

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ СЕТКИ ТРЕЩИН В РАЙОНЕ ВЕРХНЕЙ ТРУБНОЙ ДОСКИ ТЕПЛООБМЕННИКА РЕАКТОРА БН-600

О.Ю. Виленский, А.Н. Крылов, С.Л. Осипов, Д.Л. Осетров,  
С.А. Рогожкин, Б.З. Марголин\*, О.Ю. Прокошев\*, М.Л. Поздняков\*,  
А.Г. Гуленко\*

*ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова». 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15.*

*\* ФГУП Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей». 191015, Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.*



Для обследования состояния и обоснования продления срока эксплуатации до 45-ти лет промежуточных теплообменников (ПТО) «натрий-натрий» реакторной установки БН-600 энергоблока № 3 Белоярской АЭС (БАЭС) в апреле 2006 г. один из шести теплообменников был извлечен из реактора. Результаты исследований показали наличие трещин на наружной поверхности верхней трубной доски (ВТД) и примыкающей к ней обечайки с максимальной глубиной до 7 мм. Для прогнозирования долговечности металла, подверженного значительному старению, возникла необходимость в верификации существующей зависимости порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений для стали 10Х18Н9. В связи с этим были выполнены соответствующие испытания образцов двух элементов конструкции ПТО: ВТД и блока защиты. Для выявления механизмов разрушения было проведено фрактографическое изучение поверхности трещин, обнаруженных в трубной доске и полученных на образцах. На базе проведенных исследований сделан вывод, что механизм разрушения для трещин, выявленных в трубной доске, идентичен механизму, полученному в испытанных образцах. В обоих случаях преобладает межзеренное разрушение, характерное при уровне нагружения материала, свидетельствующем о прекращении роста трещин. Данный результат позволяет говорить о зарождении и распространении трещин в трубной доске ПТО в области многоциклового усталости при невысоком уровне размахов деформаций и коэффициента интенсивности напряжений. Анализ причин образования трещин показал, что они могли образоваться в результате воздействия пульсаций температур, вызванных смещением разнотемпературных потоков натрия, поступающего на вход ПТО и из системы охлаждения корпуса реактора. По результатам расчетного анализа для всех рассмотренных условий термопульсаций и сечений развития трещин выполняется условие герметичности ВТД и обечайки выходной камеры ПТО, разделяющих первый и второй контуры теплоносителя. Расчетно-экспериментальные исследования подтвердили, что наличие этих трещин не ограничивает возможность продления срока эксплуатации ПТО реакторной установки БН-600 до 45-ти лет.

**Ключевые слова:** БН-600, промежуточный теплообменник, расчетно-экспериментальные исследования, пульсации температур, напряженно-деформированное состояние, коэффициент интенсивности напряжений, многоцикловая усталость, ползучесть, трещины.

## ВВЕДЕНИЕ

Промежуточные теплообменники (ПТО) «натрий-натрий» эксплуатируются в составе реакторной установки БН-600 энергоблока № 3 Белоярской АЭС (БАЭС) с 1980 г. Назначенный срок их службы составлял 30 лет и истек в 2010 г. ПТО работают в условиях высоких температур в диапазоне 367 – 550°C по первому контуру и в диапазоне 328 – 518°C по второму контуру при слабом воздействии нейтронного облучения. Основным фактором, влияющим на накопление повреждений, является циклическое воздействие нагрузок на теплообменник, которое формируется из сочетания режимов пуска, работы на энергетическом уровне мощности и останова (планового и со срабатыванием быстрой аварийной защиты).

Теплообменники изготовлены из аустенитной стали 10X18H9. С целью обследования состояния ПТО, получения экспериментальных данных по изменению механических характеристик конструкционного материала и обоснования возможности продления срока службы эксплуатируемых ПТО до 45-ти лет в апреле 2006 г. один из шести теплообменников был извлечен из реактора БН-600. Методами неразрушающего контроля на наружной поверхности верхней трубной доски и примыкающей к ней обечайке были обнаружены сетки трещин [1]. Глубина основных трещин составляла от 4 до 7 мм с раскрытием от 50 до 130 мкм. Целью работы является представление результатов исследования причин образования трещин и оценки возможности продления срока эксплуатации ПТО до 45-ти лет. Расчетные исследования проводились с использованием программного комплекса ANSYS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВТД ТЕПЛООБМЕННИКА

В качестве основной гипотезы образования и развития трещин предложено усталостное повреждение в результате многоцикловых термоциклических нагружений, обусловленных перетеканием холодного и горячего натрия [2].

Для оценки сопротивления материалов развитию трещин при циклическом нагружении используются расчетные методы, созданные в рамках линейной механики разрушения [3,4]. При подтверждении усталостного механизма зарождения трещины необходимо определить пороговое значение  $\Delta K_{th}$  (пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений), ниже которого развитие трещины отсутствует. Знание  $\Delta K_{th}$  и напряженно-деформированного состояния (НДС) позволяет ответить на вопросы, будут ли обнаруженные трещины развиваться и можно ли обеспечить продление срока службы ПТО при многоцикловом термоциклическом нагружении.

Металлографические и фратографические исследования трещин показали, что их распространение происходило по смешанному механизму со значительной долей межзеренного разрушения в основном металле.

Для прогнозирования долговечности металла, подверженного значительному старению, необходимо знать для этого материала зависимость  $\Delta K_{th}(R, T)$ , где  $R$  – коэффициент асимметрии цикла нагружения;  $T$  – температура, °C. Согласно нормативной документации [5], зависимость  $\Delta K_{th}(R, T)$  имеет следующий вид

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^0 (1 - 0,7R), \quad (1)$$

где  $\Delta K_{th}^0 = \Delta K_{th}$  при  $R = 0$ .

При  $T \leq 450^\circ\text{C}$  значение  $\Delta K_{th}^0 = 6,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ; при  $T > 450^\circ\text{C}$   $\Delta K_{th}^0 = 17 - 0,023 \cdot T, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , где  $T$  – температура в градусах Цельсия.

Зависимость (1) была взята из французского стандарта RCC-MR [6] для аустенитных хромоникелевых сталей. В указанном стандарте не оговаривалось, для какого состояния сталей (в аустенизированном, состаренном, наклепанном) эта зависимость применима и на какой фактической базе данных она была получена.

В связи с изложенным возникла задача по верификации данной зависимости применительно к стали 10X18H9 и анализа влияния старения на  $\Delta K_{th}$ . Для ее решения были проведены соответствующие исследования.

В качестве объекта для исследований была использована сталь 10X18H9 двух элементов конструкций:

- верхней трубной доски ПТО, эксплуатировавшейся при температуре 550°C;
- блока защиты ПТО, эксплуатировавшегося при температуре 520°C.

В течение всего периода эксплуатации материал элементов конструкций подвергался тепловому старению. Для выяснения степени влияния теплового старения на  $\Delta K_{th}$  часть исследуемого материала была подвергнута аустенизации. В результате термообработки устраняются все структурные изменения, вызванные старением, что позволяет рассматривать такой материал в качестве исходного. Затем были проведены испытания и получены значения  $\Delta K_{th}$  на состаренном и аустенизированном металле при трех значениях коэффициента асимметрии цикла и произведена оценка полученных результатов.

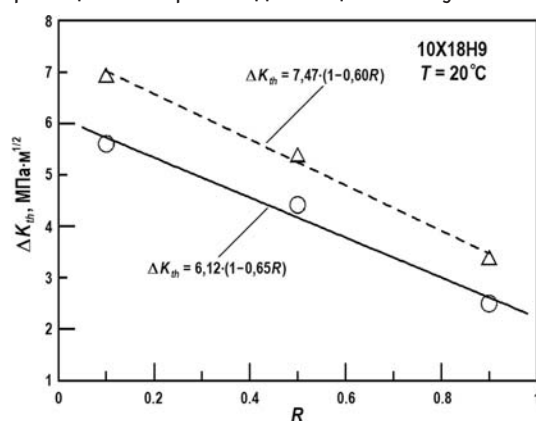


Рис. 1. Зависимость  $\Delta K_{th}(R)$  для стали 10X18H9: о – металл трубной доски после эксплуатации; Δ – металл обечайки блока защиты; - - - – зависимость для металла обечайки блока защиты; — – зависимость для металла верхней трубной доски

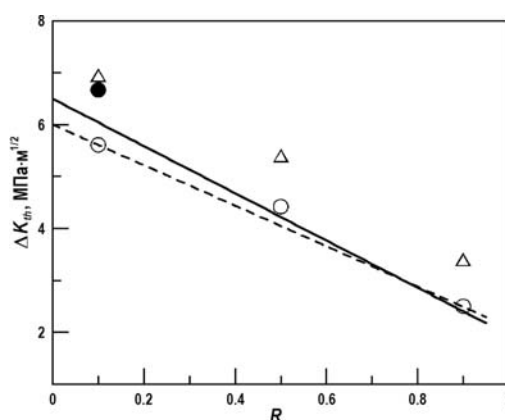


Рис. 2. Нормативная и откорректированная зависимости  $\Delta K_{th}(R)$  для стали 10X18H9: о – металл трубной доски после эксплуатации; ● – металл трубной доски после эксплуатации и аустенизации; Δ – металл обечайки блока защиты; - - - – откорректированная нормативная кривая; — – нормативная кривая в соответствии с [5]

На рисунке 1 представлены полученные экспериментальные результаты и их обра-

ботка линейной зависимостью вида  $\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^0 \cdot (1 - kR)$ , построенной с использованием метода наименьших квадратов. На рисунке 2 для тех же результатов приведена нормативная зависимость в соответствии с [5] и также представлена откорректированная зависимость, учитывающая результаты старения исследуемого материала.

Из полученных результатов следует, что аустенизация металла трубной доски приводит к повышению порогового значения циклической трещиностойкости до уровня  $\Delta K_{th}$ , полученного при испытании материала блока защиты, что свидетельствует о значительном тепловом старении металла трубной доски. Возможно, причинами этого стали более высокая температура эксплуатации металла трубной доски и наличие в ней субструктуры, обусловленной технологией изготовления.

Обработка данных по влиянию  $R$  на  $K_{th}$  для металла трубной доски показывает линейный характер зависимости  $K_{th}(R)$  с коэффициентом  $k = 0,65$  и  $0,60$  для металла блока защиты.

Сопоставление полученных данных с [5] показывает, что для состаренного металла трубной доски необходима корректировка расчетной зависимости (1). В этом случае целесообразно использовать нижнюю огибающую имеющихся данных (см. рис. 2), уравнение которой имеет вид

$$(\Delta K_{th})_{\text{старение}} = (\Delta K_{th}^0)_{\text{старение}} \cdot (1 - 0,65R), \quad (2)$$

где  $(\Delta K_{th}^0)_{\text{старение}} = 6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  при  $T \leq 450^\circ\text{C}$ .

При определении порогового значения  $\Delta K_{th}^0 = \Delta K_{th}(R = 0)$  при  $450 < T \leq 650^\circ\text{C}$  для состаренного металла предлагается применять линейную зависимость  $\Delta K_{th}^0(T)$  вида

$$\Delta K_{th}^0 = 16,575 - 0,0235 \cdot T, \text{ где } T \text{ в } ^\circ\text{C}.$$

При ее построении использовались значения  $\Delta K_{th}^0(450^\circ\text{C}) = 6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , а также  $\Delta K_{th}^0(650^\circ\text{C}) = 1,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  как самые низкие из имеющихся в литературе данных для нержавеющей аустенитных сталей.

Для выявления механизмов разрушения было проведено фрактографическое изучение поверхности испытанных образцов и трещин, обнаруженных в трубной доске. На базе проведенных исследований сделан вывод, что механизм разрушения для трещин, выявленных в трубной доске, идентичен механизму, полученному в испытанных образцах в области пороговых значений  $\Delta K_{th}$ . В обоих случаях преобладает межзеренное разрушение, характерное при уровне нагружения материала, близком к  $\Delta K_{th}$ , что свидетельствует о прекращении дальнейшего роста трещин. Данный результат позволяет говорить о зарождении и распространении трещин в трубной доске ПТО в области многоциклового усталости при относительно невысоких уровнях размахов деформаций и коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

### **АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ВТД ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУР**

Проведенный анализ причин возникновения сетки трещин показал, что они образовались в результате термоциклической нагрузки, вызванной попаданием «холодного» теплоносителя системы охлаждения корпуса реактора (температура  $390^\circ\text{C}$ ) и «горячего» натрия первого контура (температура  $546^\circ\text{C}$ ).

Зарождение и развитие трещин определяются следующими параметрами:

- разностью температур между «горячим» и «холодным» теплоносителем (размахом термопульсаций), равной  $156^\circ\text{C}$ ;
- коэффициентом теплоотдачи от натрия к обечайке, определяемым по известным эмпирическим зависимостям [7] и равным  $4000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;
- частотой пульсаций температур.

Для определения кинетики НДС в районе ВТД с учетом термоциклических нагрузок выполнялся расчет температурного состояния теплообменника.

Зависимость температуры теплоносителя в зоне перемешивания от времени может иметь сложный характер с широким спектром частот от 0,01 до 10 Гц. При решении данной задачи принималось, что температура изменяется по синусоидальному закону:

$$T(\tau) = T_{cp} + A \cdot \sin(2\pi f\tau), \quad (3)$$

где  $T_{cp}$  – средняя температура теплоносителя в зоне термопульсаций, среднеарифметическое значение температур «горячего» и «холодного» теплоносителя в зоне смешения;  $A$  – амплитуда колебаний – половина от размаха термопульсаций;  $f$  – частота колебаний, Гц;  $\tau$  – время, с.

Согласно измерениям на работающем энергоблоке БН-600 [8] и исследованиям [9], в верхней камере реактора наиболее характерными являются пульсации температур теплоносителя с частотами в диапазоне от 0,03 до 1 Гц. С точки зрения возможности образования трещин, определяющими являются частоты от 0,1 до 1 Гц. При пульсации температур с частотой ниже 0,1 Гц размах колебаний в материале конструкции остается практически постоянным, однако количество циклов нагружения значительно сокращается. При термопульсациях с частотой в 1 Гц размах колебаний температур в материале значительно ниже, чем при частоте в 0,1 Гц, но количество циклов нагружения в 10 раз больше. Для анализа температурного состояния ПТО были выбраны частоты 0,1; 0,3 и 1 Гц.

На рисунке 3 представлены результаты анализа температурного состояния ПТО в виде зависимости размаха пульсаций температур от толщины обечайки. С увеличением частоты термопульсаций размах колебаний температур уменьшается. При частоте пульсаций температур в 0,1; 0,3 и 1 Гц разность между максимальной и минимальной температурами обечайки в зоне контакта с теплоносителем составляет 56, 35 и 16 °С соответственно. Глубина проникновения термопульсаций с частотами 0,1; 0,3 и 1 Гц составляет 12, 8 и 3 мм соответственно.

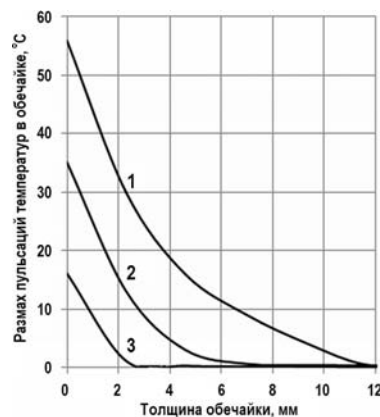


Рис. 3. Результаты анализа температурного состояния в районе ВТД ПТО, полученные по программе ANSYS: 1 – 3 – размах термопульсаций в обечайке в зависимости от толщины при частоте 0,1; 0,3 и 1 Гц соответственно

### АНАЛИЗ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ВТД ТЕПЛООБМЕННИКА

В процессе длительной эксплуатации при температуре  $T > 450^\circ\text{C}$  свойства материала ВТД описываются следующим уравнением ползучести

$$\sigma_{eq} = \{(\varepsilon_{eq}^{nc})^{1-mc} / [a_c(1 - m_c)\tau]\}^{1/nc}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{eq}$  – эквивалентное напряжение;  $\varepsilon_{eq}^{nc}$  – эквивалентная деформация ползучести в момент времени  $\tau$ ;  $a_c$ ,  $n_c$ ,  $m_c$  – константы ползучести материала.

Результаты расчета НДС, соответствующие температурным распределениям для частоты 0,1 Гц, представлены на рис. 4 в виде изменения за 1000 часов нагружения эквивалентных деформаций ползучести  $\varepsilon_{eq}^{nc}$  и главных напряжений  $\sigma_1$  для центра зоны термо-

пульсаций (с максимальными эквивалентными напряжениями  $\sigma_{eq}$ ). Как видно из рисунка, за это время происходит значительный рост эквивалентных деформаций ползучести и, соответственно, достаточное снижение растягивающих напряжений (с 280 до ~100 МПа) с переходом к стадии насыщения при эксплуатации более 1000 часов. Растягивающие напряжения  $\sigma_1$  достаточно быстро релаксируют также и для частот 0,3 и 1 Гц.

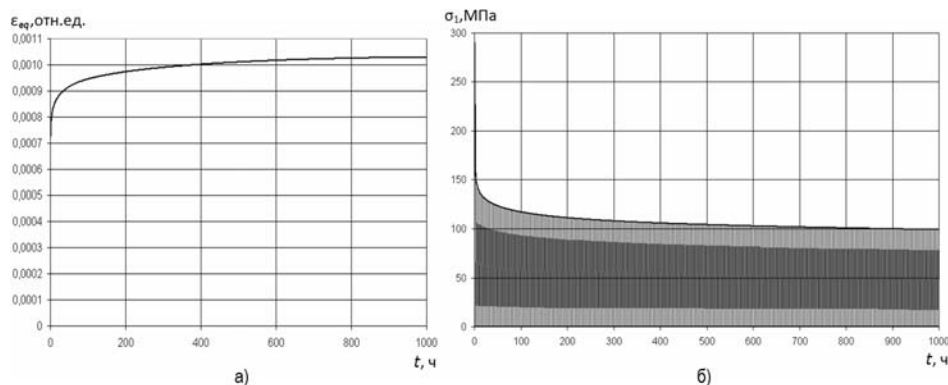


Рис. 4. Изменение деформаций ползучести  $\varepsilon_{eq}^c$  (а) и главных напряжений  $\sigma_1$  (б) в центральной зоне термопульсаций для 0,1 Гц

Оценки циклической и длительной статической поврежденности (возможности зарождения трещин по механизмам усталости и ползучести) в зоне термопульсаций ПТО проведены по результатам анализа НДС с использованием нормативных кривых усталости и длительной прочности из [5]. Результаты оценок минимально возможного времени зарождения трещин в районе ВТД извлеченного ПТО реактора БН-600 для различных условий термопульсаций представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты оценок минимально возможного времени зарождения трещин**

Параметр	Частота пульсаций, Гц		
	0,1	0,3	1
Изменение температуры на поверхности в центре пятна (холодная/горячая волны Na), °C	446/502	458/493	466/482
Эквивалентный размах деформаций в цикле $\Delta\varepsilon_{eq}$ , %	0,132	0,0785	0,041
Скорость деформирования в цикле $\xi_{цикл}$ , ч <sup>-1</sup>	1	1,7	3
Допускаемое число циклов до зарождения трещины, $N_f$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^7$	$>10^{10}$
Число циклов термопульсаций за 26 лет эксплуатации, $N$	$6,13 \cdot 10^7$	$1,84 \cdot 10^8$	$6,13 \cdot 10^8$
Расчетное повреждение за счет усталости за 26 лет, $D_N = N/N_f$	153	4,6	$<0,06$
Минимально возможное время до зарождения трещин $t_{min}$ , лет	0,17	5,6	Трещин нет

Следует отметить, что фактическое число циклов и, соответственно, время до зарождения усталостных трещин может быть значительно выше расчетных значений, т.к. нормативные кривые усталости имеют значительные коэффициенты запаса по размаху деформаций  $n_\varepsilon = 2$  и числу циклов  $n_N = 10$  по сравнению с усредненными значениями.

Для уточненного расчета времени до зарождения трещины  $t_f$  за счет ползучести использовалась аппроксимирующая зависимость

$$t_f = \exp[5,039(7,4017 - \ln(\sigma_{cr}))], \quad (5)$$

где  $\sigma_{cr}$  – эквивалентное истинное напряжение в момент разрушения при ползучести (длительная прочность).



Консервативно принимая в цикле для 1000 часов нагружения максимальное значение  $(\sigma_{eq})_i = \sigma_{cr} = 85$  МПа (для 0,1 Гц), как для всей длительности нагружения, за  $t = 170000$  часов (за 26 лет), получим повреждение за счет ползучести  $D_t = t/t_f = 0,057$ , что незначительно. Для размахов термопульсаций, соответствующих частоте 0,3 Гц, повреждение за счет ползучести будет еще меньше.

Для расчета развития трещин в элементе ПТО использовалась методика [5, 10], в которой представлена процедура роста постулируемого дефекта с учетом условий нагружения. При этом постулируемый дефект располагался в элементе таким образом, чтобы трещина развивалась наиболее быстро от действия нагружающих факторов.

Для оценки скорости роста трещины при циклическом деформировании использовалась формула [5]

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = C_f \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}} \right]^{n_f}, \frac{\text{мм}}{\text{цикл}} & \text{при } \Delta K > \Delta K_{th}(R, T) \\ \frac{dl}{dN} = 0, & \text{при } \Delta K \leq \Delta K_{th}(R, T) \end{cases}, \quad (6)$$

где  $a$  – длина трещины;  $N$  – количество циклов нагружения;  $\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в цикле;  $R$  – коэффициент асимметрии цикла;  $C_f, n_f$  – константы материала.

Расчетные оценки скорости подраста трещин при циклическом нагружении для всех рассмотренных условий термопульсаций показали, что максимальная скорость подраста трещины происходит при ее расчетной начальной глубине 2 мм. По мере роста трещины в глубь сечения ее скорость нелинейно снижается за счет уменьшения  $\Delta K$  ( $R$  при этом увеличивается). Но даже при таком снижении скорости роста трещина могла бы прорасти до сквозной при существующем многоцикловом нагружении за 26 лет эксплуатации. Ограничителем роста трещины служит пороговый размах КИН –  $\Delta K_{th}$ , при снижении до которого прекращается циклический рост трещины. Максимальная глубина трещины может быть рассчитана из уравнения

$$\Delta K = \Delta K_{th}(R), \quad (7)$$

где  $\Delta K$  зависит от глубины трещины, соотношения ее полуосей, а также уровня и характера нагружения (в данном случае – от частоты термопульсаций).

Оценки максимальной глубины трещин для температурного состояния, соответствующего частоте пульсаций 0,1 Гц, дают значительно завышенные результаты: по сравнению с фактическим размером, не превышающим 7 мм, 35 – 38,5 мм для верхней трубной доски и 14 мм для обечайки выходной камеры.

Максимальная расчетная глубина трещин для температурного состояния, соответствующего частоте пульсаций 0,3 Гц, составляет 10,5 – 11 мм для верхней зоны трубной доски и 6,5 мм для обечайки выходной камеры. Эти величины близки к фактической наибольшей глубине трещин, обнаруженных в зоне термопульсаций ВТД ПТО, что позволяет считать частоту 0,3 Гц условной эффективной частотой термопульсаций.

Тем не менее, для всех рассмотренных условий термопульсаций и сечений развития трещин условие герметичности зоны ВТД (толщина – 63 мм) и обечайки выходной камеры (толщина – 39 мм) ПТО, разделяющих первый и второй контуры теплоносителя, выполняется.

Как показали фрактографические исследования изломов образцов, изготовленных из металла верхней трубной доски 5ПТО-А РУ БН-600 и испытанных на циклическую трещиностойкость, межзеренному разрушению соответствовали размахи КИН  $\Delta K < 10$  МПа·м<sup>1/2</sup>, что соответствует размахам термопульсаций с частотой ~ 0,3 Гц ( $\Delta K = 7 - 8$  МПа·м<sup>1/2</sup>). При значениях  $\Delta K \geq 10$  МПа·м<sup>1/2</sup> рельеф трещин в образцах

отвечал протеканию преимущественно сдвиговых процессов, что соответствует размахам термопульсаций с частотой  $\sim 0,1$  Гц ( $\Delta K = 13 - 15$  МПа $\cdot$ м $^{1/2}$ ).

Таким образом, учитывая определенные значения  $\Delta K_{thr}$ , частота 0,3 Гц соответствует фактическим глубинам трещин, развивающихся по межзеренному механизму, вплоть до остановки их роста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетно-экспериментальные исследования механизма зарождения трещин в районе ВТД ПТО реактора БН-600 показали, что трещины зародились за счет многоциклового усталости, а влияние ползучести практически отсутствовало.

Результаты численных оценок развития трещин при частоте пульсаций 0,3 Гц наиболее соответствуют фактическим глубинам трещин, распространяющихся по межзеренному механизму, вплоть до остановки их развития. Минимальное расчетное время до зарождения трещин при этом составило 5,6 лет. При размахах температур, соответствующих более высоким частотам пульсаций, зарождение трещин маловероятно.

Для всех рассмотренных условий термопульсаций и сечений развития трещин выполняется условие герметичности ВТД и обечайки выходной камеры ПТО, разделяющих первый и второй контуры теплоносителя.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили, что возникновение трещин, обнаруженных в ВТД, обусловлено температурными пульсациями, и показали, что наличие этих трещин не ограничивает возможность продления срока эксплуатации ПТО реактора БН-600 до 45-ти лет.

## Литература

1. Васильев Б.А., Тимофеев А.В., Любимов М.А., Гладков В.В., Кайдалов В.Б. Обеспечение работоспособности заменяемого оборудования реакторной установки при продлении срока эксплуатации энергоблока БН-600 до 45-ти лет // Ядерная энергетика. – 2011. – №1. С. 44-54.
2. Ohshima H., Muramatsu T., Kobayashi J., Yamaguchi A. Current status of studies on temperature fluctuation phenomena in LMFRS/ Specialists' meeting on «Correlation between material properties and thermohydraulics condition in LMFRs» (Provence, France 22-24 november 1994).
3. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
4. Нотт Дж./ Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
5. РД ЭО 1.1.2.09.0714-2007. Методика расчета прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Концерн «Росэнергоатом», 2007.
6. RCC-MR Design and construction rules for mechanical components of FBR Nuclear Islands. AFCEN, 2002.
7. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976. – 328с.
8. Sobolev V.A., Kuzavkov N.G. Identification of places with fluid temperature fluctuation in BN-600 reactor and reactor system / Specialists' meeting on «Correlation between material properties and thermohydraulics condition in LMFRs» (Provence, France 22-24 november 1994).
9. Chellapandi P., Chetal S.C., Baldev Raj. Thermal Striping limits for components cooled fast spectrum reactors // Nuclear Engineering and Design. 2009. PP. 2754-2765.
10. Методические рекомендации МР 125-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. – М.: НПО ЦНИИТМАШ, НИКИЭТ, 1995.

Поступила в редакцию 15.10.2014 г.

## Авторы

Виленский Олег Юрьевич, заместитель начальника подразделения, канд. техн. наук  
E-mail: silaev@okbm.nnov.ru

Крылов Алексей Николаевич, инженер-конструктор



Осипов Сергей Леонидович, начальник подразделения, канд. техн. наук

Осетров Дмитрий Львович, инженер-конструктор

Рогожкин Сергей Александрович, заместитель начальника подразделения

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

Марголин Борис Захарович, заместитель начальника НПК, начальник лаборатории,  
доктор техн. наук, профессор

E-mail: margolinbz@yandex.ru

Прокошев Олег Юрьевич, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Поздняков Максим Леонидович, ведущий инженер

Гуленко Александр Георгиевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

UDC 621.039.5:539.4 БН

## **COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON THE CAUSES OF CRACK NETWORK FORMATION IN THE AREA OF THE HEAT EXCHANGER TUBE SHEET IN THE BN-600 REACTOR**

Vilenskij O.Yu. , Krylov A.N., Osipov S.L., Osetrov D.L., Rogozhkin S.A.

Margolin B.Z. \*, Prokoshev O.Yu. \*, Pozdnyakov M.L. \*, Gulenko A.G. \*

Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering».

15, Burnakovsky proezd, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

\* Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Structural Materials «Prometey». 49, Shpalernaya St., Saint Petersburg, 191015 Russia

### **ABSTRACT**

In order to examine the condition of intermediate sodium-to-sodium heat exchangers (IHX) and to substantiate their operation life extension to 45 years in the BN-600 reactor plant at Beloyarsk NPP Unit 3, one of the six heat exchangers was removed from the reactor in April 2006. Results of inspection showed that there were cracks 7 mm deep maximum on the outer surface of the upper tubesheet and adjacent shell. To predict durability of substantially fatigued metal, a need arose to verify the existing relationship for the threshold stress intensity factor range for the 10Cr18Ni9 steel. To this end, respective testing was conducted on specimens of two structural elements in the IHX – upper tubesheet and protection block. To identify failure mechanisms, fractographic studies were performed on the surface of cracks detected in the tubesheet and made in the specimens. Based upon the studies, a conclusion was made that the failure mechanism for cracks detected on the tubesheet was identical to the mechanism generated in the test specimens. In both the cases, the intergranular failure prevailed that is typical for the material loading level testifying to termination of the crack growth. This result makes it possible to speak about crack initiation and propagation in the IHX tubesheet in the high-cycle fatigue region at a low-level strain ranges and stress intensity factor ranges. An analysis of causes of crack formation showed that the cracks could have formed as a result of the temperature pulsation effect produced by mixing of sodium flows having different temperatures – sodium entering the IHX inlet and sodium coming from the reactor vessel cooling system. Based upon computational analysis results, for all thermal pulsation conditions and crack propagation cross-sections under consideration, the leak-tightness condition is met for the upper tubesheet and IHX outlet chamber shell that divide the primary and secondary coolant circuits. The computational and experimental studies have proved that presence of these cracks does not limit the possibility of service life extension to 45 years for the IHX in the BN-600 reactor plant.

**Key words:** BN-600, intermediate heat exchanger, computational and experimental studies, temperature pulsations, stress strained state, stress intensity factor, multi-cycle fatigue, creep, cracks.

#### REFERENCES

1. Vasil'yev, B. A., Timofeev, A. V., Lyubimov, M. A., Gladkov, V. V., Kaydalov, V. B. *Obespechenie rabotosposobnosti zamenyaemogo oborudovaniya reaktornoj ustanovki pri prodlenii sroka e'kspluatatsii e'nergobloka BN-600 do 45-ti let*. [Ensuring Operability of Reactor Plant Replaceable Equipment while Extending the Service Life of the BN-600 Power Unit to 45 years]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 1, pp. 44-54 (in Russian).
2. Ohshima H., Muramatsu T., Kobayashi J., Yamaguchi A. Current status of studies on temperature fluctuation phenomena in LMFRS/ Specialists' meeting on «Correlation between material properties and thermohydraulics condition in LMFRs» (Provence, France 22-24 november 1994).
3. Broek D. *Osnovy mexaniki razrushenij*. [Elementary Engineering Fracture Mechanics]. Moscow. High school, 1980 (in Russian).
4. Knott J.F. *Osnovy mexaniki razrushenij*. [Elementary Engineering Fracture Mechanics]. Moscow. Metallurgy., 1978 (in Russian).
5. RD EO 1.1.2.09.0714-2007 *Metodika rascheta prochnosti osnovnykh elementov reaktornykh ustanovok na bystrykh nejtronax s natrievym teplonositelem*. [Strength Analysis Method for Main Elements of Sodium-Cooled Fast Reactor Plants]. Rosenergoatom Concern Publ., 2007 (in Russian).
6. RCC-MR Design and construction rules for mechanical components of FBR Nuclear Islands. AFCEN, 2002.
7. Borishanskij V.M., Kutateladze S.S., Novikov I.I., Fedynsky O.S. *Zhidkometallicheskie teplonositeli* [Liquid Metal Coolants]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976 (in Russian).
8. Sobolev V.A., Kuzavkov, N.G. Identification of places with fluid temperature fluctuation in BN-600 reactor and reactor system. Specialists' meeting on «Correlation between material properties and thermohydraulics condition in LMFRs» (Provence, France 22-24 November 1994).
9. Chellapandi P., Chetal S.C., Baldev Raj. Thermal Striping limits for components cooled fast spectrum reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, pp. 2754-2765.
10. *Metodicheskie rekomendacii MR 125-02-95. Pravila sostavleniya raschetnykh sxem i opredelenie parametrov nagruzhennosti elementov konstrukcij s vyyavlennymi defektami*. [Methodical Recommendations MR 125-02-95 Regulations for Generating Computational Schemes and Determining Loading Parameters for Structural Elements with Defects Identified]. Moscow, SPA CNIITMASH, NIKIET Publ., 1995 (in Russian).

#### Authors

Vilenskij Oleg Yu'evich, Deputy Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: silaev@okbm.nnov.ru

Krylov Alexey Nikolaevich, Design Engineer

Osipov Sergey Leonidovich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

Osetrov Dmitry L'vovich, Design Engineer

Rogozhkin Sergey Aleksandrovich, Deputy Head of Department

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

Margolin Boris Zaharovich, Deputy Head of Research and Production Complex,

Head of Laboratory, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: margolinbz@yandex.ru

Prokoshev Oleg Yu'evich, Senior Scientist, Cand. Sci. (Engineering)

Pozdnyakov Maksim Leonidovich, Lead Engineer

Gulenko Alexandr Georgievich, Lead Scientist, Cand. Sci. (Engineering)