемента (ПГЭ) с двусторонним обогревом в условиях межканальной неустойчивости в следующем диапазоне параметров рабочего тела: массовая скорость $\rho w = 50-450 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, давление питательной воды $p = 2.5-7 \text{ МПа}$, температура питательной воды $t_{\text{п.в.}} = 50-150 \text{ }^\circ\text{C}$. Используя полученные экспериментальные данные, была произведена оценка напряжённого состояния и долговечности теплообменной поверхности ПГЭ в условиях межканальной неустойчивости.

1. ВВЕДЕНИЕ

В качестве одной из перспективных конструкций высоконапряжённого прямоточного парогенератора (ПГ) для ЯЭУ рассматривается теплообменный аппарат (ТА), состоящий из модулей, элементы которых выполнены в виде каналов типа «труба в трубе» с внутренней спирально навитой трубой [1]. Греющий теплоноситель движется по внутренней трубе и межтрубному пространству, рабочее тело – по спиральному каналу, образованному поверхностями наружной и внутренней труб. Такая конструкция позволяет уменьшить весогабаритные характеристики ТА за счёт интенсификации процессов теплопереноса как со стороны греющей, так и нагреваемой сред, что привносит новые возможности для повышения безопасности, но может быть оправдана лишь при достаточно высокой надёжности и долговечности как ПГ, так и внутриреакторного оборудования в целом [2].

Процессы теплообмена в парогенерирующих элементах прямоточных парогенераторов могут проходить в нестационарных режимах работы. Специфические условия нестационарных режимов непосредственно сказываются на процессах парообразования, и, следовательно, на температурном состоянии ПГЭ. Основными возмущающими факторами в ПГ являются тепловая нагрузка, энтальпия рабочей среды, ее расход, давление. Среди указанных выше возмущений следует особо выделить нестационарные режимы, связанные с пульсациями расхода рабочего тела. Пульсации расхода в ПГЭ прямоточных парогенераторов имеют место при межканальной неустойчивости (МКН), которая неизбежно возникает при снижении тепловой нагрузки (паропроизводительности) парогенератора. Известные методы устранения МКН (выбор режимных параметров, дросселирование) не могут обеспечить

отсутствие МКН во всем диапазоне режимов работы ЯЭУ. Вследствие этого, ПГЭ парогенераторов при малой паропроизводительности работают в области МКН с характерными для каждого режима статистическими характеристиками пульсаций расхода питательной воды (амплитудой, частотой, эффективным периодом). Эти колебания приводят к колебаниям температуры парогенерирующей поверхности, что в конечном итоге определяет ее долговечность и ресурс, и может вызвать усталостное разрушение парогенерирующего канала из-за переменных термических напряжений.

Обеспечение необходимой долговечности ПГЭ будет являться основным критерием при определении допустимых пульсаций расхода. Без знания зависимости статистических характеристик температурных пульсаций от амплитуды пульсаций расхода рабочего тела решение этого вопроса не представляется возможным. Таким образом, для оценки ресурсной надёжности прямоточных ПГЭ с двусторонним обогревом необходимо проведение экспериментальных исследований зависимости статистических характеристик температурных пульсаций теплообменной поверхности от амплитуды пульсаций расхода рабочего тела.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МОДЕЛЕЙ

Экспериментальные исследования температурного состояния теплопередающей стенки парогенерирующего канала проводились на теплофизическом стенде ФТ-80. Стенд представляет собой три гидравлических контура. По первому контуру циркулирует теплоноситель, по второму - рабочее тело, по третьему - техническая вода. Компоновка стенда представлена на рис.1. Экспериментальные модели выполнены по схеме прямоточных ПГЭ с двусторонним обогревом и закруткой потока рабочего тела. Установлены конструктивно идентичные модели двух типов, отличающиеся количеством и месторасположением термопреобразователей по сечению и высоте моделей. Первая модель оснащена 51 термопреобразователем измеряющим температуру стенки, вторая – 58. Теплофизический стенд позволяет проводить исследования в диапазоне параметров, характерных для ЯЭУ. Регистрация и обработка информации, получаемой системой теплотехнического контроля стенда, осуществляется измерительно-вычислительным комплексом на базе двух современных ЭВМ. На одной ЭВМ с помощью

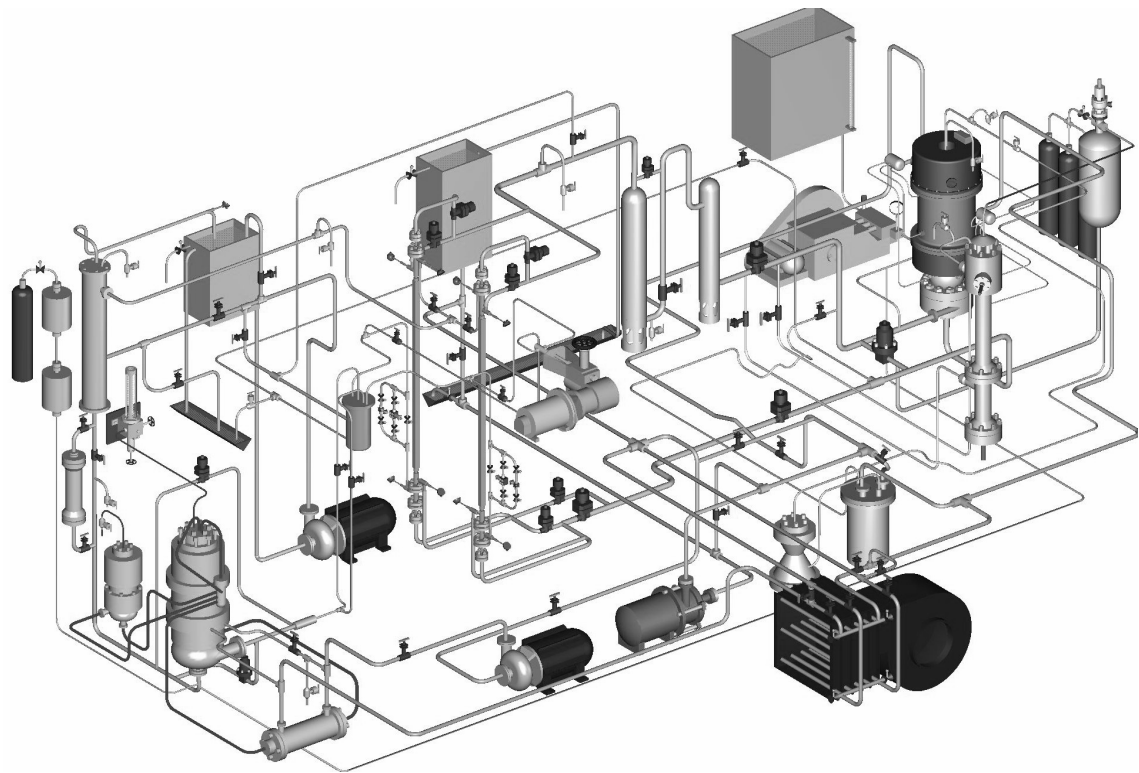


Рис. 1. Компоновка теплофизического стенда ФТ-80

системы сбора и обработки информации производилась регистрация технологических параметров стенда, а также запись статических режимов, на второй - запись и обработка динамических режимов. Система измерения динамических параметров стенда собрана на основе многофункциональной платы сбора и обработки сигналов PCI-1710HGL, к которой подключается интересующая группа первичных преобразователей.

Программа для обработки динамических процессов написана на языке визуального программирования LabView, что позволяет не только проводить измерения, но также получать необходимые корреляционные и спектральные характеристики процесса и проводить их анализ в реальном времени. На рис. 2. показан интерфейс программы ДИНАМИКА.

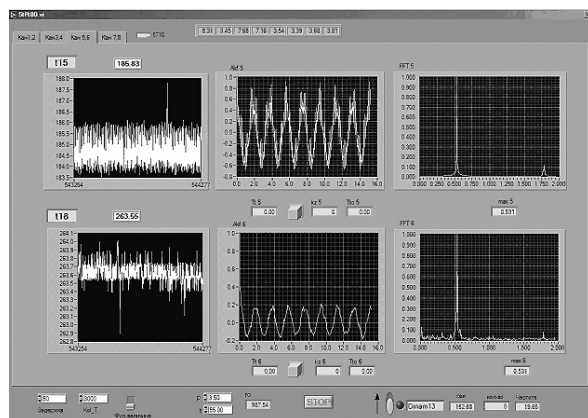


Рис. 2. Интерфейс программы ДИНАМИКА для обработки динамических режимов в реальном времени

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для представительных исследований температурного состояния и оценки долговечности ПГЭ при пульсациях расхода рабочего тела необходимо проводить испытания штатных ПГ, имеющих только им присущие пульсационные характеристики, что приводит к большим материальным затратам. Реализована альтернативная методика, позволяющая избежать вышеизложенных затрат. Для этого в состав стенда включен генератор искусственных возмущений расхода питательной воды – гидропульсатор. С помощью гидропульсатора на входе в единичный ПГЭ, оснащенный необходимым количеством термопар, создаются вынужденные гармонические колебания расхода с различной частотой и амплитудой. Фиксируя временные реализации температурных полей и расхода питательной воды, находят их спектральные характеристики, рассчитываются переменные температурные напряжения, а затем - долговечность теплообменной поверхности ПГЭ. Для анализа температурного состояния поверхности теплообмена и расчёта характеристик температурных напряжений, экспериментально полученные значения температурных пульсаций в месте заделки термопар восстанавливаются на границу теплообменной поверхности. Для восстановления реализаций термопульсаций на границу поверхности теплообмена, решается нестационарное уравнение теплопроводности.

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Методика обработки экспериментальных данных

Экспериментальные исследования температурного состояния были проведены в следующем диапазоне параметров:

- массовая скорость питательной воды 50-450 кг/(м²·с);
- давление питательной воды 2,5-7 МПа;
- амплитуда пульсаций расхода питательной воды 0-100%;
- частота пульсаций расхода 0-3 Гц [3].

Так как пульсации температур, как правило, имеют неупорядоченный, случайный характер, то вызываемые ими температурные поля и напряжения также случайны и для их анализа следует применять статистические методы. Основными статистическими характеристиками, характеризующими нагрузку в формулах долговечности, являются максимальная амплитуда σ_{max} , среднее квадратичное отклонение S_{σ} , математическое ожидание σ_{cp} и эффективный период пульсаций напряжений $t_{e\sigma}$. Эти характеристики вычислялись путем статистического и корреляционно-спектрального анализа вычисленной временной реализации нестационарных температурных напряжений.

Для расчета нестационарных температурных напряжений применялся вычислительный комплекс «ANSYS», основанный на методе конечных элементов (МКЭ).

Задача определения температурных напряжений при пульсациях температуры сводилась к нахождению переменной составляющей температуры по толщине стенки, т.е. для определения температурных напряжений необходимо найти нестационарное распределение температур в стенке, на одной из поверхностей которой задают пульсации температур, а на другой имеет место теплообмен с греющим теплоносителем при постоянном коэффициенте теплоотдачи.

Для решения этой задачи в программе «ANSYS» была создана конечно-элементная модель стенки парогенерирующего элемента и по результатам проведенных экспериментальных исследований нестационарного температурного состояния теплообменной поверхности ПГЭ сформирован пакет граничных условий для каждого эксплуатационного режима (режима нагружения).

Пакет граничных условий включает в себя экспериментально определенные временные реализации температур теплопередающей стенки в местах заделок термопреобразователей и определенное расчетным путем количество тепла, проходящее через цилиндрическую стенку в соответствующие моменты времени.

В результате проведенного нестационарного теплового расчета определялось распределение температур в стенке ПГЭ для каждого расчетного момента времени. Пример результата проведенного

температурного расчета одного из эксплуатационных представлен на рис. 3.

На рис. 4,5 представлены результаты расчета напряженного состояния теплопередающей поверхности парогенератора для одного эксплуатационного режима.

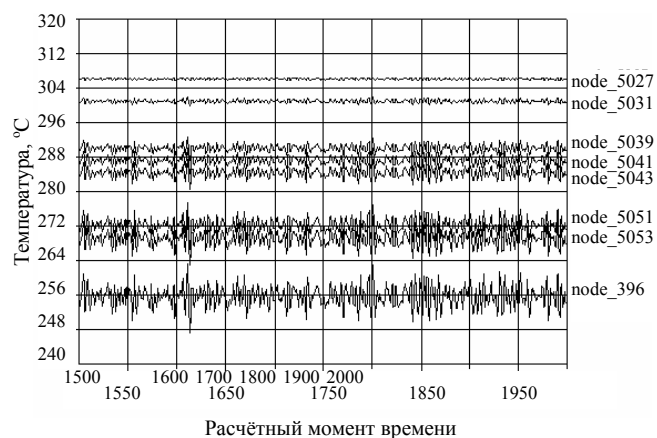


Рис. 3. Расчетные реализации температурных пульсаций на различных координатах по сечению теплообменной стенки на участке ухудшенного теплообмена

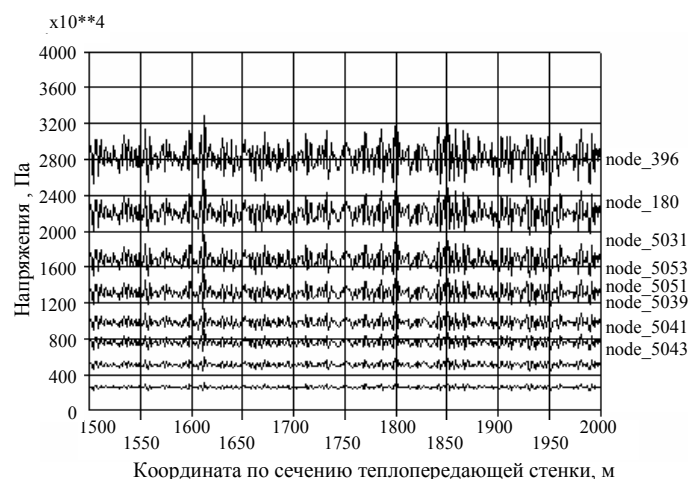


Рис. 4. Расчетные реализации пульсаций температурных напряжений на различных координатах по сечению теплообменной стенки на участке ухудшенного теплообмена

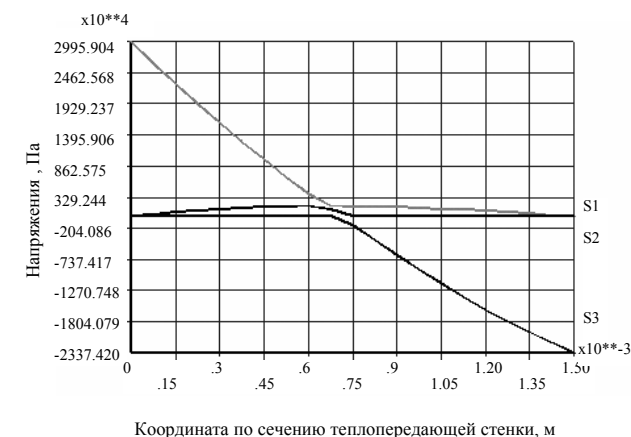


Рис. 5. Распределение главных напряжений $\sigma_1(S1)$, $\sigma_2(S2)$, $\sigma_3(S3)$ на участке ухудшенного теплообмена в вертикальном сечении теплопередающей стенки, Па

На рис.6 представлены результаты расчетов долговечности теплопередающей поверхности ПГЭ при пульсациях расхода рабочего тела, для различных значений величин температурных напоров на участке ухудшенного теплообмена и на экономайзере.

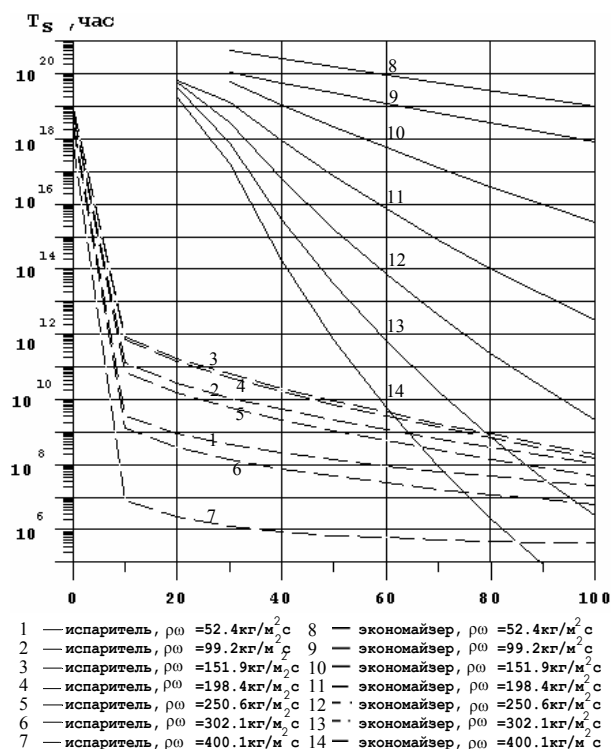


Рис. 6. Расчетная долговечность теплообменной поверхности ПГЭ на испарительном и экономайзерном участках при $\Delta T_{yx} = 76.9 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_{эк} = 195.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2. Анализ полученных результатов

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением амплитуды пульсаций расхода расчётная долговечность теплопередающей поверхности ПГЭ на экономайзерном участке снижается, причём эта зависимость тем сильнее, чем выше массовая скорость;
- при фиксированных значениях амплитуды пульсаций расхода и массовой скорости, увеличение температурного напора на экономайзерном участке $\Delta T_{эк} = 170 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к снижению расчетной долговечности теплопередающей поверхности ПГЭ на этом участке;
- в диапазоне параметров $\rho\omega = 50 \dots 500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $\Delta T_{yx} = 50 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_{эк} = 170 \dots 230 \text{ }^\circ\text{C}$ при амплитудах пульсаций расхода до $A = 70 \dots 80 \text{ } \%$ долговечность ПГЭ определяется долговечностью

теплопередающей поверхности на участке ухудшенного теплообмена, а при амплитудах пульсаций расхода $A > 80 \text{ } \%$ определяющей является долговечность теплопередающей поверхности на экономайзере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов с учетом метода определения допустимого уровня пульсаций расхода питательной воды, при котором интенсивность максимальных пульсаций температуры в стенках на экономайзере больше или равна интенсивности максимальных температурных пульсаций в стенках на участке ухудшенного теплообмена $\sigma_{t_{yx}} \geq \sigma_{t_{эк}}$ позволяет заключить следующее. При модели эксплуатации ПГ ЯЭУ, когда выполняется условие $\sigma_{t_{yx}} \geq \sigma_{t_{эк}}$, расчетная долговечность превышает базу усталостных испытаний материала и существенно превышает требуемый ресурс ПГ в целом в широком диапазоне изменения амплитуды пульсаций расхода питательной воды. Это указывает на то, что температурные пульсации в стенках парогенерирующего элемента, возникающие при пульсациях расхода с амплитудой $A < 100 \text{ } \%$, не являются фактором, определяющим ресурс парогенератора в целом.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- σ_{amax} – максимальная амплитуда напряжений, МПа;
 S_σ – среднеквадратичное отклонение напряжений;
 σ_{cp} – математическое ожидание напряжений;
 $t_{e\sigma}$ – эффективный период пульсаций напряжений, с;
 $\Delta T_{эк}$ – температурный напор на экономайзерном участке, $^\circ\text{C}$;
 ΔT_{yx} – температурный напор на участке ухудшенного теплообмена, $^\circ\text{C}$;
 $\rho\omega$ – массовая скорость среды, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
 A – амплитуда пульсаций расхода, %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев С.М., Никаноров О.Л., Калентьев В.И. Прямоточный вертикальный парогенератор. Патент № 2072067 на изобретение. Бюллетень № 2, 1997.
2. Будов В.М., Дмитриев С.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Москаленко В.М., Харионовский В.В. Прочность элементов теплообменных устройств в условиях случайных пульсаций температур. М.: Атомиздат, 1979.