

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ ФРАГМЕНТА КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ И РАСХОЛАЖИВАНИЯ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ

**С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин, А.В. Мамаев**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.  
603950. Нижний Новгород, ул. Минина, 24*



Разработана и изготовлена экспериментальная модель фрагмента коллекторного узла теплообменника системы очистки и расхолаживания водо-водяных реакторов. С использованием данной модели проведены экспериментальные исследования температурного состояния.

Получены экспериментальные распределения температуры в характерных зонах исследуемого коллекторного узла. Определены наиболее термически напряженные зоны теплообменной поверхности. Выполнен анализ интенсивности пульсаций температур теплообменной поверхности и потока теплоносителя в различных зонах, представлены статистические и спектральные характеристики пульсаций температуры. Предложены решения, направленные на снижение интенсивности термопульсаций.

Разработана расчетная модель фрагмента коллекторного узла теплообменника, даны рекомендации по построению расчетных моделей. Приведены результаты численного моделирования нестационарного температурного состояния и характеристик температурных пульсаций при различных режимах обтекания модели с применением CFD-кода ANSYS CFX 14.0.

Произведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных. Показано, что расчетные данные совпадают с экспериментальными с достаточной точностью, что дает возможность использовать построенную расчетную модель при дальнейшем обосновании конструкции теплообменника.

**Ключевые слова:** теплообмен, температурное состояние, термопульсации, теплоноситель, коллекторный узел, CFD.

## ВВЕДЕНИЕ

Существенное влияние на ресурс высоконапряженного теплообменного оборудования оказывают гидродинамические и термодинамические процессы, сопровождающиеся пульсациями температур. Температурные пульсации могут вызывать значительные колебания температурных напряжений теплообменной поверхности, приводящих к усталостному разрушению элементов оборудования. При проектировании оборудования теплоэнергетических установок необходимо учитывать пульсации температур и путем

рационального выбора режимных параметров или применения специальных конструктивных решений снижать их до допустимого уровня, чтобы обеспечить надежную эксплуатацию оборудования в течение требуемого срока службы [1–3]. Определение характеристик термопульсаций зачастую связано с проведением эксперимента. Однако обоснование конструкции теплотехнического оборудования ЯЭУ на основании проведения полномасштабных экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена на опытных образцах оборудования сопровождается чрезвычайно большими затратами. В современных условиях наиболее перспективен расчетно-экспериментальный подход с применением CFD-кодов, который позволяет снизить расходы при проектировании теплообменных аппаратов. Экспериментальные исследования, выполняющие функцию инструмента для верификации программных средств, в рамках данного подхода следует проводить на масштабных моделях оборудования или отдельных его узлах.

В работе реализован расчетно-экспериментальный подход с применением трехмерного теплогидравлического кода ANSYS CFX 14.0. Результаты комплексных исследований пульсаций температуры, обусловленных наличием смешанной конвекции, получены на модели фрагмента коллекторного узла теплообменника. Работа посвящена выбору оптимальных режимных параметров и конструктивных решений, обеспечивающих снижение интенсивности пульсаций температуры, а также разработке рекомендаций для адаптации методик численного моделирования термопульсаций в исследуемой модели теплообменника.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Экспериментальные исследования проводились на теплогидравлическом стенде ФТ-80, входящем в состав экспериментальной базы кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Стенд представляет собой три гидравлически замкнутых контура, имитирующих энергетическую установку. По первому контуру циркулирует греющий теплоноситель, по второму – рабочее тело, по третьему – охлаждающая вода. В качестве теплоносителя и рабочего тела используется вода высокой степени чистоты. Конструкция стенда позволяет проводить исследования в диапазоне режимных параметров, соответствующих современным ЯЭУ.

Экспериментальный участок включен в состав первого и третьего контуров стенда. Общий вид экспериментального участка представлен на рис. 1. Исследуемая модель состоит из следующих основных элементов: корпуса 1; двух боковых плоских крышек 2, 3; коллекторного узла 4, образованного из верхнего и нижнего коллекторов, соединенных между собой шестью прямыми трубками  $\varnothing 20 \times 2.5$  мм; рассекателя 5; решетки-сопротивления 6; боковых 7, 8 и торцевых стенок 9, 10, установленных таким образом, чтобы они образовывали канал прямоугольного сечения, в котором размещена коллекторная сборка; патрубков подвода 11–14 и отвода теплоносителя к исследуемому участку 15; штуцеров вывода термопреобразователей 16; крепежных деталей и т.д. Общая длина модели составляет 1250 мм, диаметр модели – 700 мм. Длина исследуемой части теплообменной поверхности – 360 мм, диаметр – 450 мм.

Движение греющего теплоносителя осуществляется в межтрубном пространстве, движение охлаждающей воды – внутри труб. Принцип движения охлаждающей воды – принудительная циркуляция. Нижний коллектор экспериментальной модели является выходом, а верхний – входом охлаждающей воды.

В модели теплообменника предусмотрено несколько различных вариантов подвода теплоносителя к коллекторному узлу, для чего теплообменник снабжен четырьмя патрубками, три из которых расположены в центральном сечении модели, а один на крышке корпуса [4].

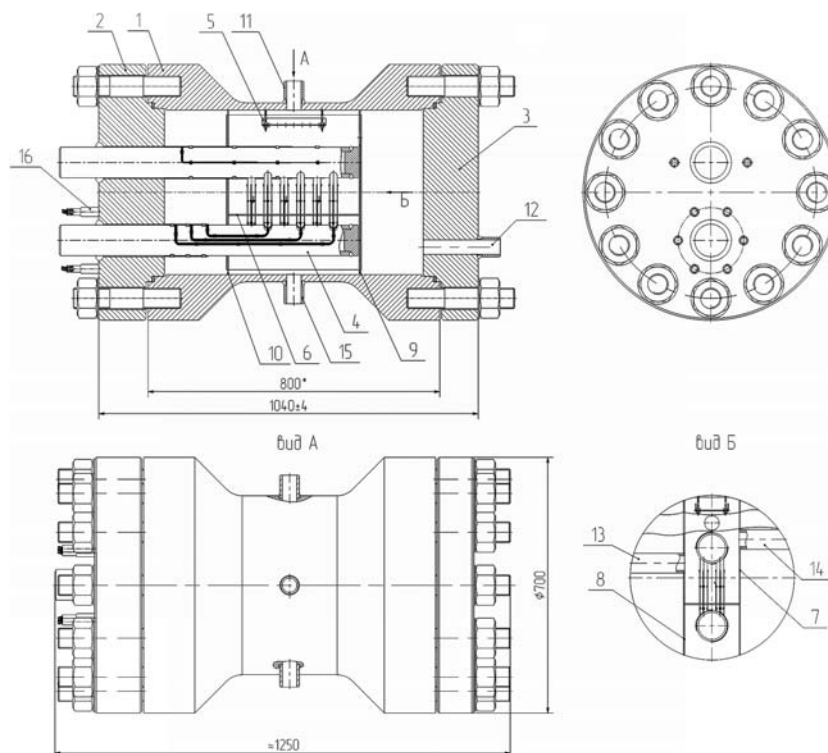


Рис. 1. Общий вид модели теплообменника

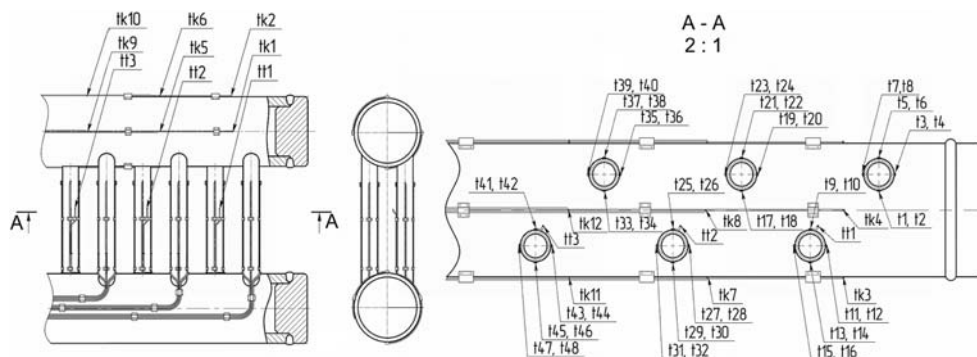


Рис. 2. Схема расположения термопреобразователей в модели

Для исследования поля температуры в модели использовались хромель-копелевые микротермопреобразователи с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ). Чувствительная часть датчика прокатана до диаметра 0,5 мм. Поскольку зоны заделки труб в коллекторы и трубные доски часто подвержены разрушению в результате воздействий пульсаций температур, в модели реализованы следующие способы установки термопреобразователей (рис. 2.):

t1,3,...,47 – датчики, расположенные в металлизированных пазах на поверхности теплообменных труб в сечении, отстоящем от верхнего коллектора на 20 мм (в четырех диаметрально противоположных точках окружности);

t2,4,...,48 – датчики, установленные в том же сечении в потоке теплоносителя над поверхностью теплообменных труб соосно с металлизированными;

tt1,2,3 – вынесенные потоковые термодатчики, установленные над поверхностью теплообменных труб в сечении, расположенном на 30 мм ниже.

Определение наиболее термически напряженных зон верхнего коллектора осуществлялось при помощи металлизированных термопреобразователей tk1,2...12, установленных на поверхности верхнего коллектора (в трех сечениях, в четырех диаметрально противоположных точках окружности).

Укрупненно методика проведения экспериментальных исследований заключалась в последовательном выполнении следующих действий:

- организация циркуляции рабочих сред через экспериментальную модель посредством коммутации запорной арматуры;
- обеспечение и поддержание режимных теплофизических параметров;
- стабилизация теплофизических параметров, ожидание окончания переходных процессов;
- запись временных реализаций температурных полей, расходов греющего теплоносителя и охлаждающей воды, расчет их статистических, корреляционных и спектральных характеристик.

В эксперименте была реализована следующая схема движения теплоносителя: по верхнему варианту подвода теплоноситель попадал в исследуемый канал, омывал коллекторную сборку и затем, минуя решетку-сопротивление, отводился через патрубок, расположенный в нижней части корпуса модели. В первой серии экспериментов теплоноситель попадал непосредственно на верхний коллектор; во второй – с целью обеспечения выравнивания поля скорости на входе в исследуемый канал был установлен рассекатель. Исследования проводились в диапазонах температур 200 – 250 °С, массовых скоростей на входном участке 60 – 260 кг/(м<sup>2</sup>·с) и давлений теплоносителя 9 – 12 МПа. Экспериментальное исследование термопульсаций фрагмента коллекторного узла теплообменника системы очистки и расхолаживания водо-водяных реакторов проводилось при низких скоростях принудительного движения теплоносителя. Диапазон чисел Рейнольдса составил от 1732 до 11650.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании чертежной документации была построена трехмерная геометрическая модель коллекторного узла. Общий вид модели с указанием основных конструктивных элементов представлен на рис. 3а. На основании геометрической модели была разработана тетраэдрическая конечно-элементная модель. По результатам предварительных расчетов, выполненных для стационарного случая, производились анализ сеточной схожимости и корректировка размеров пристеночных элементов, а также количества призматических слоев [5]. На рисунке 3б приведено сечение конечно-элементной модели. В увеличенном масштабе представлен вид призматических слоев.

Расчетная модель состоит из следующих основных элементов:

- корпусные конструкции (рассекатель, решетка-сопротивление) и коллекторная сборка;
- греющий теплоноситель;
- охлаждающая вода.

При решении задачи было создано две подобласти, связанные между собой (узел в узел) в процессе генерации сетки: сталь и несжимаемая жидкость (охлаждающая вода в коллекторе и греющий теплоноситель). Для подобластей были выбраны следующие математические модели:

- модель твердого тела для моделирования теплопереноса в корпусных конструкциях;
- несжимаемая жидкость для моделирования течения жидкости.

При задании математических моделей были учтены физические свойства применяемых материалов и рабочих сред (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность, молекулярная вязкость). На выделенные расчетные подобласти налагались граничные условия для подобласти 1: тип границы – стенка; на внешней стенке корпуса теплооб-

мен отсутствует (адиабатическая стенка), граничные условия на внутренних поверхностях определяются из условий связанного теплообмена; для подобласти 2: тип границы – вход (выход); на входе задается температура и массовый расход (в зависимости от режима работы). На поверхностях, контактирующих с металлом, граничные условия определяются из условий связанного теплообмена.

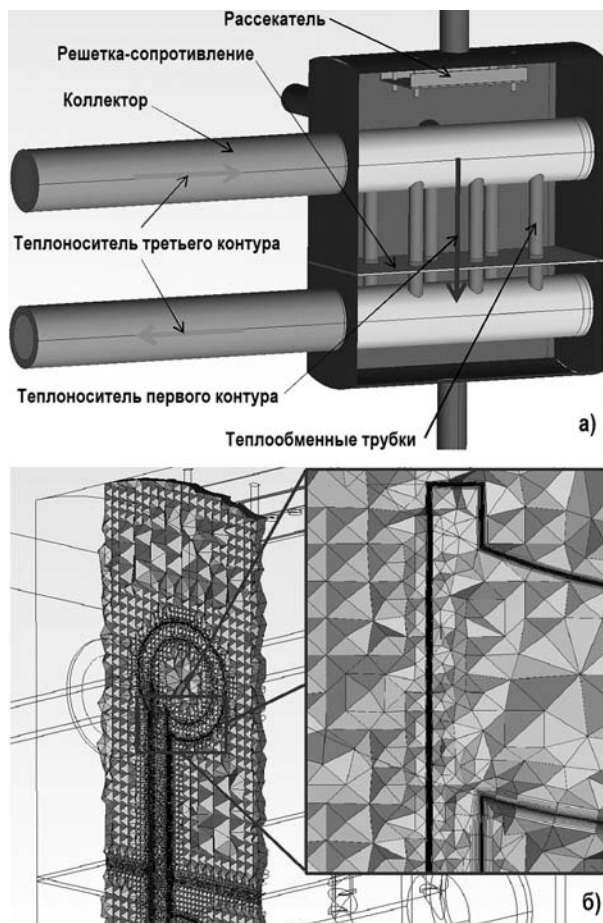


Рис. 3. Расчетная модель коллекторного узла: а) общий вид геометрической модели с боковым разрезом; б) сечение конечно-элементной модели

В процессе создания расчетной модели особое внимание уделялось выбору модели турбулентности. При проведении стационарного расчета использовалась SST-модель, поскольку результаты предварительных расчетных исследований давали наилучшую сходимость средних значений температуры с применением именно этой модели. Для нестационарного расчета выбрана SAS-SST-модель турбулентности дающая LES-подобные решения, позволяющие разрешить вихревые структуры [5 – 8]. При этом она работает в рамках RANS-подхода, существенно менее требовательного к вычислительным ресурсам, чем LES-подход.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ распределений температуры вблизи и на поверхности теплообменных труб для режимов до и после установки рассекателя позволил установить следующее:

- при малых массовых скоростях теплоносителя (от 60 до 110 кг/(м<sup>2</sup>·с)) наличие



рассекателя практически не влияет на характер течения теплоносителя, что проявляется в совпадении показаний большинства термопреобразователей (разность показаний для режима с рассекателем и без него менее  $1^{\circ}\text{C}$ );

– по мере увеличения массовой скорости теплоносителя от 130 до  $260 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  температурное состояние коллекторного узла для режимов с рассекателем и без него начинает существенно различаться (разность между показаниями микротермопреобразователей для этих режимов, в основном, лежит в диапазонах от  $2,5^{\circ}\text{C}$  и выше); вероятно, подобный эффект в отсутствие выравнивания поля скорости обусловлен появлением направленных течений, отличных от режимов с использованием рассекателя;

– уровень температур, регистрируемых термопарами, установленными в потоке теплоносителя, в среднем несколько выше (на  $3 - 5^{\circ}\text{C}$ ) в режимах с рассекателем.

Анализ интенсивности пульсаций (среднеквадратическое отклонение) температуры позволяет сделать следующие выводы:

– при увеличении массовой скорости теплоносителя первого контура интенсивность пульсаций температуры, регистрируемой большинством металлизированных и потоковых термопар, установленных вблизи теплообменных труб, возрастает (рис. 4), а расположенных во фронтальной относительно набегающего потока части верхнего коллектора (рис. 5) – снижается с увеличением массовой скорости, что наиболее ярко выражено для режимов без рассекателя;

– уровень интенсивности пульсаций температуры как потока, так и металла для режимов без рассекателя превосходит аналогичный уровень в режимах с рассекателем в среднем в 1,5 раза. С увеличением скорости эта тенденция становится ярко выраженной.

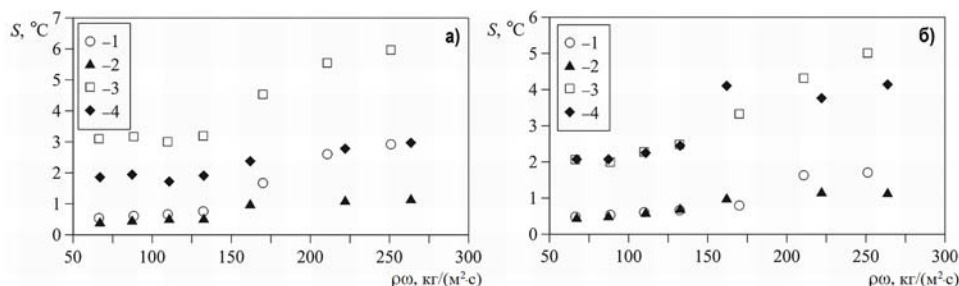


Рис. 4. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры  $S$  потока 1 и поверхности теплообменных труб 3 без рассекателя, а также потока 2 и поверхности теплообменных труб 4 с рассекателем от массовой скорости теплоносителя  $\rho_w$ : а) – центральная зона канала; б) – периферийная зона канала

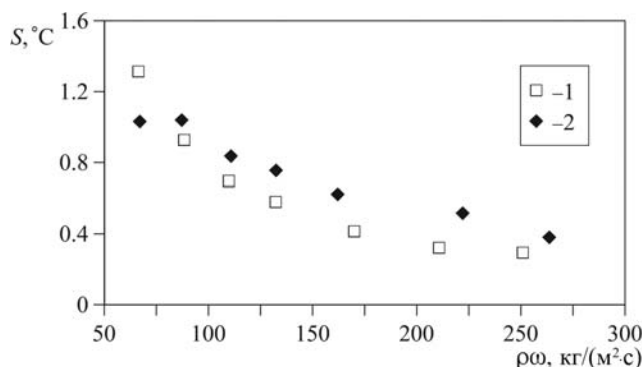


Рис. 5. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры  $S$  фронтальной части верхнего коллектора от массовой скорости теплоносителя  $\rho_w$

Таким образом, установка рассекателя изменяет характер обтекания коллекторного узла, благодаря чему снижается интенсивность пульсаций.

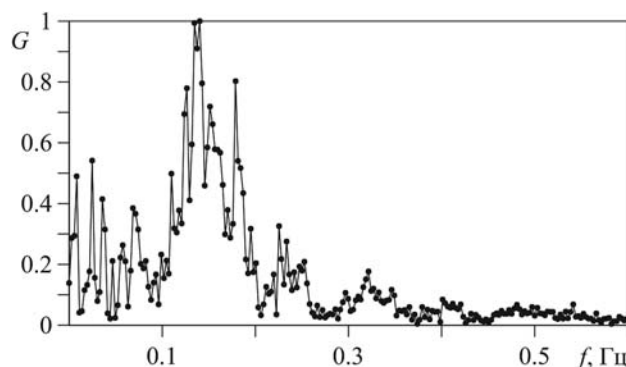


Рис. 6. Нормированная спектральная плотность пульсаций температуры стенки теплообменной трубки  $G$

Сравнительный анализ спектральных характеристик пульсаций температуры показал, что диапазоны частот, в которых сосредоточена основная энергия спектра, схожи для режимов без рассекателя и после его установки. Однако режимы без рассекателя характеризуются несколько большими значениями энергии спектров. Спектр пульсаций температуры стенки практически на всех реализациях имеет пики в области частот  $0,08 - 0,2$  Гц (рис. 6). Основная энергия спектра сгруппирована в полосе частот от 0 до  $0,45$  Гц. Установлено, что энергия колебаний температуры зависит от расхода теплоносителя первого контура. При этом наблюдается неравномерность распределения энергии колебаний по периметру теплообменных трубок, что свидетельствует о сложном характере движения теплоносителя.

С увеличением расхода теплоносителя количество металлизированных термопар, регистрирующих пульсации температур, спектры которых имеют выраженные максимумы, уменьшается, что наиболее характерно для режимов с рассекателем. Сглаживание спектров пульсаций, вероятно, происходит благодаря турбулизации потока в пристеночной области.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные исследования нестационарного температурного состояния и характеристик термопульсаций в модели коллекторного узла теплообменника проводились для варианта с рассекателем. Расчет произведен для четырех экспериментальных режимов, отличающихся расходом и температурой теплоносителя на входе в экспериментальный участок. В результате были получены временные реализации динамически изменяющегося процесса (рис. 7). По полученным реализациям производились построение и анализ распределений температур, рассчитывалась величина относительного отклонения расчетной величины от экспериментальной. Пример построения распределения температур по сечениям теплообменных труб представлен на рис. 8. Значения температуры в градусах Цельсия отложены по радиальной оси.

Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментом. Количество точек, относительное отклонение которых не превышает 5%, составляет более 60%. При этом наилучшее совпадение средних значений расчетных и экспериментальных температур получено в потоке теплоносителя для точек, расположенных вблизи третьей и четвертой теплообменных труб. Наименьшей величиной относительного отклонения расчетной от экспериментальной температуры стенки характеризуются первая и третья теплообменные трубки.

В результате сравнительного анализа интегральных температур выхода рабочих сред из модели установлено, что величина относительного отклонения расчетной температуры от экспериментальной для рассмотренных режимов не превышает 4,5%.

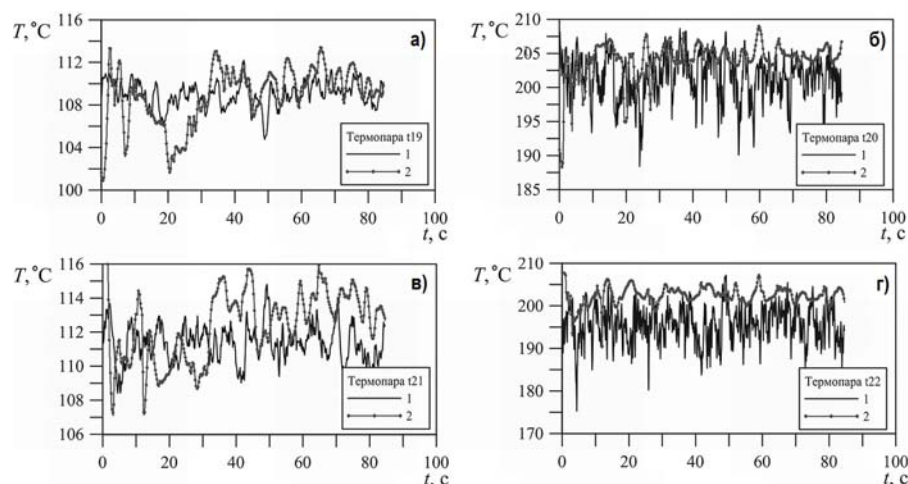


Рис. 7. Характерные экспериментальные 1 и расчетные 2 временные реализации пульсаций температур в стенке (а, в) и в потоке теплоносителя (б, г), полученные для теплообменной трубки

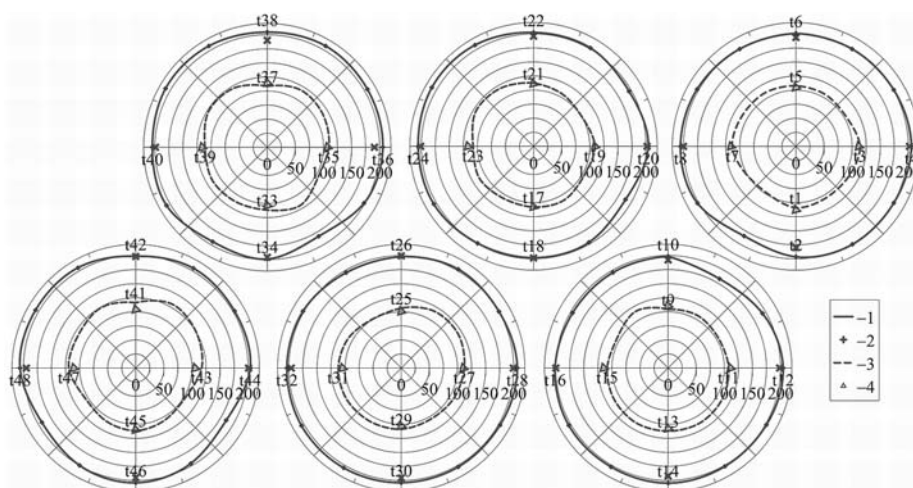


Рис. 8. Расчетное (1, 3) и экспериментальное (2, 4) распределения температуры в потоке теплоносителя и в стенках теплообменных труб

Сравнительный анализ статистических характеристик расчетных и экспериментальных пульсаций температуры, таких как интенсивность, взаимно корреляционная функция, спектральная плотность пульсаций показал, что

- расчетная величина интенсивности температурных пульсаций несколько выше экспериментальной, что наиболее характерно для температуры стенки;
- энергетические спектры пульсаций температур, полученные в результате расчета и эксперимента, имеют схожий характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных работ исследовано температурное состояние фрагмента коллекторного узла теплообменника. Установлено наличие термопульсаций, обусловленных существенными температурными градиентами, в результате которых возникают вторичные конвективные течения теплоносителя, а также образование отрывных течений за верхним коллектором в зоне размещения теплообменных труб. По полученным экспериментальным данным выявлены особенно-



сти обтекания потоком теплоносителя теплообменной поверхности. Определяющими для стенок коллекторного узла являются низкочастотные пульсации температуры в диапазоне 0,08 – 0,2 Гц амплитудой 6 – 10 °С. Погрешность измерения температуры в исследуемой области не превышает  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Поскольку улучшение ресурсных характеристик теплотехнического оборудования связано со снижением уровня пульсаций температуры, сопровождающих процессы нестационарного теплообмена, на входном участке теплообменника смонтирован рассекатель. Установлено, что применение рассекателя эффективно при массовых скоростях теплоносителя свыше 130 кг/(м<sup>2</sup>·с).

Результаты экспериментального исследования температурного состояния коллекторного узла приняты для практического использования в ОАО «ОКБМ Африкантов». Сформированные таблицы данных применены для валидации результатов расчетов и уточнения расчетных моделей гидродинамических кодов, используемых при проведении расчетного обоснования конструкции теплообменников.

На основе CFD-кода ANSYS CFX разработана и апробирована расчетная модель, необходимая для моделирования температурного состояния фрагмента коллекторного узла теплообменника аварийного расхолаживания водо-водяных реакторов ЯЭУ.

### Литература

1. *Судаков А.В.* Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования. / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 176 с.
2. *Судаков А.В.* Напряжения при пульсациях температур. / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – М.: Атомиздат, 1980. – 64 с.
3. *Будов В.М.* Форсированные теплообменники ЯЭУ. / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174 с.
4. *Рязанов Р.Р. и др.* Экспериментальное исследование нестационарного температурного состояния и характеристик термопульсаций фрагмента коллекторного узла теплообменника ЯЭУ. / Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). – С. 206 – 212.
5. ANSYS CFX-Pre User's Guide ANSYS, Inc. Release 14.0. 2011.
6. *Козелков А.С.* Математические модели и алгоритмы для имитационного моделирования задач гидродинамики и аэродинамики: учебное пособие. / А.С. Козелков и др. – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. – 164 с.
7. *Снегирев А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие. / А.Ю. Снегирев. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
8. *Menter F.R.* Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD Version 11.0. ANSYS Germany GmbH, 2012. – 70 с.

Поступила в редакцию 02.07.2014 г.

### Авторы

Дмитриев Сергей Михайлович; ректор, профессор, доктор техн. наук

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Рязанов Ренат Рамильевич, аспирант,

E-mail: ryazapov.renat@gmail.com

Соборнов Алексей Евгеньевич, аспирант

E-mail: wisestjedi@mail.ru

Котин Андрей Валерьевич, инженер

E-mail: an.kotin@yandex.ru

Мамаев Александр Викторович, инженер

E-mail: aleks\_may@mail.ru

UDC 621.039

## **COMBINED NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF TEMPERATURE PULSATIONS OF COLLECTOR UNIT FRAGMENT OF HEAT EXCHANGER CLEAN-UP AND COOLDOWN POWER NUCLEAR UNIT SYSTEMS**

Dmitriev S.M., Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Kotin A.V., Mamaev A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev.

24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

### **ABSTRACT**

An experimental model of collector unit fragment of heat-exchanger clean-up and cooldown power nuclear unit systems has been designed and manufactured. Experimental researches of temperature state have been carried out with the use of a given experimental model.

Experimental temperature dispersions in characteristic zones of collector unit under investigation have been obtained. Most thermally high-stress zones of heat-exchange surface have been determined.

Researches of intensity temperature pulsations of heat-exchange surface and coolant flow in different zones has been carried out. Static and spectral characteristics of temperature pulsations have been presented. Solutions focused on degradation of intensity temperature pulsations have been proposed.

Computation model of collector unit fragment of heat-exchanger has been developed. Computation models construction recommendations have been given. Results of numerical simulation transient temperature state and characteristics of temperature pulsations at the different regimes of flow of model using CFD- code ANSYS CFX 14. 0. have been presented.

Comparative analysis of experimental and computation data has been carried out. It has demonstrated that computation data are as experimental data with adequate accuracy that allows to use constructed computation data at a further substantiation heat-exchanger construction.

**Key words:** heat-exchange, temperature state, temperature pulsations, coolant, collector unit, CFD.

### **REFERENCES**

1. Sudakov A. V. Pulsations of temperature and electrical equipment's component life. Leningrad. Energoatomizdat Publ., 1989. 179 p. (in Russian).
2. Sudakov A. V. Voltages at temperature pulsations. Moscow. Atomizdat Publ., 1980. 64 p. (in Russian).
3. Budov V. M. Forced heat exchangers of water cooled nuclear power unit. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 174 p. (in Russian).
4. Ryazapov R. R. et al. Experimental investigation of transient temperature state and characteristics of temperature pulsations of collector unit fragment of heat-exchanger nuclear power unit. Proceeding of NSTU n.a. R. E. Alekseev. Nizhny Novgorod, NSTU n.a. R.E. Alekseev Publ., 2013, no. 4 (101), pp. 206-212 (in Russian).
5. ANSYS CFX-Pre User's Guide ANSYS, Inc. Release 14.0. 2011.
6. Kozelkov A.S. et al. Mathematical models and algorithms for service simulating test of hydrodynamics and aerodynamics tasks: work book. Nizhny Novgorod, NSTU n.a. R.E. Alekseev Publ., 2014. 164 p. (in Russian).
7. Snegirev A.Y. High performance computing in Applied Physics. Numerical simulation of turbulent flows: work book. St.-Petersburg. Politehnicheskij Universitet Publ.,

2009. 143 p. (in Russian).

8. Menter F.R. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD Version 11.0. ANSYS Germany GmbH, 2012. 70 p.

**Authors**

Dmitriev Sergey Mihaylovich, Rector, Professor, Dr.Sci. (Engineering)

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Ryazapov Renat Ramil'yevich, Assistant

E-mail: ryazapov.renat@gmail.com

Sobornov Aleksey Yevgen'yevich, Postgraduate Student

E-mail: wisestjedi@mail.ru

Kotin Andrey Valer'yevich, Engineer

E-mail: an.kotin@yandex.ru

Mamaev Alexander Viktorovich, Postgraduate Student

E-mail: aleks\_may@mail.ru