

УДК 621.039

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ ФРАГМЕНТА КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЕПЛООБМЕННИКА ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования и анализ температурного состояния и характеристик пульсаций температуры теплопередающих стенок, а также потока однофазного теплоносителя в модели коллекторного узла теплообменника.

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

### 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 или эрозионному разрушению элементов оборудования [1]. Настоящая работа открывает цикл экспериментальных исследований нестационарного температурного состояния и температурных пульсаций в элементах теплообменного оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ), проводимых в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Работы посвящены выбору оптимальных режимных параметров и конструктивных решений, обеспечивающих снижение уровня пульсаций температур, возникающих в рассмотренной модели теплообменника и, как следствие, надежную эксплуатацию оборудования в течение заданного срока службы, а также созданию банка экспериментальных данных необходимого для расчетного обоснования конструкций теплообменников с применением CFD -кодов.

К числу основных причин возникновения пульсаций температур относятся: кризисы теплообмена, флуктуации мощности источника тепла, смешение неизотермических потоков, колебания уровня и пр. Существенным фактором, влияющим на характеристики пульсаций, является характер обтекания теплообменной поверхности. Так, внесение изменения в геометрию канала может привести к существенному снижению интенсивности пульсаций в результате перераспределения полей скоростей и давлений, как в отдельных зонах, так и в рассматриваемой области в целом.

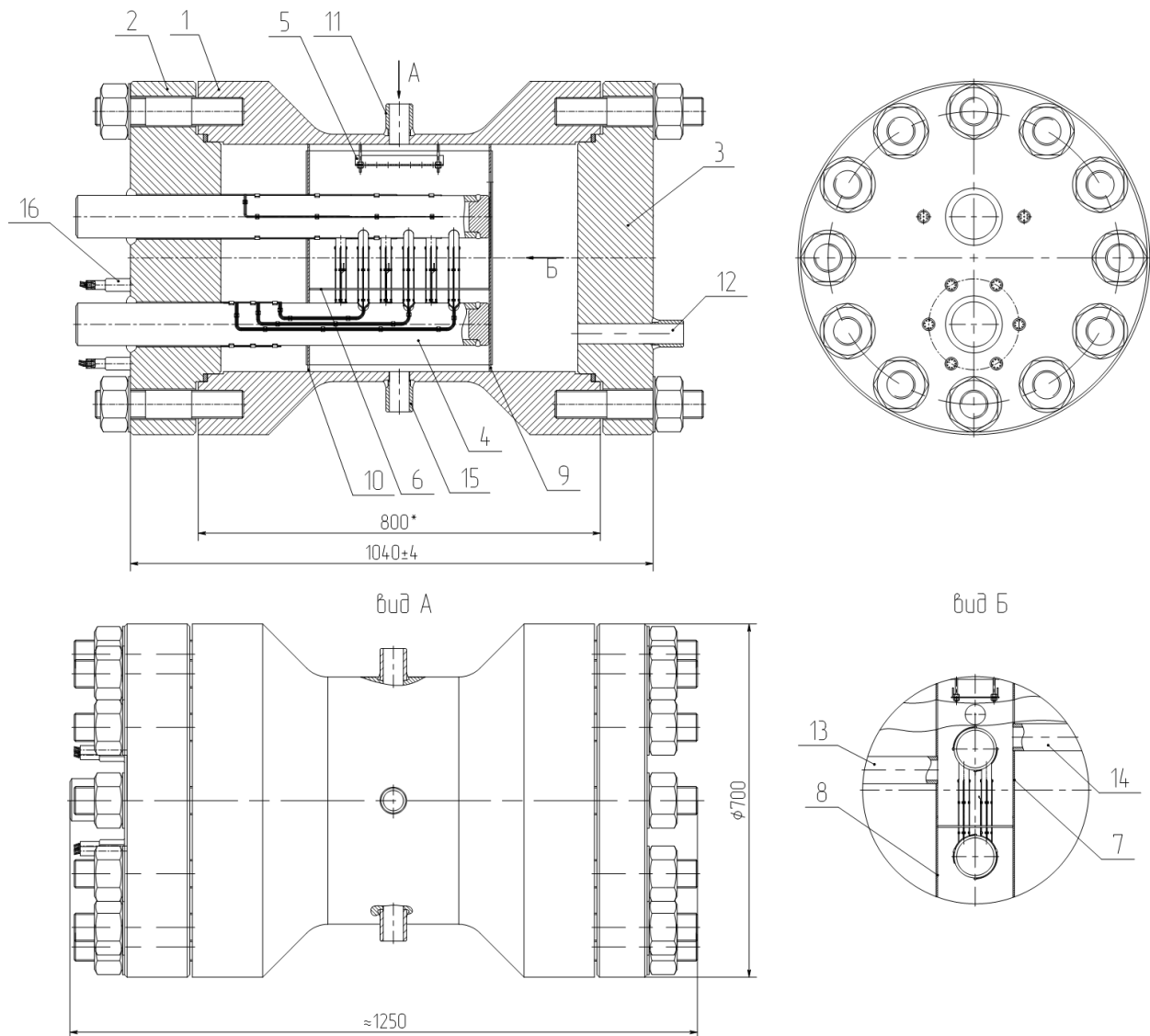
**Целью** данной работы является исследование нестационарного температурного состояния и статистических характеристик пульсаций температур коллекторного узла теплообменника при различных вариантах обтекания теплообменной поверхности при низких массовых скоростях принудительного движения теплоносителя.

### Экспериментальный стенд и методика проведения исследования

Экспериментальные исследования проводились на теплогидравлическом стенде ФТ-80, входящем в состав экспериментальной базы кафедры «атомные, тепловые станции и медицинская инженерия». Стенд представляет собой три гидравлически замкнутых контура имитирующих транспортную энергетическую установку. По первому контуру циркулирует греющий теплоноситель, по второму рабочее тело, по третьему – охлаждающая вода. В качестве теплоносителя и рабочего тела использовалась вода высокой степени чистоты. Кон-

струкция стенда позволяет проводить исследования в диапазоне режимных параметров, соответствующих современным ЯЭУ.

Экспериментальный участок включен в состав первого и третьего контура стенда. Общий вид экспериментального участка представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Общий вид модели теплообменника**

Исследуемая модель состоит из следующих основных элементов:

- корпуса (поз. 1);
- двух боковых плоских крышек (поз. 2, 3);
- коллекторного узла, образованного из верхнего и нижнего коллекторов, соединенных между собой шестью прямыми трубками  $\text{Ø}20 \times 2.5$  мм (поз. 4);
- рассекателя (поз. 5);
- решётки-сопротивления (поз. 6);
- боковых (поз. 7, 8) и торцевых стенок (поз. 9, 10), установленных таким образом, чтобы они образовывали канал прямоугольного сечения, патрубков подвода (поз. 11, 12, 13, 14), отвода питательной воды к исследуемому участку (поз. 15);
- штуцеров вывода термопреобразователей, крепёжных деталей и т.д.

Общая длина модели составляет 1250 мм, диаметр модели – 700 мм. Длина исследуемой части теплообменной поверхности составляет 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.

Исследуемый канал в цилиндрическом корпусе теплообменника образуется боковыми прямоугольными плоскими стенками разделяющими внутренний объем корпуса на три части: две боковые полости и центральный канал прямоугольного сечения для размещения исследуемой коллекторной сборки.

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. Таким образом, реализуются следующие варианты подвода:

- 1) верхний подвод;
- 2) правый боковой подвод, расположенный на уровне заделки труб в коллектор;
- 3) левый боковой подвод, расположенный на уровне верхнего коллектора;
- 4) торцевой подвод, имитирующий переливные окна.

Для исследования полей температур в теплообменном аппарате, в модели использовались 63 хромель-копелевых микротермопреобразователя, с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки  $0.2^{\circ}\text{C}$ ). Для уменьшения показателя тепловой инерции термопреобразователей хромель-копелевый спай выполнен на поверхности нержавеющей капилляра, а 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.):

1.  $t_{1,3,\dots,47}$  – металлизированные датчики на поверхности теплообменных труб, расположенные в сечении, отстоящем от верхнего коллектора на 20 мм (в четырех диаметрально противоположных точках окружности);

2.  $t_{2,4,\dots,48}$  – датчики, установленные в потоке теплоносителя над металлизированными термопарами, расположенными на поверхности теплообменных труб (в четырех диаметрально противоположных точках окружности);

3.  $tt_{1,2,3}$  – вынесенные потоковые термопары, установленные над поверхностью теплообменных труб в сечении, расположенном ниже металлизированных.

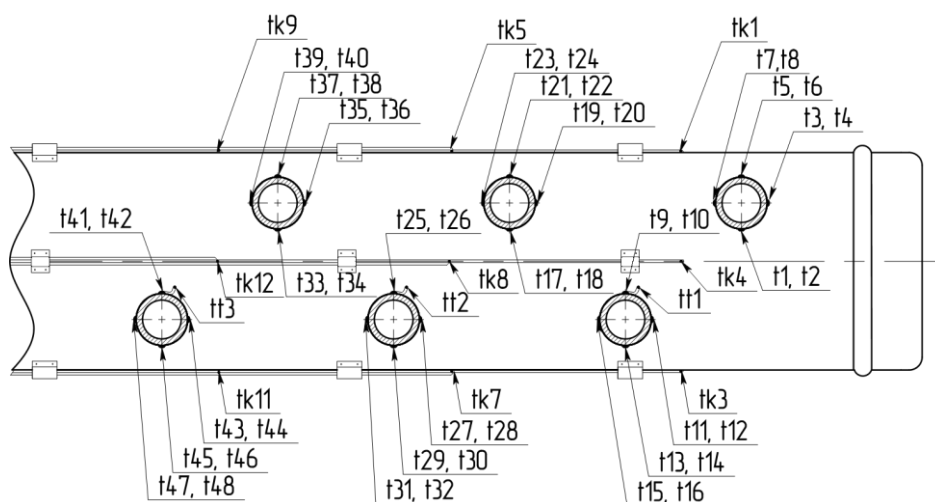


Рис. 2. Схема расположения термопреобразователей в модели

Определение наиболее термически напряженных зон верхнего коллектора осуществлялось при помощи металлизированных термопреобразователей  $tk_{1,2,\dots,12}$ , 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:

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

Для достижения поставленных целей на первом этапе данной работы была реализована следующая схема движения теплоносителя: по верхнему варианту подвода теплоноситель попадал в исследуемый канал, омывал коллекторную сборку и, затем, минуя решётку-сопротивление, отводился через патрубок, расположенный в нижней части корпуса модели. На втором этапе исследований для обеспечения выравнивания полей скорости на входе в исследуемый канал был установлен рассекатель и проведены повторные испытания.

На обоих этапах исследования проводились в диапазоне температур 200 – 250 °С, диапазоне расходов 300 – 1100 кг/ч и давлений теплоносителя 9-12 МПа.

### Результаты экспериментального исследования

В результате проведенного анализа температурного состояния исследуемой области выявлены следующие особенности:

- величина теплоперепада между входом и выходом теплоносителя выше для режимов без рассекателя. Максимальное значения расхождения составило 7°С на минимальном расходе греющего теплоносителя 300 кг/ч.

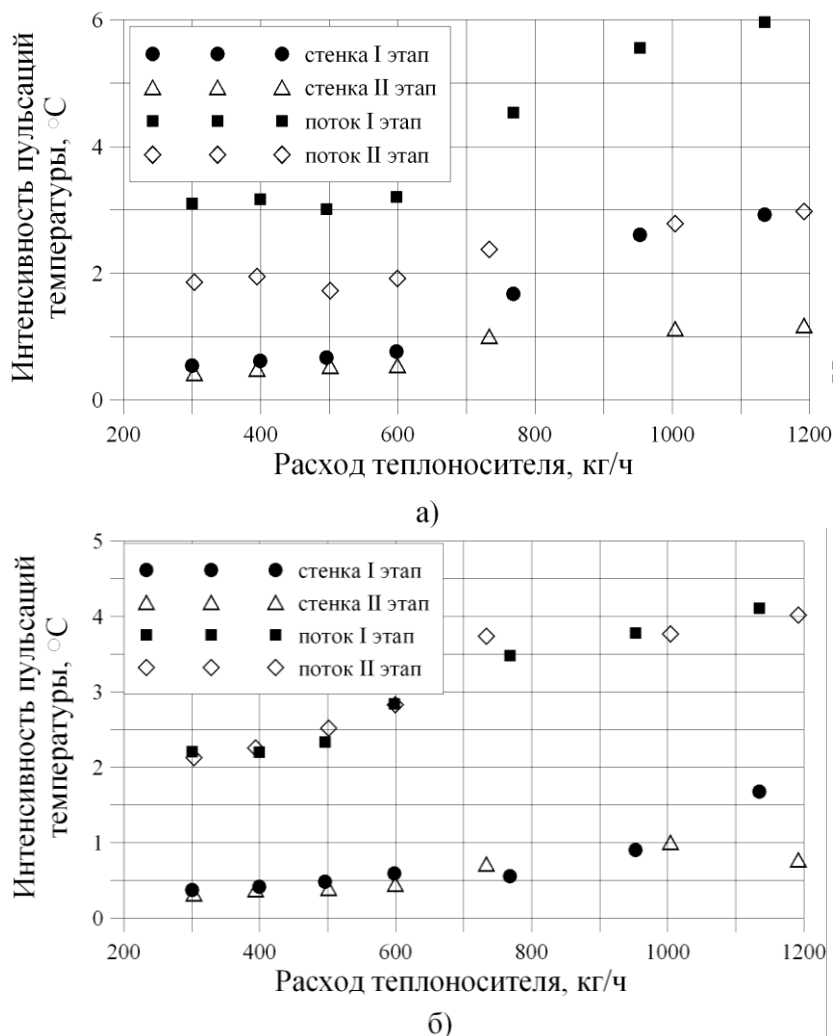
Сравнительный анализ распределений температур вблизи и на поверхности теплообменных труб для режимов до и после установки рассекателя позволил сделать следующие выводы:

- при малых расходах теплоносителя (от 300 до 500 кг/ч) наличие рассекателя практически не влияет на характер течения теплоносителя, что проявляется в совпадении показаний большинства термопреобразователей (разность показаний для режима с рассекателем и без рассекателя менее 1°С);
- по мере увеличения расхода теплоносителя от 600 до 1200 кг/ч температурное состояние коллекторного узла для режимов с рассекателем и без рассекателя начинает существенно различаться. Разность между показаниями потоковых, а также металлизированных термопар, установленных на теплообменной поверхности, для этих режимов в основном лежит в диапазонах от 2,5°С и выше. Вероятно, подобный эффект в отсутствие выравнивания полей скорости обусловлен появлением направленных течений отличных от режимов с использованием рассекателя;
- уровень температур, регистрируемых потоковыми термопарами в среднем несколько выше (на 3-5°С) в режимах с рассекателем.

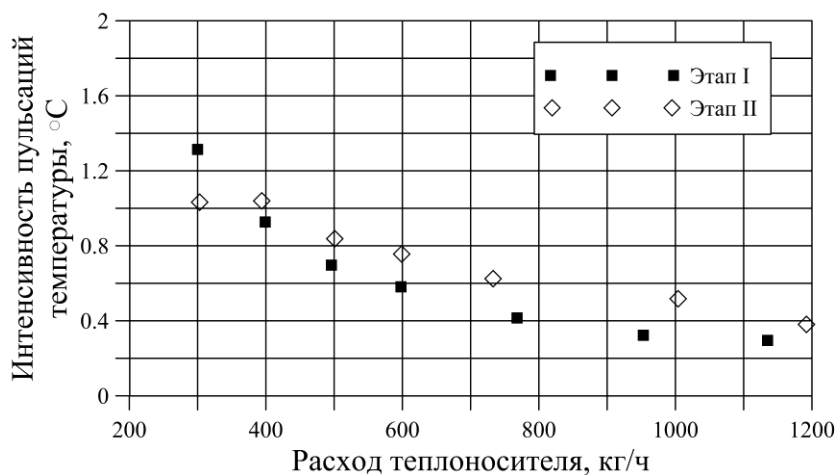
Анализ интенсивности пульсаций температуры позволяет сделать следующие выводы:

- при увеличении расхода теплоносителя первого контура интенсивность пульсаций температур, регистрируемых большинством потоковых и стеночных термопар, установленных вблизи теплообменных труб, возрастает (рис. 3). В то же время интенсивность пульсаций температур, регистрируемая термопарами, расположенными во фронтальной относительно набегающего потока части верхнего коллектора (рис. 4), снижается с увеличением расхода, что наиболее ярко выражено для режимов без рассекателя;
- уровень интенсивностей пульсаций, регистрируемых как стеночными, так и потоко-

выми термopарам, для режимов без рассекателя превосходит аналогичный уровень в режимах с рассекателем в среднем в 1,5 раза. С увеличением расхода эта тенденция становится ярко выраженной.



**Рис. 3. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры потока и поверхности теплообменных труб от расхода теплоносителя в различных зонах исследуемого канала: а - центральная зона; б - периферийная зона**



**Рис. 4. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры фронтальной части верхнего коллектора от расхода теплоносителя**

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.

Энергетический спектр пульсаций температуры стенки практически на всех реализациях имеет пики в области частот  $0,08 \div 0,2$  Гц (рис. 5). Основная энергия спектра сгруппирована в полосе частот от 0 до 0,45 Гц. Установлено, что энергия колебаний температуры зависит от расхода теплоносителя I контура. При этом наблюдаются неравномерность распределения энергии колебаний по периметру теплообменных трубок, что свидетельствует о сложном характере движения теплоносителя. С увеличением расхода теплоносителя количество термопар, регистрирующих пульсации температур, спектры которых имеют пики, уменьшается, что наиболее ярко выражено для режимов с рассекателем.

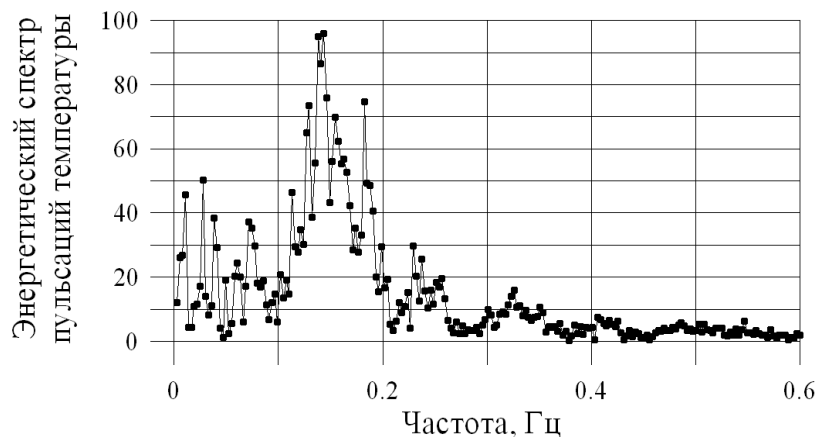


Рис. 5. Энергетический спектр пульсаций температуры стенки теплообменной трубки

В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

- определяющим фактором наличия пульсаций как для режимов с рассекателем, так и без него является наличие градиента температур, в результате которого возникают вторичные направленные течения, попеременно омывающие теплообменную поверхность то горячим, то холодным теплоносителем;
- установка рассекателя изменяет характер обтекания коллекторного узла, благодаря чему снижается интенсивность пульсаций температур;
- определяющими для стенок теплообменных труб коллекторного узла являются пульсации температур с частотой от 0,08 до 0,2 Гц.
- увеличение расхода теплоносителя сопровождается исчезновением пиков энергии пульсаций температур теплообменной поверхности, благодаря турбулизации потока в пристеночной области.

Таким образом, с точки зрения снижения пульсаций температур поверхности теплообмена рассматриваемой модели коллекторного узла, эффективно применение рассекателя в диапазоне расходов свыше 600 кг/ч.

Полученные таблицы экспериментальных данных необходимы для верификации теплогидравлических расчетных кодов, используемых для обоснования ресурса и надежности теплообменного оборудования ЯЭУ.

#### Библиографический список

1. **Судаков, А.В.** Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А. В. Судаков, А. С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.

2. **Рязанов, Р.Р.** Экспериментальное исследование нестационарного температурного состояния модели коллекторного узла теплообменного оборудования ЯЭУ/ Р.Р. Рязанов [и др.] // XVIII Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: сб. ст. – Н. Новгород, 2013.

*Дата поступления  
в редакцию 29.11.2013*

**S.M. Dmitriev, R.R. Ryazanov, A.E. Sobornov, A.V. Kotin**

**STUDY OF THE NON-STATIONARY TEMPERATURE  
FIELD AND THERMOPULSATION'S CHARACTERISTICS OF COLLECTOR  
UNIT AS PART OF THE NUCLEAR POWER STATION'S HEAT EXCHANGER**

The Nizhniy Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

**Purpose:** Studying of temperature field of collector unit of the heat exchanger.

**Design/methodology/approach:** Researches were conducted on heat exchanger model which represents a collector unit assembly placed in the strong body. The surface of heat exchange consists of two collectors connected by six tubes. Measurement of temperature is carried out by 63 microthermocouples. The range of experimental parameters is correspond to range of parameters of working heat exchanger at nuclear power station.

**Findings:** The results were written in experimental data tables. Experimental dependences of temperature field about coolants mass flow rate are received. The features of a coolant flow motion in considered model are revealed. Range of frequency which includes the thermopulsation's main energy of is determined.

**Originality/value:** The thermopulsation's characteristics are using for verification of CFD codes.

*Key words:* heat transfer, coolant, collector unit, temperature's pulsation, temperature field.