

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ СМЕШЕНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ОБОРУДОВАНИЯ ЯРУ

**С.М. Дмитриев, А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин,  
Д.Е. Бесчеров\*, М.А. Большухин\***

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

*\* АО «ОКБМ Африкантов»*

*603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15*



Обеспечение ресурса и эксплуатационной надежности оборудования реакторных установок при случайных пульсациях температуры является важной научно-технической задачей атомной энергетики. Температурные пульсации высокой интенсивности проявляются в условиях смешения неизотермических потоков теплоносителя. Термопульсации теплоносителя вызывают соответствующие, иногда весьма значительные колебания температурных напряжений металла теплообменной поверхности, которые, добавляясь к статическим нагрузкам, могут привести к усталостному разрушению элементов оборудования.

Целью работы являлось экспериментальное исследование температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических термопульсаций, обусловленных смешением потоков однофазного теплоносителя.

Для решения поставленных задач спроектирован и изготовлен экспериментальный участок, позволяющий реализовывать процесс неизотермического смешения потоков теплоносителя, сопровождающийся значительными температурами пульсациями. Конструкция экспериментального участка позволяет проводить исследования теплогидравлических и ресурсных характеристик трубных образцов 60×5 мм, изготовленных из сталей аустенитного класса. Разработаны средства измерения напряженно-деформированного состояния трубного образца и температурного поля потока теплоносителя в зоне смешения однофазных сред с различной температурой. Измерительные модели оснащены микротермопарами и тензорезисторами. В результате исследований получены экспериментальные реализации пульсаций температуры, осредненные во времени профили температуры потока в зоне смешения, статистические и спектрально-корреляционные характеристики термопульсаций. По результатам измерения относительных деформаций получены расчётные значения усталостных напряжений в зоне смешения.

Разработаны устройства и методики измерения температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций. Разработан экспериментальный участок, обеспечивающий термосиловое нагружение поверх-

ности металла при высоком уровне амплитуд переменных напряжений, обуславливающих быстрые темпы накопления повреждений. Полученные результаты входят в базу данных для верификации метода оценки усталостной долговечности конструкционных материалов ядерных энергетических установок применительно к аустенитной стали 12Х18Н10Т при воздействии случайных термоциклических нагрузок.

**Ключевые слова:** ресурс, термопульсации, теплоноситель, температурное поле, термоусталость, напряженно-деформированное состояние.

## ВВЕДЕНИЕ

Оборудование стационарных и судовых ядерных реакторных установок (ЯРУ), работающее в условиях термосиловых воздействий, подвержено развитию различных механизмов деградации прочностных свойств конструкционных материалов и раннему исчерпанию ресурса [1 – 3]. Опасность представляют переменные напряжения термосилового происхождения, обусловленные пульсациями температуры. Пульсации температуры представляют собой стационарный случайный процесс, при котором исчерпание ресурса оборудования происходит по механизму многоциклового термоусталости [4, 5]. Высоким уровнем температурных пульсаций характеризуются процессы смешения неизотермических потоков теплоносителя, широко распространенные в оборудовании ЯРУ. Актуальна проблема температурных пульсаций в отношении транспортных ЯРУ, отличающихся высокой теплонапряженностью вследствие значительного уменьшения массогабаритных характеристик [6].

Существующие нормативные методики оценки ресурсных характеристик оборудования ЯРУ не учитывают реальные закономерности его термосилового нагружения и не обеспечивают достаточную точность расчетов накопления повреждений, что характеризует данный подход как излишне консервативный [7, 8]. Ресурсные испытания натурных конструкций в штатных условиях не пригодны ввиду чрезвычайной сложности, высокой стоимости и продолжительности. В связи с этим актуальным является расчетно-экспериментальный подход к оценке долговечности (ресурса) оборудования ЯРУ при случайных термоциклических нагрузках, включающий в себя использование программ моделирования теплогидравлических процессов (computational fluid dynamics, CFD) [9 – 12] и напряженно-деформированного состояния, а также математических моделей процесса накопления усталостных повреждений в материале конструкции.

Наиболее быстро процесс накопления повреждений в материале происходит при высоких значениях амплитуды и количества циклов нагружения [13 – 15]. Однако в отечественной и зарубежной печати отсутствуют исчерпывающие экспериментальные данные, посвященные исследованию процессов смешения однофазного теплоносителя при температурных напорах более 100°С [16 – 19]. В связи с этим важной задачей являлась разработка экспериментального участка, позволяющего реализовывать процесс смешения потоков теплоносителя, сопровождающийся значительными температурами пульсациями.

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывается методика оценки влияния случайных термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики материалов транспортной ЯРУ «РИТМ-200», содержащая технологии численного моделирования с применением суперЭВМ. В рамках данной работы научным коллективом исследовательской лаборатории «Парогенерирующие системы» (НИЛ «ПГС») кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева проводятся ресурсные испытания экспериментальных моделей, подготовительным этапом которых служили исследования

температурного поля и напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне термодинамического нагружения.

В статье приводятся результаты подготовительного этапа испытаний, посвященного получению характеристик температурных пульсаций в зоне смешения теплоносителей, а также НДС материала экспериментального образца.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Экспериментальные исследования проведены на модернизированном теплофизическом стенде ФТ-80 [20], технические характеристики которого обеспечивают условия эксплуатации, соответствующие современным ЯРУ. Экспериментальный стенд включает в себя следующие основные элементы:

- контур теплоносителя;
- контур охлаждения основного оборудования контура теплоносителя;
- система подпитки контура теплоносителя;
- система электроснабжения;
- система измерительная.

Оборудование и трубопроводы стенда выполнены из аустенитной стали марки 12Х18Н10Т. В качестве теплоносителя использовалась вода высокой степени чистоты. Контур теплоносителя стенда имеет пять параллельных каналов для установки экспериментальных моделей.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УЧАСТКА

Экспериментальный участок (рис. 1) представляет собой тройниковый узел, состоящий из основной  $60 \times 5 \times 286$  мм и периферийной  $9 \times 1,5$  мм труб и разъемных соединений. Материал труб – сталь марки 12Х18Н10Т, используемая в реакторостроении. В направляющем фланце выполнен диффузор. Угол наклона периферийной трубы по отношению к основной составляет  $18^\circ$ . Расстояние от среза периферийной трубы до внутренней стенки основной – 7 мм. Основная труба – экспериментальная модель (образец), подверженная температурному нагружению. Организация локального нагружения внутренней стенки образца осуществляется путем подачи в поток горячего теплоносителя холодного потока теплоносителя из периферийной трубы.

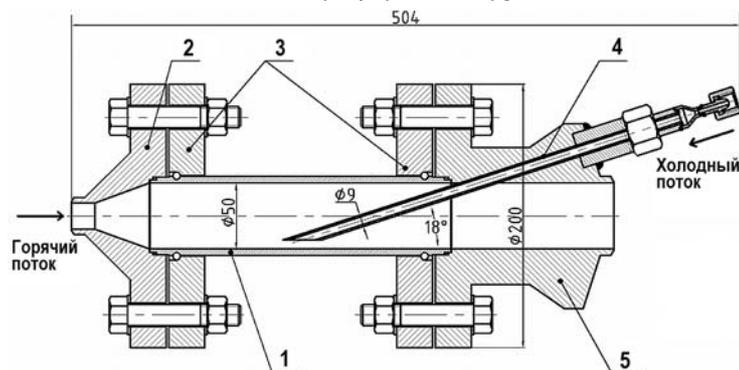


Рис. 1. Экспериментальный участок: 1 – экспериментальная модель; 2 – направляющий фланец; 3 – накидные фланцы; 4 – периферийная труба; 5 – фланец

Конструктивное исполнение экспериментального участка за счет разъемных соединений обеспечивает установку экспериментальных либо измерительных моделей. В работе использовались следующие измерительные модели:

- температурного поля (МИТП);
- напряженно-деформированного состояния (МИНДС).

Материал и габаритные характеристики МИТП, МИНДС и образцов идентичны. МИТП оснащена комплектом из восьми микротермопреобразователей ( $t_1 - t_8$ ), изготовленных из кабеля КТМС в нержавеющей капилляре с индивидуальной градуировочной характеристикой (рис. 2). Погрешность градуировки  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Для уменьшения показателя тепловой инерции термопреобразователей спай выполнен на поверхности нержавеющей капилляра, а чувствительная часть датчика прокатана до диаметра не более 0,5 мм [21]. Термопары установлены в центральной части трубы вдоль нижней образующей внутренней поверхности на расстоянии 10 мм друг от друга. Датчики ориентированы перпендикулярно основному потоку и отстоят от внутренней поверхности стенки на 1 мм. Термопара  $t_3$  расположена под передней относительно направления движения основного потока кромкой периферийной трубы. МИНДС оснащена одиннадцатью тензорезисторами и тремя термопарами, установленными на наружной поверхности модели. Погрешность измерения относительной деформации  $\pm 44 \cdot 10^{-6}$ . Зона расположения датчиков измерительных моделей выбрана из условий полного охвата предполагаемой локализации зоны смешения теплоносителей.

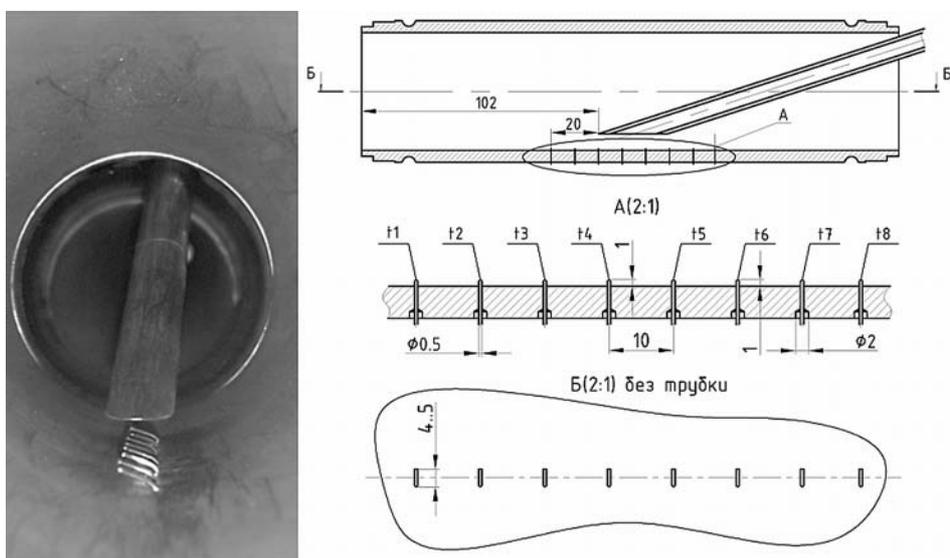


Рис. 2. Расположение термопар на МИТП

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Для достоверной оценки долговечности объектов, подверженных термосиловым воздействиям, необходимо исследовать сложные процессы накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах оборудования в условиях нагружения, максимально приближенных к натурным:

- давление в контуре теплоносителя 10 МПа;
- диапазон температуры горячего потока теплоносителя ( $T_r$ )  $283^\circ\text{C} - 287^\circ\text{C}$ ;
- диапазон температуры холодного потока теплоносителя ( $T_x$ )  $35^\circ\text{C} - 62^\circ\text{C}$ ;
- диапазон чисел Рейнольдса ( $Re_r$ ) для горячего потока теплоносителя  $3,7 \cdot 10^4 - 5,4 \cdot 10^4$ ;
- диапазон чисел Рейнольдса ( $Re_x$ ) для холодного потока теплоносителя  $1 \cdot 10^3 - 1,8 \cdot 10^3$ .

Расходы потоков теплоносителя были приняты на основании равенства осевых составляющих скорости с целью создания квазиустойчивой вихревой структуры в области смешения. Выбор  $T_x$  проводился исходя из условия максимально возможных гради-

ентов температур теплоносителей, характерных для теплонапряженного оборудования ЯРУ. Возникающие при этом пульсации температуры высокой интенсивности позволили получить переменные напряжения в материале модели, обеспечивающие быстрые темпы накопления повреждений.

Регистрация и запись реализаций пульсаций температуры теплоносителя в МИТП осуществлялись в установившемся режиме работы стенда. Измерение режимных параметров проводилось с помощью преобразователей температуры, давления, дифференциального давления и температуры, расхода, установленных на подводных участках экспериментальных моделей. Технические характеристики датчиков контрольно-измерительного комплекса (КИП) стенда представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Технические характеристики датчиков КИП-стенда**

Параметр	Датчик	Диапазон измерений	Погрешность измерения
Температура теплоносителя, °С	Термопреобразователь КТХА 02.01-064-К1-И-С321-1-500/2000	-40 – 700	±1
Расход холодного потока теплоносителя, кг/ч	Преобразователь расхода ТПР 1-1-1	10 – 36	0,5
Давление теплоносителя, МПа	Датчик давления S-10	0 – 20	0,05
Расход горячего потока теплоносителя, кг/ч	Преобразователь перепада давления Yokogawa EJX110A	300 – 800	15

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По экспериментальным реализациям температуры (рис. 3) были определены статистические (рис. 4, 5) и спектрально-корреляционные (рис. 6) характеристики температурного поля в зоне смешения потоков. На рисунках 4, 5 по оси абсцисс отмечены координаты расположения термопреобразователей МИТП. В качестве условного нуля принята точка, отстоящая на 10 мм от места установки  $t_1$ .

Максимальная интенсивность пульсаций температуры (среднеквадратическое отклонение)  $\sigma_t$  [2] зарегистрирована термопреобразователем  $t_4$ . Наибольший размах термопульсаций составил 120°С. Характерный спектр пульсаций температуры в зоне, расположенной под срезом периферийной трубы, имеет пик в диапазоне частот 0,4 – 0,5 Гц.

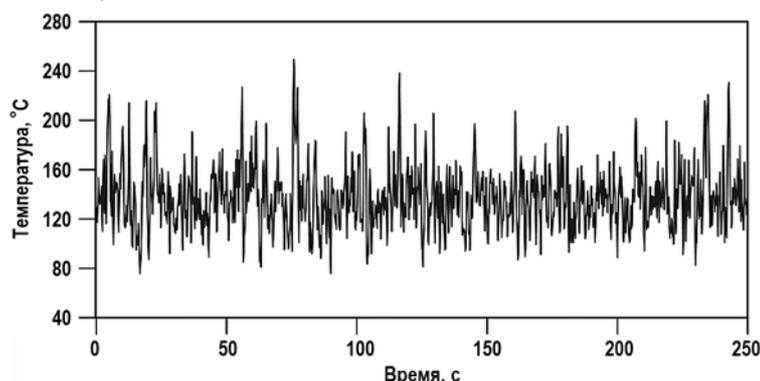


Рис. 3. Экспериментальная реализация зависимости температуры от времени в зоне смешения потоков

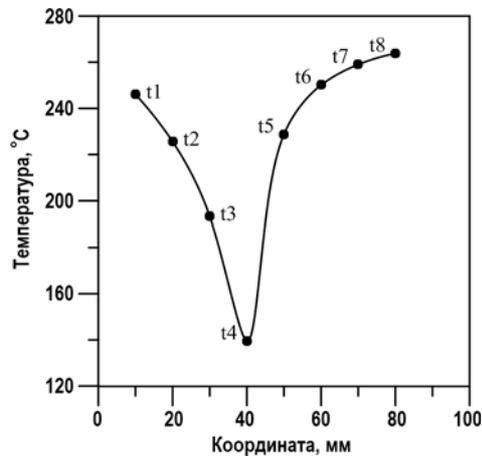


Рис. 4. Усредненный профиль температуры в зоне смешения потоков теплоносителя

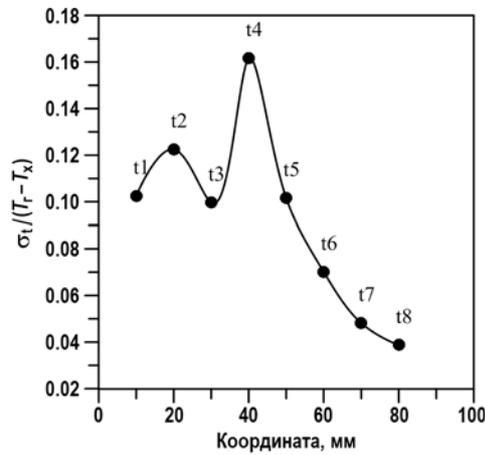


Рис. 5. Относительная интенсивность пульсаций температуры

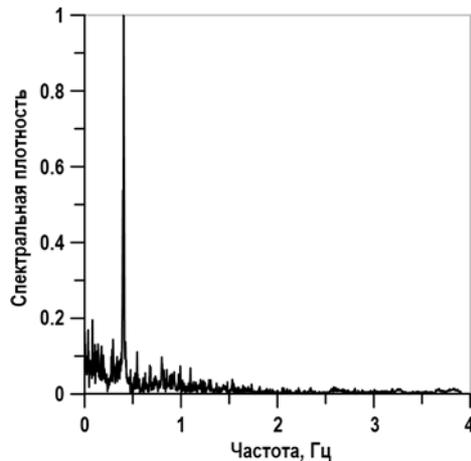


Рис. 6. Нормированная спектральная плотность пульсаций температуры

По результатам, полученным на МИНДС, было рассчитано напряженно-деформированное состояние образца. Максимальное значение напряжения в области нагружения составило 152 МПа.

Представленные в работе результаты исследования получены при  $T_r = 285^\circ\text{C}$ ,

$Re_T = 5,15 \cdot 10^4$ ,  $T_x = 35^\circ\text{C}$ ,  $Re_x = 1,08 \cdot 10^3$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для проведения исследования кинетики накопления усталостных повреждений в материале экспериментальных моделей в результате нагружения температурными пульсациями, обусловленными смешением неизотермических потоков теплоносителя. Смоделировано нагружение экспериментальных моделей температурными пульсациями при параметрах теплоносителей, аналогичных штатным параметрам кассеты парогенератора ЯРУ. В результате экспериментальных работ

- получены экспериментальные данные по температурному полю в зоне смешения;
- определено напряженно-деформированное состояние экспериментального образца.

Полученные результаты входят в базу данных для верификации метода оценки усталостной долговечности материалов ЯРУ применительно к аустенитной стали 12X18H10T при воздействии случайных термоциклических нагрузок.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00473).

### Литература

1. *Abib E., Bergholz S., Rudolph J.* German experiences in local fatigue monitoring. // International Journal for Nuclear Power. – 2013. – Vol. 58. – PP. 284-289.
2. *Chapuliot S., Gourdin C., Payen T., Magnaud J.P., Monavon A.* Hydro-thermal- mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee. // Nuclear Engineering and Design. – 2005. – Vol. 235. – PP. 575-596.
3. *Faigy C.* High Cycle Thermal Fatigue: Lessons Learned From Civaux Event. / In: Materials Reliability Program: Second International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-84), July 29-August 1, 2002, Snowbird, Utah. – 2002.
4. *Судаков А.В.* Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования. / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 176 с.
5. *Судаков А.В.* Напряжения при пульсациях температур. / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – М.: Атомиздат, 1980. – 64 с.
6. *Будов В.М.* Форсированные теплообменники ЯЭУ. / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174 с.
7. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов для судовых атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами (НП-054-04). – М.: Ростехнадзор России, 2004. – 57 с.
8. *Jhung M.J.* Assessment of thermal fatigue in mixing tee by FSI analysis. // Nuclear Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 45. – PP. 99-106.
9. *Mahaffy J., Chung B., Dubois F., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Komen E., Moretti F., Morii T., Mьhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Smith B. L., Song C., Watanabe T., Zigh G.* Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications. / NEA/CSNI/R(2007)5. – 2007.
10. *Smith B. L.* Assessment of CFD codes used in nuclear reactor safety simulations. // Nuclear Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 42. – PP. 339-364.
11. *Smith B. L., Andreani M., Bieder U., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Hьhne T., Houkema M., Komen E., Mahaffy J., Menter F., Moretti F., Morii T., Mьhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Song C.H., Watanabe T., Zigh G.* Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems – revision 2 / OECD/NEA/CSNI/R(2014) 12. – 2015.
12. *Smith B. L., Bestion D., Hassan Y.* Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS). // Special Issue: Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240. – PP. 2075-2382.
13. *Wakamatsu M., Nei H., Hashiguchi K.* Attenuation of temperature fluctuations in thermal

- striping. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1995. – Vol. 32. – PP. 752-762.
14. *Beaufils R., Courtin.* Analysis of the Father Experiment with an Engineering Method Devoted to High Cycle Thermal Fatigue. / In: Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2011), July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA. – 2011.
15. *Courtin S.* High Cycle Thermal Fatigue Damage Prediction in Mixing Zones of Nuclear Power Plants: Engineering Issues Illustrated on the FATHER Case. // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 66. – PP. 240-249.
16. *Miyoshi K., Kamaya M., Utanohara Y., Nakamura A.* An investigation of thermal stress characteristics by wall temperature measurements at a mixing tee. // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 298. – PP. 109 – 120.
17. *Braillard O., Edelin D.* Advanced experimental tools designed for the assessment of the thermal load applied to the mixing tee and nozzle geometries in the PWR plant. / In: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2009, June 7-10, 2009, Marseille, France. – 2009.
18. *Chen M.S., Hsieh H.E., Ferng Y.M., Pei B.S.* Experimental observations of thermal mixing characteristics in T-junction piping. // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 276. – PP. 107-114.
19. *Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K.* Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – PP. 58-67.
20. *Дмитриев С.М., Спиридонов Д.В., Востриков А.А., Дмитриева Т.С.* Нестационарное температурное состояние и оценка долговечности теплообменной поверхности парогенерирующего элемента с двусторонним обогревом. // Труды РНКТ-4. – 2006. – Т. 4. – С. 88-91.
21. *Kuschewski M.* Development and application of flow measurement methods for the investigation of near-wall temperature fields. Doctoral dissertation, University of Stuttgart. – 2015. – No: D93.

Поступила в редакцию 15.06.2018 г.

#### Авторы

Дмитриев Сергей Михайлович, ректор, профессор, д-р техн. наук

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Мамаев Александр Викторович, аспирант

E-mail: aleks\_may@mail.ru

Рязяпов Ренат Рамильевич, старший преподаватель

E-mail: ryazapov.renat@gmail.com

Соборнов Алексей Евгеньевич, ассистент

E-mail: wisestjedi@mail.ru

Котин Андрей Валерьевич, инженер

E-mail: an.kotin@yandex.ru

Бесчеров Дмитрий Евгеньевич, инженер

E-mail: bescherov21@mail.ru

Большухин Mihail Aleksandrovich, начальник департамента

E-mail: bolshuhin@okbm.nnov.ru

UDC 621.039

## EXPERIMENTAL STUDIES OF TEMPERATURE PULSATIONS DURING THE PROCESS OF MIXING NON-ISOTHERMAL COOLANT FLOWS IN NUCLEAR REACTOR EQUIPMENT COMPONENTS

Dmitriev S.M., Mamaev A.V., Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Kotin A.V.,  
Bescherov D.E.\*, Bolshuhin D.E.\*

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
24 Minin st., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

\* Afrikantov OKB Mechanical Engineering, JSC «Afrikantov OKBM»  
15 Burnakovskiy proezd, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

### ABSTRACT

One of the most important scientific and technical tasks of the nuclear power industry is to ensure the reactor equipment life and reliability under random temperature pulsations. High-intensity temperature pulsations appear during the process of mixing non-isothermal coolant flows. Coolant thermal pulsations cause corresponding, sometimes very significant, fluctuations in the temperature stresses of the heat-exchange surface metal, which, added to static loads, can lead to fatigue failure of equipment components.

The purpose of this work was to conduct an experimental study of the temperature and stress-strain states of a pipe sample under the influence of local stochastic thermal pulsations caused by the mixing of single-phase heat coolant flows.

To solve the set problems, an experimental section was created, which made it possible to simulate the process of mixing non-isothermal coolant flows accompanied by significant temperature pulsations. The design of the experimental section allowed us to study the thermohydraulic and life characteristics of pipe samples made of austenitic steel (60Ч5 mm). Some tools, based on pipe sample, have been developed for measuring the pipe sample stress-strain state and the coolant flow temperature field in the zone of mixing single-phase media with different temperatures. The measuring tools are equipped with microthermocouples and strain gauges.

As a result of the research, we obtained experimental data on temperature pulsations, time-averaged temperature profiles of the coolant flow in the mixing zone, statistical and spectral-correlation characteristics of thermal pulsations. Based on the results of measuring the relative deformations, the values of fatigue stresses in the mixing zone were calculated.

In addition, some devices and methods were elaborated to measure the temperature and stress-strain states of a pipe sample under the influence of local stochastic thermal pulsations. The developed experimental section provided thermal-power loading of the metal surface at a high level of alternating stress amplitudes causing rapid rates of damage accumulation. The results are included in the database to verify the method for assessing the fatigue life of structural materials for nuclear power plants as applied to austenitic steel 12X18H10T under the influence of random thermal cyclic loads.

**Key words:** equipment life, temperature pulsations, coolant, temperature field, thermal fatigue, stress-strain state.

### REFERENCES

1. Abib E., Bergholz S., Rudolph J. German experiences in local fatigue monitoring. *International Journal for Nuclear Power*. 2013, v. 58, pp. 284-289.
2. Chapuliot S., Gourdin C., Payen T., Magnaud J.P., Monavon A. Hydro-thermal-

- mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee. *Nuclear Engineering and Design*. 2005, v. 235, pp. 575-596.
3. Faidy C. *High Cycle Thermal Fatigue: Lessons Learned From Civaux Event*. In: Materials Reliability Program: Second International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-84), July 29-August 1, 2002, Snowbird, Utah, 2002.
  4. Sudakov A.V., Trofimov A.S. *Pulsations of temperature and electrical equipment's component life*. Leningrad. Energoatomizdat, 1989, 179 p. (in Russian).
  5. Sudakov A.V., Trofimov A.S. *Voltages at temperature pulsations*. Moscow. Atomizdat Publ., 1980, 64 p. (in Russian).
  6. Budov V.M., Dmitriev S.M. *Forced heat exchangers of water cooled nuclear power unit*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 174 p. (in Russian).
  7. NP-054-04. *Norms for Calculating the Strength of Equipment Elements and Pipelines for Ship Nuclear Steam Generating Units with Water-Cooled Reactors*. Moscow. Rostekhnadzor Rossii Publ., 2004, 57 p. (in Russian).
  8. Jhung M.J. Assessment of thermal fatigue in mixing tee by FSI analysis. *Nuclear Engineering and Technology*. 2013, v. 45, pp. 99-06.
  9. Mahaffy J., Chung B., Dubois F., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Komen E., Moretti F., Morii T., Mьhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Smith B. L., Song C., Watanabe T., Zigh G. *Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications*. NEA/CSNI/R(2007)5, 2007.
  10. Smith, B. L. Assessment of CFD codes used in nuclear reactor safety simulations. *Nuclear Engineering and Technology*. 2010, v. 42, pp. 339-364.
  11. Smith B. L., Andreani M., Bieder U., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Hьhne T., Houkema M., Komen E., Mahaffy J., Menter F., Moretti F., Morii T., Mьhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Song C.H., Watanabe T., Zigh G. *Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems – revision 2*. OECD/NEA/CSNI/R(2014) 12, 2015.
  12. Smith B. L., Bestion D., Hassan Y. Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS). *Special Issue: Nuclear Engineering and Design*. 2010, v. 240, pp. 2075-2382.
  13. Wakamatsu M., Nei H., Hashiguchi K. Attenuation of temperature fluctuations in thermal striping. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1995, v. 32, pp. 752-762.
  14. Beaufils R., Courtin. *Analysis of the Father Experiment with an Engineering Method Devoted to High Cycle Thermal Fatigue*. In: Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2011), July 17-21, 2011. Baltimore, Maryland, USA, 2011.
  15. Courtin S. High Cycle Thermal Fatigue Damage Prediction in Mixing Zones of Nuclear Power Plants: Engineering Issues Illustrated on the FATHER Case. *Procedia Engineering*. 2013, v. 66, pp. 240-249.
  16. Miyoshi K., Kamaya M., Utanohara Y., Nakamura A. An investigation of thermal stress characteristics by wall temperature measurements at a mixing tee. *Nuclear Engineering and Design*. 2016, v. 298, pp. 109-120.
  17. Braillard O., Edelin D. *Advanced experimental tools designed for the assessment of the thermal load applied to the mixing tee and nozzle geometries in the PWR plant*. In: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2009, June 7-10, 2009. Marseille, France, 2009.
  18. Chen M.S., Hsieh H.E., Ferng Y.M., Pei B.S. Experimental observations of thermal mixing characteristics in T-junction piping. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, v. 276, pp. 107-114.
  19. Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, v. 239, pp. 58-67.
  20. Dmitriev S.M., Spiridonov D.V., Vostrikov A.A., Dmitrieva T.S. Nestacionarnoe temperaturnoe sostoyanie i ocenka dolgovechnosti teploobmennoj poverhnosti

parogeneriruyushchego ehlementa s dvustoronnim obogrevom. *Trudy RNKT-4*. 2006, v. 4, pp. 88-91 (in Russian).

21. Kuschewski M. *Development and application of flow measurement methods for the investigation of near-wall temperature fields*. Doctoral dissertation, University of Stuttgart. 2015, No: D93.

#### **Authors**

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

E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Mamaev Alexandr Viktorovich, PhD Student

E-mail: aleks\_may@mail.ru

Rayzapov Renat Ramil'yevich, Senior Lecturer

E-mail: ryazapov.renat@gmail.com

Sobornov Aleksey Evgen'yevich, Assistant

E-mail: wisestjedi@mail.ru

Kotin Andrey Valer'yevich, Engineer

E-mail: an.kotin@yandex.ru

Bescherov Dmitriy Evgen'yevich, Engineer

E-mail: bescherov21@mail.ru

Bolshuhin Mikhail Aleksandrovich, Head of Department

E-mail: bolshuhin@okbm.nnov.ru