

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

Нижегородский государственный технический университет, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖКАНАЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА С ДВУСТОРОННИМ ОБОГРЕВОМ

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментальных исследований нестационарного температурного состояния теплопередающей поверхности проточных парогенерирующих элементов (ПГЭ) с двухсторонним обогревом [1] в широком диапазоне режимных параметров. Исследовано влияние частоты и амплитуды пульсаций расхода рабочего тела на величину пульсаций температуры теплопередающей стенки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Особенности эксплуатации ядерных энергетических установок, связанных с радиоактивностью греющего теплоносителя, предъявляют ряд дополнительных требований к безопасности оборудования, входящего в их состав. При этом особое внимание традиционно уделяется парогенераторам, через теплообменную поверхность которых осуществляется энергетическая связь между греющим теплоносителем и рабочим телом. Надежность работы парогенератора в целом определяется долговечностью теплообменной поверхности. Последняя определяется рядом факторов, одним из которых является межканальная неустойчивость [2], приводящая к возникновению пульсаций расхода рабочего тела, и, как следствие, пульсациям температуры теплопередающей стенки. Изменение температуры стенки во времени приводит к появлению нестационарных термических напряжений, т.е. подвергает рассматриваемую конструкцию воздействию циклической нагрузки. Как известно, под действием циклических нагрузок материал накапливает поврежденность, величина которой зависит от амплитуды действующей нагрузки. Воздействие термических напряжений, возникающих вследствие пульсации температуры стенки можно отнести к процессу многоциклового усталости [3].

При расчете термических напряжений в условиях пульсаций температур основной трудностью является определение типовых режимов нагружения конструкции, характерных для рассматриваемых эксплуатационных режимов. В большинстве случаев получение аналитических выражений для поля температурных пульсаций практически не возможно. Поэтому актуальным является проведение экспериментальных исследований статистических характеристик температурных пульсаций, являющихся исходными данными для оценки долговечности парогенерирующих элементов на стадии проектирования.

2. ОПИСАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО СТЕНДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПГЭ

Экспериментальные исследования температурного состояния теплообменной поверхности ПГЭ проводились на теплофизическом стенде ФТ-80. Стенд представляет собой три гидравлически замкнутых контура. По первому контуру циркулирует греющий теплоноситель, по второму рабочее тело, по третьему – техническая вода. Конструкция теплофизического стенда позволяет проводить исследования в диапазоне режимных параметров, характерных для современных ЯЭУ.

Для исследования температурного состояния теплопередающей поверхности ПГЭ на стенде установлены конструктивно идентичные модели двух типов, отличающиеся количеством и местоположением термоэлектрических преобразователей на поверхности наружной трубы и термоэлектрических зондов во внутренней ее полости. Анализ конструктивных отличий экспериментальных моделей от штатных ПГЭ показал, что испытания в условиях данного стенда являются представительными в отношении конструкции объекта испытаний, режимов, параметров и условий испытаний.

Временные реализации температурных полей и расхода питательной воды фиксируются с помощью компьютерной системы сбора и обработки экспериментальных данных, основанной на современных многофункциональных платах ввода-вывода экспериментальной информации.

Диапазон исследованных параметров: массовая скорость $\rho\omega = 50-450$ кг/м²·с, давление питательной воды $P = 2.5-4.15$ МПа, температура питательной воды $T_{п.в.} = 50-150$ °С, амплитуда пульсаций расхода $A = 0 \div 100$ %, частота пульсаций $f = 0 \div 3$ Гц.

3. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения представительных исследований температурного состояния теплообменной поверхности ПГЭ при пульсациях расхода рабочего тела необходимо проводить испытания штатных ПГ, имеющих только им присущие пульсационные характеристики, что приводит к большим материальным затратам. На теплофизическом стенде ФТ-80 реализована альтернативная методика исследований

температурного состояния теплообменной поверхности ПГЭ при пульсациях расхода среды второго контура. Для этого в состав стенда включен генератор искусственных возмущений расхода питательной воды плунжерного типа – гидропульсатор. С помощью гидропульсатора на входе в единичный ПГЭ, оснащенный необходимым количеством термомпар, создавались вынужденные гармонические колебания расхода с различной частотой и амплитудой.

Временные реализации температурных полей и расхода питательной воды фиксировались с помощью компьютерной системы сбора и обработки экспериментальных данных.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты экспериментального исследования температурных пульсаций теплообменной поверхности ПГЭ при постоянном расходе рабочего тела

Процесс теплообмена и парообразования в парогенерирующем элементе сопровождается пульсациями перепада давления, что приводит, даже при отсутствии гидродинамической неустойчивости, к некоторым пульсациям расхода среды второго контура. Кроме того, в любом контуре присутствуют гидродинамические пульсации потока за счет работы оборудования, механических вибраций и т.д. Поэтому обеспечение постоянного расхода среды второго контура через парогенерирующий канал весьма условно. При проведении опытов расход считался постоянным, если амплитуда пульсаций не превышала 5% от среднего расхода среды второго контура.

Как показали проведенные исследования, при постоянной массовой скорости местоположение участка с температурными пульсациями в стенке совпадает с началом зоны ухудшенного теплообмена, характеризуемого относительно резким изломом зависимости температуры теплообменной поверхности по высоте парогенерирующего канала, и расположенного в самом конце испарительного участка парогенерирующего элемента. С увеличением расхода участок с температурными пульсациями в стенке несколько перемещается к началу испарительной зоны.

Исследования показывают, что температурные пульсации в стенке в зоне ухудшенного теплообмена носят характер случайного процесса (рис.1), статистические характеристики которого изменяются с изменением режимных параметров.

Анализ результатов исследований показывает, что спектр температурных пульсаций ограничен частотой ~2 Гц. Основная мощность спектра располагается до частоты ~1 Гц (рис.2).

Максимальное значение f_0 находится в зоне, соответствующей максимальной интенсивности температурных пульсаций в стенке. По мере удаления от максимума f_0 к начальному участку зоны pulsa-

ций частота пульсаций несколько падает, но остается достаточно высокой. При удалении от максимума f_0 к концу пульсационной зоны частота температурных пульсаций резко снижается. Спектр температурных пульсаций в начале и в конце пульсационной зоны соответствует более широкому случайному процессу, по сравнению с процессом на участке с максимальной интенсивностью и частотой температурных пульсаций.

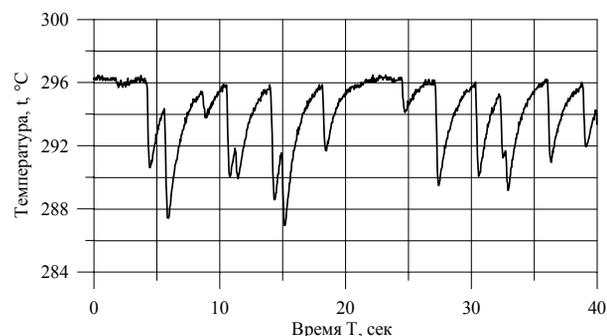


Рис.1. Реализация температурных пульсаций внутренней поверхности наружной трубы ПГЭ на участке ухудшенного теплообмена ($P=3.2$ МПа; $\rho\omega=105$ кг/(м²·с))

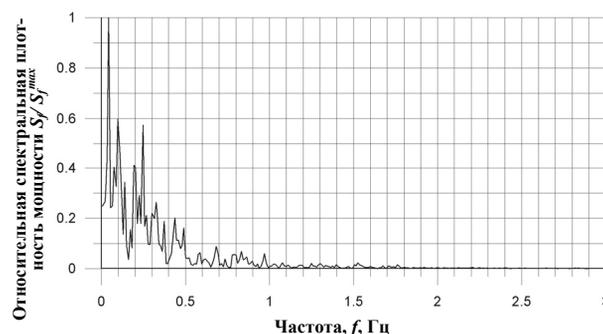


Рис.2. Спектр температурных пульсаций без пульсаций расхода питательной воды ($P=3.2$ МПа; $\rho\omega=52.5$ кг/(м²·с))

Различный характер зависимости частоты температурных пульсаций на начальном и конечном участке пульсационной зоны объясняется следующим.

На начальном участке пульсационной зоны температурные пульсации в стенке связаны с образованием, пульсацией и исчезновением сухих пятен в кипящей пристенной пленке; наличие большого числа источников температурных пульсаций приводит к высокой частоте температурных пульсаций малой интенсивности.

Температурные пульсации в самом конце пульсационной зоны будут иметь место только при значительных колебаниях положения границы перехода пленка-пар. Так как такие возмущения относительно редки, то и температурные пульсации имеют низкую частоту и интенсивность. Частота температурных пульсаций в стенке f_0 с увеличением массовой скорости возрастает от $f_0=0.1\div 0.25$ Гц, при $\rho\omega=52$ кг/(м²·с) (рис.2), до $f_0=0.5\div 0.65$ Гц, при $\rho\omega=105$ кг/(м²·с) (рис.3).

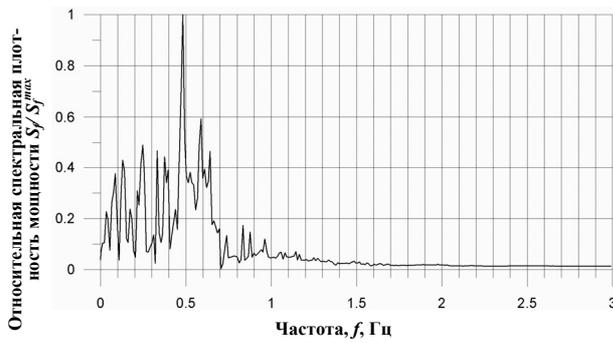


Рис.3. Спектр температурных пульсаций без пульсаций расхода питательной воды ($P=3.2$ МПа; $\rho\omega=105$ кг/(м²·с))

4.2. Результаты экспериментального исследования температурных пульсаций теплообменной поверхности ПГЭ при пульсациях расхода рабочего тела

Интенсивность температурных пульсаций в стенке. Зависимость интенсивности температурных пульсаций в стенке от амплитуды пульсаций расхода питательной воды имеет ряд свойств, общих для всего исследуемого диапазона параметров (рис.4). В зависимости от амплитуды пульсации расхода можно выделить два характерных участка.

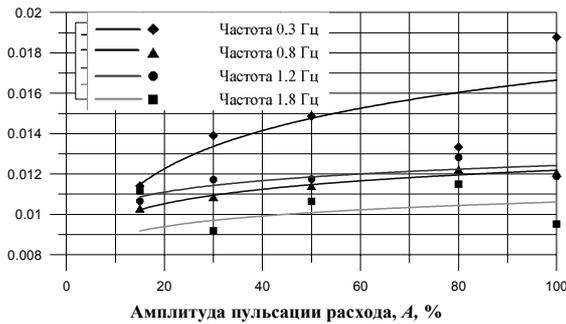


Рис.4. Зависимость интенсивности пульсаций температуры от амплитуды и частоты пульсаций расхода ($P=3.2$ МПа; $\rho\omega=105$ кг/(м²·с))

На первом участке при увеличении амплитуды пульсаций расхода от $A \sim 0$ до $A=A_{гр}$ происходит значительное увеличение интенсивности температурных пульсаций в стенке. Дальнейшее увеличение амплитуды пульсаций расхода вплоть до $A=1$ приводит к относительно слабому увеличению интенсивности температурных пульсаций в стенке.

Переход от первого участка ко второму характерному участку этой зависимости происходит в некотором интервале амплитуды пульсаций расхода, который можно характеризовать величиной $A_{гр}$. Значение $A_{гр}$ смещается в сторону больших амплитуд с увеличением массовой скорости $\rho\omega$ и находится в интервале от $A=0.2 \div 0.25$ для $\rho\omega=50$ кг/(м²·с), до $A \sim 0.35 \div 0.4$ для $\rho\omega=210$ кг/(м²·с).

При постоянной амплитуде пульсаций расхода и постоянном среднем расходе питательной воды интенсивность температурных пульсаций в стенке уменьшается с увеличением частоты пульсаций. При этом наибольшего значения интенсивность температурных пульсаций достигает при частоте около $0.2 \div 0.3$ Гц. В диапазоне частот пульсаций

расхода от 1.2 до 2.3 Гц интенсивность пульсаций температуры изменяется очень незначительно.

Спектральный анализ температурных пульсаций в стенке на участке ухудшенного теплообмена. Анализ результатов исследований показывает, что при постоянном среднем расходе, наиболее значительное влияние на процесс пульсации температуры в стенке парогенерирующего канала оказывают частоты менее 0.8 Гц, так как в этом диапазоне наибольшее значение спектральной плотности мощности температурных пульсаций в стенке соответствует частоте пульсаций расхода (рис.5). Это свидетельствует о полной взаимосвязи данных процессов.

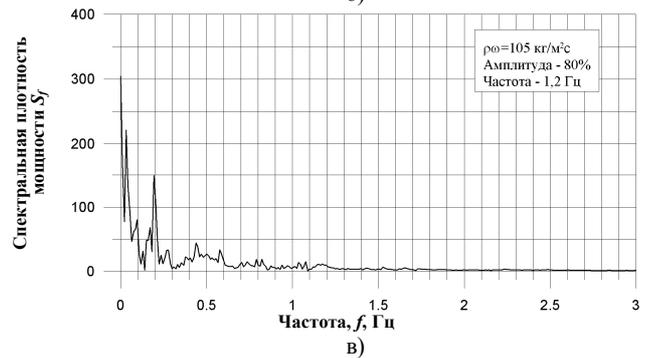
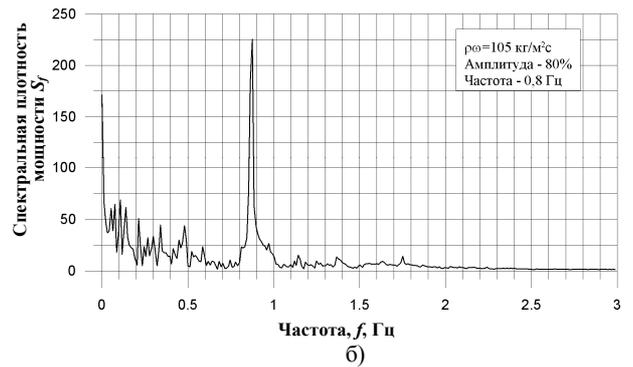
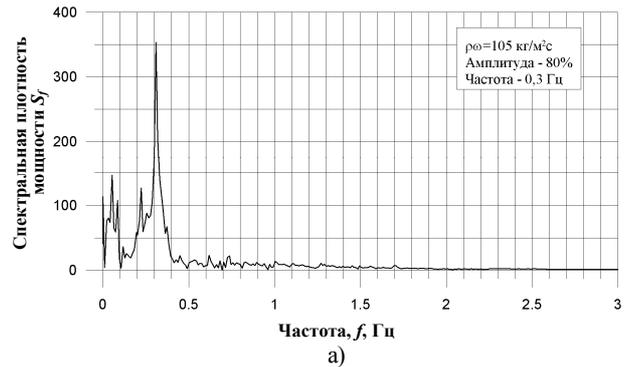


Рис.5. Зависимость спектральной плотности мощности пульсаций температуры теплопередающей стенки от частоты пульсаций расхода: а — $f=0.3$ Гц; б — $f=0.8$ Гц; в — $f=1.2$ Гц

Следует отметить снижение абсолютного значения спектральной плотности мощности при увеличении частоты пульсаций расхода питательной воды (рис.5 а, б), что означает уменьшение влияния процесса пульсации расхода на процесс пульсации температуры в стенке.

Дальнейшее увеличение частоты пульсаций расхода приводит к исчезновению пика спектральной

плотности мощности, соответствующего частоте пульсаций расхода (рис.5 в). Это говорит о том, что высокочастотные пульсации расхода (более 0.8 Гц) не являются процессом, определяющим пульсации температуры в стенке парогенерирующего канала. Данный результат получен во всем диапазоне исследованных значений $\rho\omega$.

На рис.6 представлена зависимость спектральной плотности мощности температурных пульсаций в стенке от амплитуды пульсаций расхода.

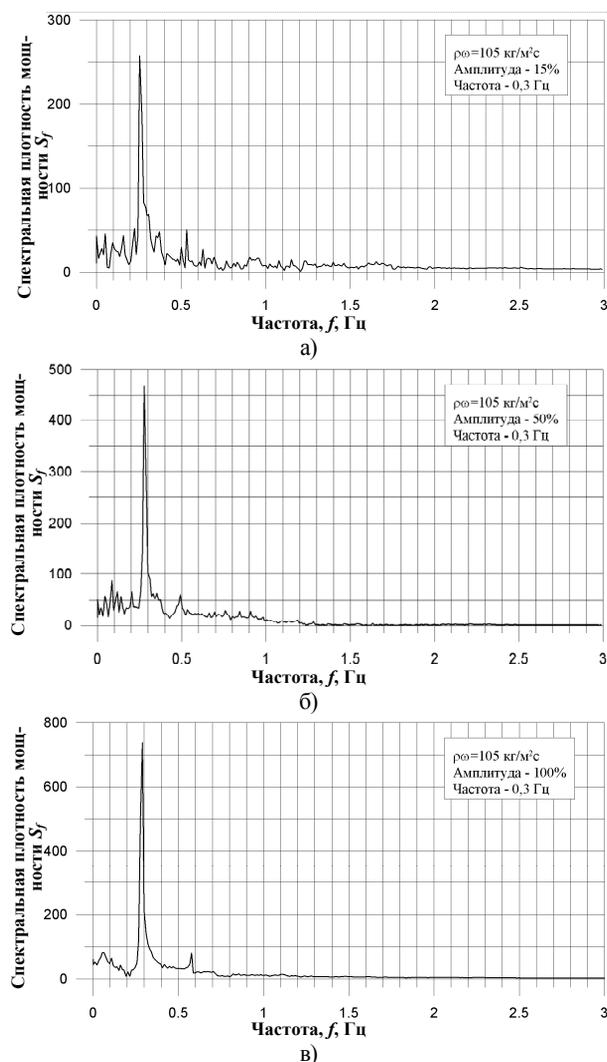


Рис.6. Зависимость спектральной плотности мощности пульсаций температуры теплопередающей стенки от амплитуды пульсаций расхода: а — $A=15\%$; б — $A=50\%$; в — $A=100\%$

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что увеличение амплитуды пульсации расхода приводит к увеличению абсолютного значения спектральной плотности мощности, что означает усиление влияния процесса пульсации расхода на процесс пульсации температуры в стенке. Можно отметить так же общее уменьшение размытости спектра при увеличении амплитуды пульсации расхода.

Это является следствием того, что мощность спектра концентрируется вокруг частоты пульсации расхода, указывая тем самым на его доминирующее влияние на процесс пульсации температуры теплопередающей стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований влияния частоты и амплитуды пульсаций расхода рабочего тела на величину пульсации температуры теплообменной поверхности ПГЭ с двусторонним обогревом в исследуемом диапазоне режимных параметров были выявлены следующие основные закономерности.

1. При постоянном расходе питательной воды максимальная интенсивность температурных пульсаций имеет место в зоне ухудшенного теплообмена в конце испарительного участка. Спектр температурных пульсаций теплообменной поверхности ПГЭ ограничен частотой 2 Гц. Основная мощность спектра расположена на частотах 0.3-0.8 Гц.

2. Пульсации расхода питательной воды приводят, при прочих равных условиях, к увеличению уровня интенсивности температурных пульсаций на участке ухудшенного теплообмена.

3. Спектральный состав температурных пульсаций теплообменной поверхности ПГЭ определяется спектральным составом пульсаций расхода питательной воды. На испарительном участке при постоянной амплитуде пульсаций расхода с увеличением частоты пульсаций спектральная плотность температурных пульсаций в стенке расширяется.

4. При постоянном среднем расходе питательной воды с увеличением амплитуды пульсаций расхода усиливается его влияние на процесс пульсации температуры в теплообменной стенке, а ширина спектра температурных пульсаций уменьшается.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПГЭ – парогенерирующий элемент;
 $\rho\omega$ – массовая скорость среды, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
 A – амплитуда пульсации расхода, %;
 f – частота пульсации расхода, Гц;
 $T_{п.в}$ – температура питательной воды, $^{\circ}\text{C}$;
 P – давление перегретого пара, МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев С.М., Никаноров О.Л., Калентьев В.И. Прямоточный вертикальный парогенератор. Патент № 2072067 на изобретение. Бюллетень № 2, 1997.
2. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. М.: Атомиздат, 1980.
3. Судаков А.В., Трофимов А.С. Пульсации температур и долговечность энергооборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.