

УДК 621.039.53

Д.Е. Бесчеров¹, М.А. Большухин¹, А.В. Козин¹, В.В. Лебедев¹, В.А. Панов¹,
В.А. Пахомов¹, Д.Н. Свешников¹, Д.Н. Шишулин¹, М.А. Легчанов², Р.Р. Рязанов²

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

В статье приводятся результаты верификации методики оценки влияния нестационарных термоциклических нагрузок на процессы накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем реакторных установок (РУ). С этой целью были проведены расчетно-экспериментальные исследования процессов накопления повреждений в тройниковом соединении при смешении неизотермических потоков теплоносителя, а также расчетно-экспериментальные исследования долговечности трубного образца, подверженного воздействию термопульсаций различной частоты. Результаты расчетного анализа процессов накопления повреждений в конструкционных материалах при термопульсациях сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: структурный элемент, циклическое нагружение, пульсации температуры, программные средства, методы конечных элементов, экспериментальное исследование, напряженно-деформированное состояние, накопление повреждений.

Введение

Термопульсации представляют собой сложный и малоисследованный вид нагружений, который широко распространен в теплообменных аппаратах. Практически отсутствуют математические модели, позволяющие адекватно исследовать процессы накопления повреждений и долговечность материалов при таком виде нагружения. Для изучения влияния термопульсаций на долговечность материалов были проведены экспериментальные и расчетные исследования процессов накопления усталостных повреждений в конструктивных элементах оборудования реакторных установок (РУ), подверженных термопульсациям.

С учетом постоянной тенденции к повышению ресурсных характеристик оборудования и систем ядерных реакторных установок (ЯРУ) с одновременным обеспечением его высокой надежности, в АО «ОКБМ Африкантов» разработана технология оценки влияния случайных термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики оборудования РУ. Данная технология основана на подходе, при котором численными методами с применением аттестованных программных средств решается так называемая «связанная» задача: «теплогидравлика – теплопроводность – НДС – поврежденность».

Решение «связанной» задачи численными методами предполагает совместное использование следующего комплекса программ:

- CFD-программы (Computational Fluid Dynamics) трехмерного теплогидравлического расчета ANSYS CFX [1];
- FEA-программы ANSYS Mechanical APDL [1] для расчета напряженно-деформированного состояния и процессов теплопроводности;
- программа «Ресурс-НН» [2-3] для исследования процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах при циклическом нагружении и оценки выработанного ресурса.

С точки зрения практической значимости и верификации существующих методов и программных средств оценки долговечности конструкций, наибольший интерес представляют экспериментальные методы исследования кинетики накопления усталостных повреждений при максимально возможных градиентах температур теплоносителей, соответствующих штатным параметрам РУ.

Экспериментальные исследования

Для решения данной задачи АО «ОКБМ Африкантов» совместно с НГТУ проведены экспериментальные исследования на стенде (рис. 1), специально сконструированном в научно-исследовательской лаборатории «Парогенерирующие системы» кафедры «Атомные и тепловые станции». В частности, на данном стенде был смоделирован процесс смешения неизотермических потоков теплоносителя вблизи внутренней поверхности стенки тройникового соединения, по основной трубе которого протекает горячая вода, а по периферийной впрыскивается холодная (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

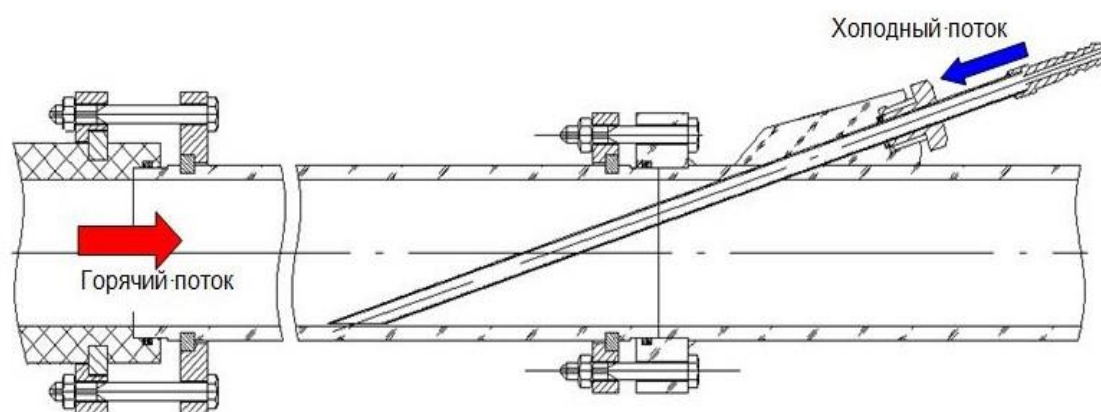


Рис. 2. Конструктивное исполнение модели

Экспериментальная модель тройникового соединения изготовлена из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса марки 12X18H10T.

Контроль кинетики накопления усталостных повреждений в материале экспериментальной модели тройникового соединения проводился спектрально-акустическим методом с применением сертифицированного измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «Астрон» [4]. Данный ИВК состоит из средств измерения и математического обеспечения, позволяющего по результатам спектрально-акустических измерений диагностического параметра проводить контроль поврежденности материала на стадии до образования усталостного макродефекта.

Результаты расчета НДС модели в упругой постановке

Для расчетных исследований НДС был выбран трубный участок тройникового соединения, в котором происходит смешение потоков горячей и холодной воды. С помощью точного генератора ПК ANSYS была сгенерирована сетка из 3D конечных элементов первого порядка точности SOLID185 (рис. 3). Размер КЭ был выбран равным 0,5 мм, что позволяет корректно описать процесс проникновения в металл температурных пульсаций с определяющими частотами. Конечно-элементная сетка имеет следующие параметры: 369 039 конечных элементов, 331 800 узлов.

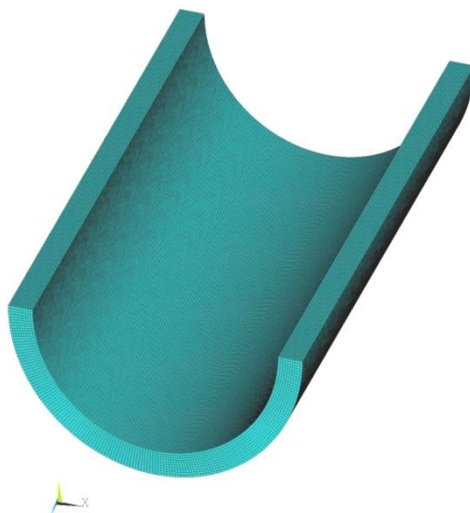


Рис. 3. Общий вид сетки конечных элементов

Расчет НДС трубного участка экспериментальной модели тройникового соединения проводился с использованием ПК ANSYS Mechanical APDL в линейно-упругой постановке с использованием линейно-изотропной модели материала.

Результаты проведенных CFD-расчетов исследуемой экспериментальной модели тройникового соединения послужили исходными данными для расчетов НДС. Данные по температурному состоянию в виде набора температур в каждом узле конечно-элементной модели формировались в CFD коде с шагом 0,05 с.

В результате расчетов температурного состояния и НДС были получены данные для продолжительности одного экспериментального режима нагружения, равной 80 с. На рис. 4 представлено распределение интенсивности напряжений (Па) в трубном участке экспериментальной модели тройникового соединения в нескольких расчетных временных состояниях.

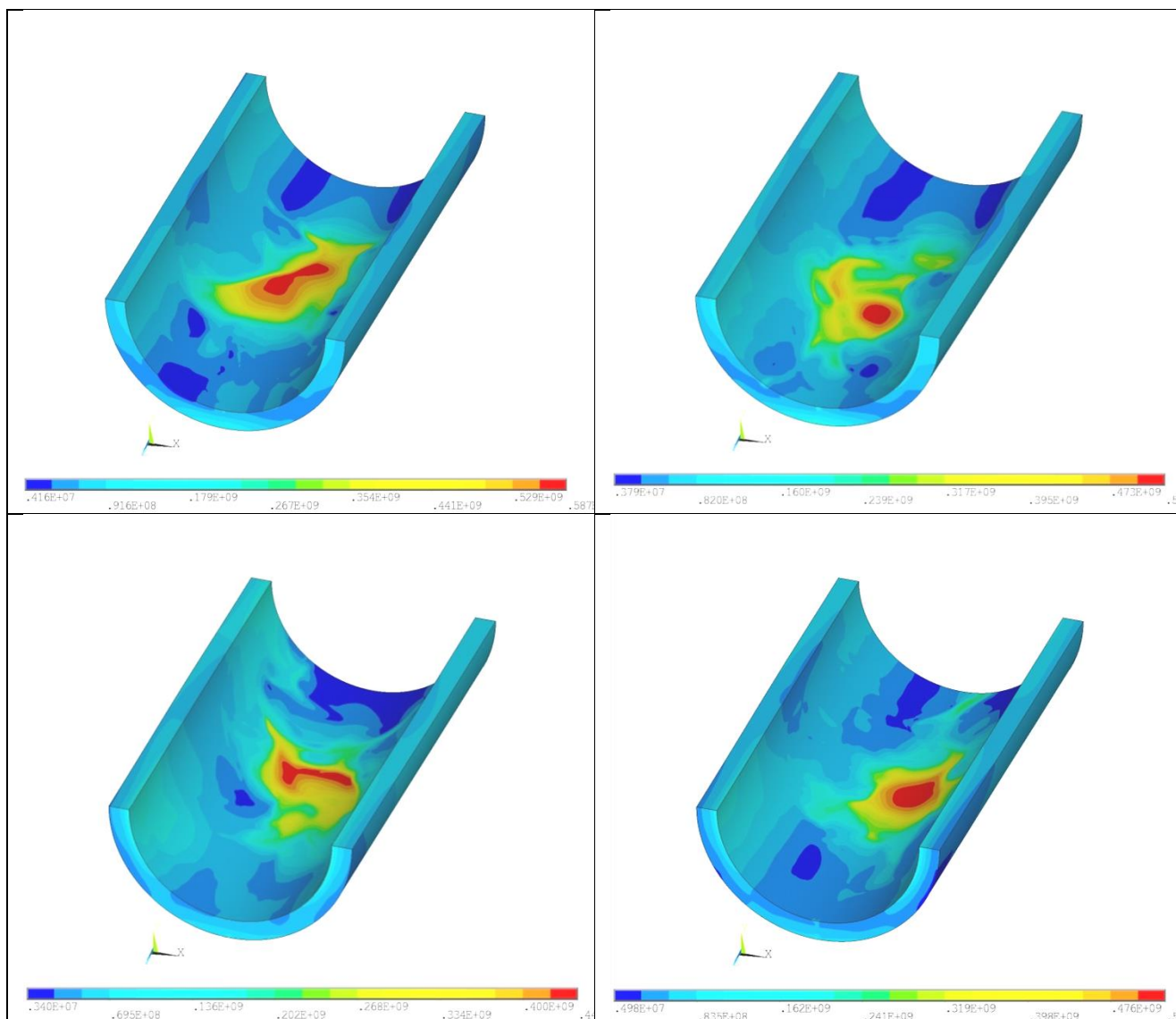


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в экспериментальной модели стенда в нескольких расчетных состояниях

Для верификации расчета НДС при температурных пульсациях был выполнен сравнительный анализ напряжений, полученных расчетным и экспериментальным методами (рис. 5). На рисунке видно, что напряжения, полученные расчетным и экспериментальным методами, хорошо коррелируются, а отличие в размахах, возможно, связано с инертностью тензорезисторов или с погрешностью, накладываемой измерительным комплексом.

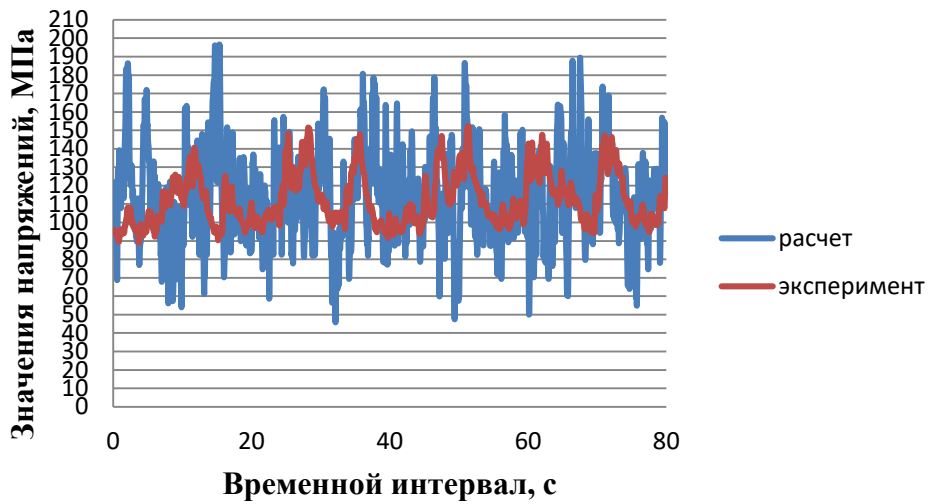


Рис. 5. История изменения окружных напряжений

На рис. 6 представлена история изменения приведенных напряжений в расчетной точке трубного участка модели (рис. 9) на интервале времени 80 с.

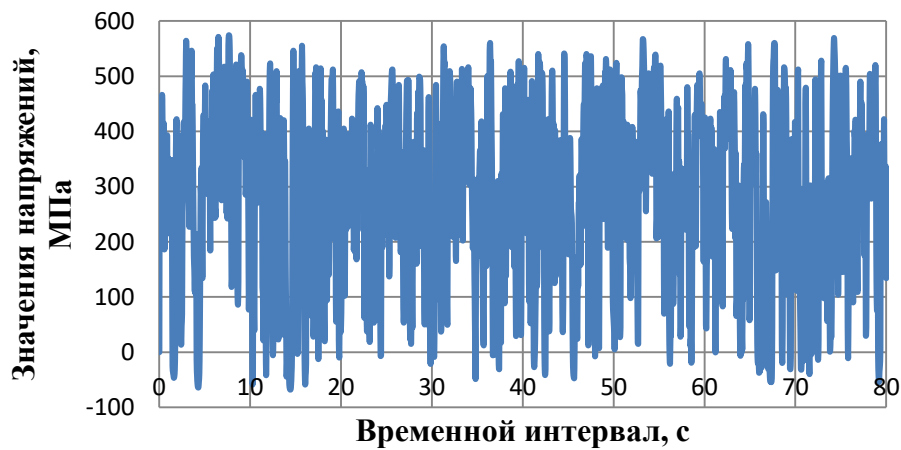


Рис. 6. История изменения приведенных напряжений в расчетной точке трубы

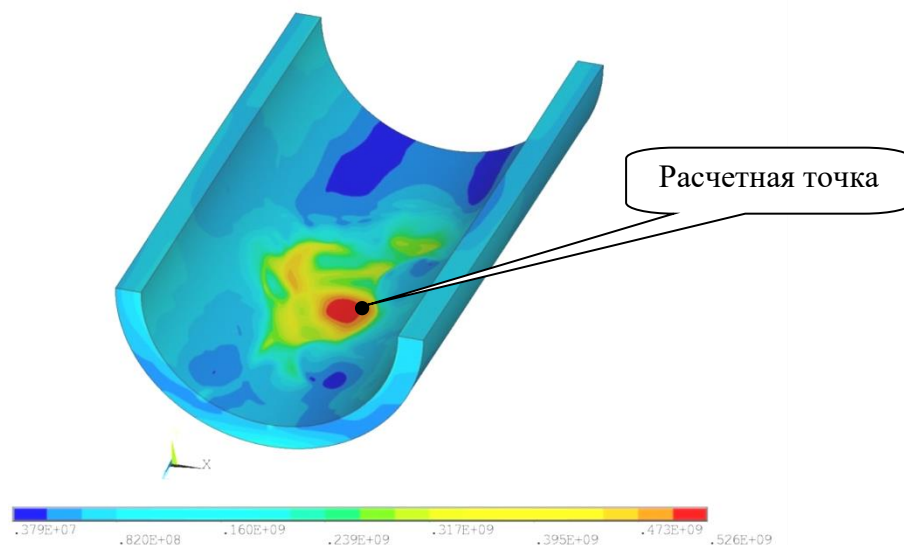


Рис. 7. Расположение расчетной точки на внутренней поверхности трубы

На рис. 7 видно, что напряжения, возникающие на внутренней поверхности трубного участка тройникового соединения в районе смешения потоков теплоносителей, находятся за пределами упругости. Поэтому для уточнения результатов дополнительно был выполнен расчет НДС модели в упругопластической постановке.

Результаты расчета НДС модели в упругопластической постановке

С этой целью для расчетов НДС в ПК ANSYS Mechanical APDL была выбрана модель термопластичности материала с кинематическим (модель Chaboche [5]) и изотропным упрочнением (модели BISO, MISO и NLISO).

В результате проведенных расчетов было получено распределение пластической деформации в экспериментальной модели для интервала времени 80 с. На рис. 8 представлено распределение пластической деформации в одном из расчетных состояний в расчетной точке трубного участка экспериментальной модели тройникового соединения.

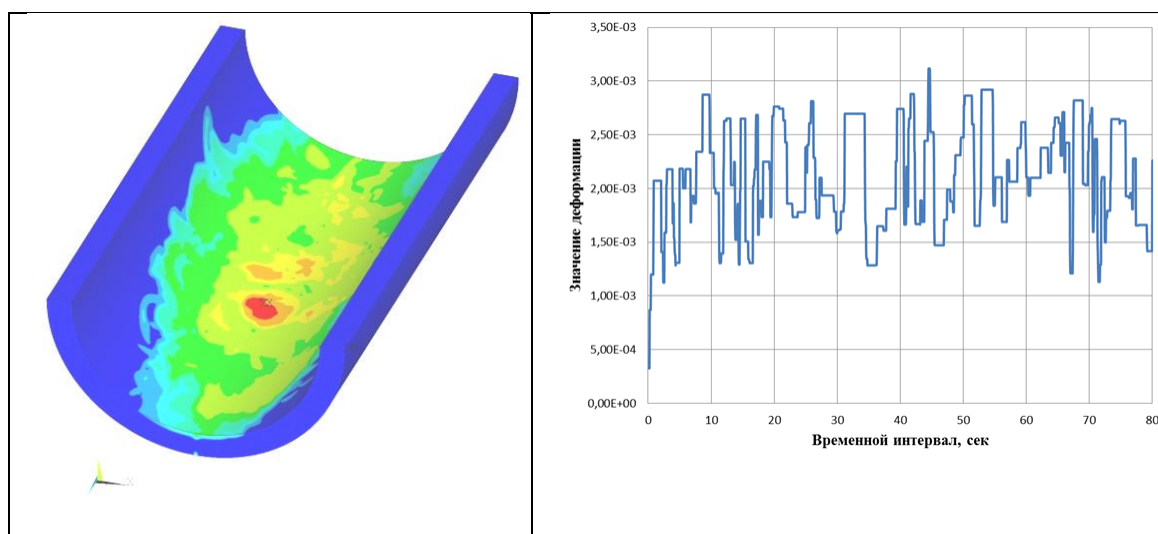


Рис. 8. Распределение и история изменения пластической деформации в расчетной точке

Результаты верификации расчетного и экспериментального метода оценки долговечности

Расчет усталостной долговечности в опасной зоне трубного участка тройникового соединения во времени вплоть до образования макротрещины проводился с использованием программы «Ресурс-НН» [2], позволяющей моделировать монотонное и циклическое упрочнение материала при термомеханических нагружениях; локальную анизотропию пластического деформирования; влияние вида напряженного состояния на темпы накопления повреждений, нелинейное суммирование повреждений. Результаты расчета поврежденности приведены на рис. 9.

На данном рисунке приведен расчетный график распределения поврежденности в поверхностном слое металла толщиной 1 мм после наработки, при которой в нулевом слое (на внутренней поверхности) достигается предельное значение, равное 1.

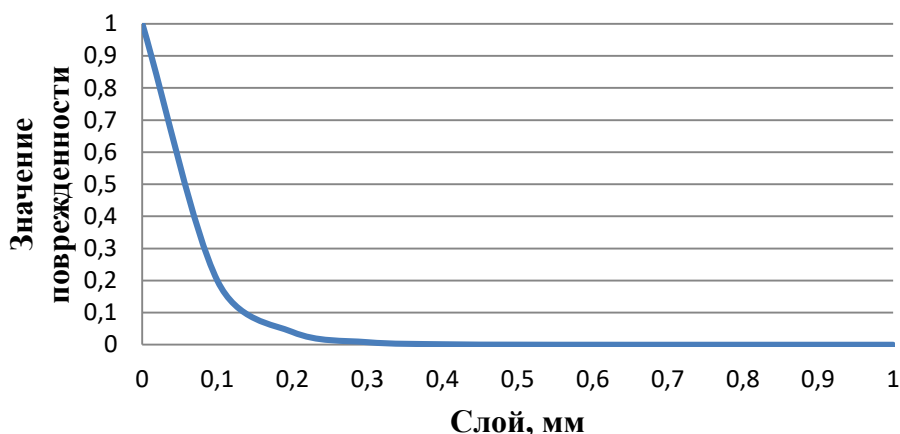


Рис. 9. Распределение расчетной поврежденности в поверхностном слое металла

Для определения среднеинтегральной величины поврежденности в поверхностном слое металла толщиной 1 мм было выполнено интегрирование полученного закона распределения поврежденности:

$$\omega = \int_0^1 e^{-16,12x} dx .$$

В результате вычислений расчетная среднеинтегральная величина поврежденности в поверхностном слое металла толщиной 1 мм, полученной по программе «Ресурс-НН», составила $\omega = 0,06$.

Ниже, с целью верификации результата, полученного расчетным путем, приведены результаты экспериментального определения поврежденности в опасной зоне тройникового соединения. Учитывая технические характеристики ИВК «Астрон», была рассчитана среднеинтегральная величина накопленной поврежденности в толщине слоя металла 1 мм. По результатам измерений ИВК «Астрон» при аналогичной наработке среднеинтегральная величина поврежденности в поверхностном слое опасной зоны модели толщиной 1 мм составила $\omega = 0,071$.

Сопоставление поврежденностей показывает хорошую корреляцию расчетных и экспериментальных данных при сопоставимых наработках.

Влияние термопульсаций различной частоты на циклическую долговечность трубного образца

С целью верификации методики оценки процессов накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем РУ были выполнены также расчетно-экспериментальные исследования термической усталости трубного образца, подверженного воздействию термопульсаций различной частоты. Пульсации температур моделировались путем падения капель дистиллята нормальной температуры на нагретую поверхность цилиндрического образца. Экспериментальные исследования термической усталости металлов проводились в ОАО «НПО ЦКТИ» на специальном стенде, на котором моделировалось падение капель дистиллята нормальной температуры 20°C с различной частотой на поверхность цилиндрического трубного образца из стали 12Х18Н10Т, нагретого до температуры 310°C . В процессе эксперимента в локальных зонах падения капель на нагретую поверхность трубы (диаметр 63 мм, толщина стенки 3 мм, рис. 10) с использованием ультразвукового, вихретокового и спектрально-акустического методов контролировались параметры процесса накопления усталостных повреждений и роста зародившихся трещин. Экспериментально установлено, что согласно сигналам УЗК при частоте 1 Гц образование термоусталостных трещин фиксировалось после $N \approx 1 \cdot 10^6$ циклов падения капель (кривая 1, рис. 11),

согласно вихретокового метода – в диапазоне $N \approx 2 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^6$ циклов (кривая 2, рис. 11). Ультразвуковой и вихретоковой методы неразрушающего обнаружения растущих трещин в зоне падения капель по площади их отражательной способности фиксировали начало зарождения трещин и их уверенную фиксацию в диапазоне $1 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^6$ циклов падения капель (рис. 11). После наработки $9,3 \cdot 10^6$ термоциклов были изготовлены шлифы и проведены их металлографические исследования, в результате которых были выявлены идущие с поверхности образца трещины размерами $85 \div 1873$ мкм.

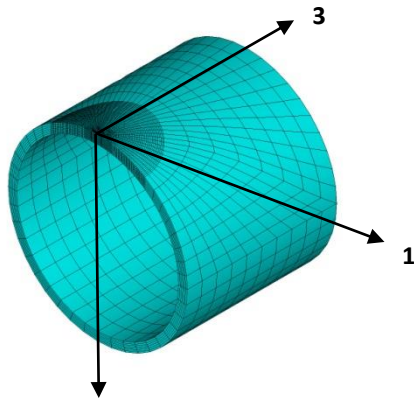


Рис. 10. КЭ модель зоны падения капель

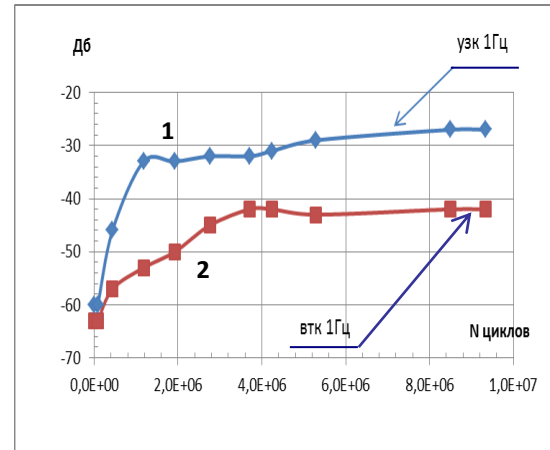


Рис. 11. Результаты УЗК (1) и ВТК (2)

Экспериментальные результаты зарождения и образования макроскопических термоусталостных трещин сравнивались с расчетными результатами, полученными по программе «Ресурс-НН» [2], позволяющей по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $\epsilon_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ рассчитывать параметры процессов накопления усталостных повреждений.

Расчетный анализ долговечности образца при термопульсациях проводился в два этапа. На первом этапе с использованием аттестованных программных средств 3D-моделирования рассчитывался процесс разогрева трубы до температуры $\sim 310^\circ\text{C}$ и подъема внутреннего давления до ~ 10 Мпа. Затем с использованием программы «Ресурс-НН» моделировался процесс падения с частотой 1 Гц капль дистиллята температуры $T=20^\circ\text{C}$ на наружную поверхность трубы, нагретую до $T=310^\circ\text{C}$. Для центральной части области падения капль по результатам трехмерных расчетов для нескольких начальных циклов (5 циклов) была определена история изменения температуры T (рис. 12) и компонент тензора напряжений σ_{ij} (рис. 13). На рис. 12, 13 n – число шагов интегрирования по времени.

$T^\circ\text{C}$

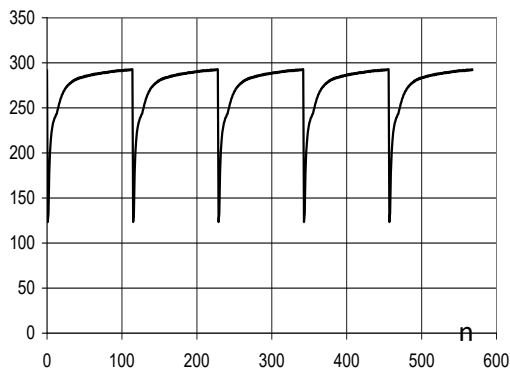


Рис. 12. Изменение температуры (5 циклов)

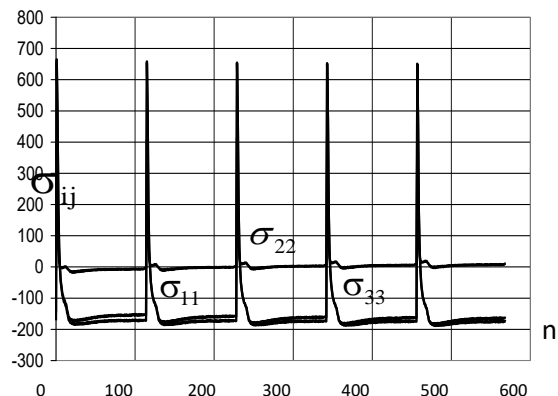


Рис. 13. Изменение напряжений (5 циклов)

Результаты трехмерных расчетов кинетики напряженного состояния образца показали, что нормальные компоненты тензора напряжений $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$, вычисленные по заданной истории изменения температуры T при частоте падения капель 1 Гц (рис. 12), на порядок меньше касательных напряжений $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$. При падении холодной капли с температурой $T = 20^\circ\text{C}$ на разогретую поверхность трубы ($\sim 310^\circ\text{C}$) наблюдается резкий подъем компонент тензора напряжений $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$, напряженное состояние близко к трехосному растяжению (рис. 13), при этом параметр жесткости напряженного состояния $\beta = \sigma/\sigma_u$ резко возрастает. Затем, в результате нагревания зоны падения капель, за счет окружающего ее нагретого материала трубы напряжения $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ и параметр β падают до отрицательных значений. Такой циклический процесс занимает приблизительно сотую долю общей длительности цикла падения капли. До падения следующей капли напряженно-деформированное состояние образца остается практически неизменным.

Анализ процесса деформирования материала показывает, что при частоте 1 Гц процесс деформирования имеет ярко выраженный нестационарный упругопластический характер: при падении холодной капли на горячую поверхность образца наблюдается резкий «всплеск» компонент нормальных напряжений $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$, носящий, в основном, гидростатический характер (растяжение, рис. 13), при котором гидростатическая положительная составляющая тензора напряжений σ за доли секунды достигает значительной величины. По мере нагревания пятна (зоны падения капель) напряжения стремятся к нулю, а затем принимают отрицательные значения за счет начального пластического растяжения материала пятна при падении капли, что иллюстрирует выраженный сложный характер процесса упругопластического деформирования материала при данной частоте.

Расчетная долговечность до зарождения макроскопической усталостной трещины в зоне падения капель с частотой 1 Гц, определенная с использованием программы «Ресурс-НН» без учета влияния параметра жесткости напряженного состояния β ($\beta = 0, f(\beta) = 1$), составила порядка $N \approx 3 \cdot 10^6$ циклов падения капель, а с учетом влияния функции $f(\beta)$ на темпы накопления повреждений – порядка $\sim 1,6 \cdot 10^6$ циклов падения капель, что хорошо коррелирует с экспериментальными данными: расчетное число циклов до образования макроскопической трещины на поверхности зоны пятна находится в центре области разброса экспериментальных данных. График накопления усталостных повреждений для этого случая показан на рис. 14. Аналогичные расчетные исследования процесса термопульсаций были проведены и для частот 2 Гц и 3 Гц.

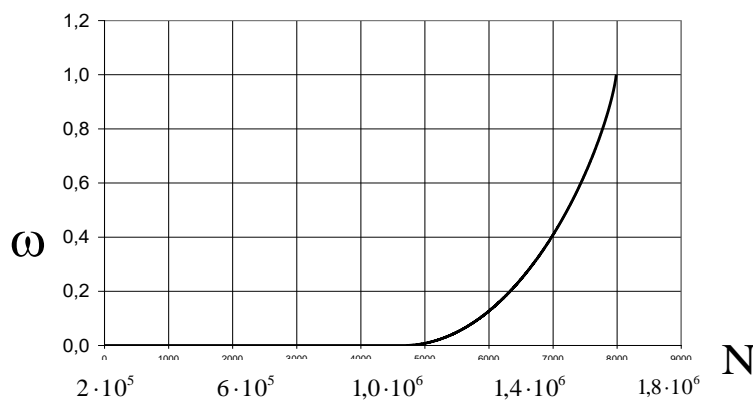


Рис. 14. График накопления повреждений

Выполненные по программе «Ресурс-НН» расчетные исследования показали, что при частоте падения капель 1 Гц накопление повреждений в центральной зоне падения капель происходит по механизму малоциклового усталости в результате нестационарной упругопла-

стической деформации материала. При частотах 2 Гц и 3 Гц процесс деформирования носит квазиупругий характер и накопление повреждений происходит по механизму многоциклового усталости, т. к. к моменту падения очередной холодной капли поверхность пятна не успевает в полной мере прогреться и пластические деформации не возникают.

Таким образом, полученные расчетные оценки количества циклов до зарождения трещин в зоне падения капель, выполненные с использованием математической модели накопления усталостных повреждений, достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными результатами.

Заключение

Разработана методика численного решения «связанной» задачи: «теплогидравлика – теплопроводность – НДС – поврежденность» для оценки влияния случайных термоциклических нагрузок, а также термопульсаций различной частоты, на ресурсные характеристики материалов РУ. Выполнена верификация методики численного решения «связанной» задачи, показана возможность ее использования для определения ресурсных характеристик оборудования РУ, подверженного воздействию термоциклических нагрузок.

Библиографический список

1. Лицензия ПО ANSYS Mechanical (версия 16) и ANSYS CFX (версия 16), договор приобретения № 98/72/4-15/174 от 06.07.2015 г.
2. Программное средство Ресурс-НН. Аттестационный паспорт Ростехнадзора № 323 от 18.04.2013 г.
3. **Банкрутенко, В.В.** Программная реализация моделирования процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах / В.В. Банкрутенко, М.А. Большухин, В.В. Киселев, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Вып.75(3). – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. – С.238-244.
4. **Смирнов, А.Н.** Оценка состояния длительно работающего металла технических устройств опасных зон производственных объектов акустическим методом / А.Н. Смирнов, Н.А. Хапонен, А.Н. Челышев, С.И. Мед // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 3. – С. 28-31.
5. **Chaboche, J.L.** Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation / J.L. Chaboche // Engineering Design. – 1981. – № 64. – P. 233-247.

*Дата поступления
в редакцию: 23.01.2019*

D.E. Bescherov¹, M.A. Bolshukhin¹, A.V. Kozin¹, V.V. Lebedev¹,
V.A. Panov¹, V.A. Pakhomov¹, D.N. Sveshnikov¹, D.N. Shishulin¹,
M.A. Legchanov², R.R. Ryazapov²

VERIFICATION OF FATIGUE STRENGTH CALCULATION METHODOLOGY OF REACTOR UNIT EQUIPMENT UNDER NON-STATIONARY CYCLIC LOADS

JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²

Purpose: To confirm operability of the modeling process technology of fatigue damages occurring in structural materials of equipment and systems of reactor units under non-stationary, non-isothermic loads.

Technology/approach: The approach is based on numeric methods application along with certified software means when correlation «thermal hydraulic – thermal conductivity – stress and strain state-damage rate» is solved as a «coupled» task.

Mathematic models: Mathematic model of non-isothermal elastoplastic deformation and a model of damaged medium mechanics are used for calculation examination of damage accumulation processes in structural materials and equipment.

Justification: Numeric calculation results for fatigue damage accumulation processes in the considered structural materials under thermal pulsations are confirmed by the results of experimental studies.

Findings: The performed studies verified numeric calculations methodology for the «coupled» task and demonstrated its applicability to identify life cycle characteristics of reactor unit equipment subjected to thermal cyclic loads.

Key words: structural element, cyclic loading, temperature pulsations, software means, finite elements methods, experimental study, stress and strain state, accumulation of damages.