

УДК 621.94.084

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ, ВЫЗВАННЫХ ТЕПЛОВЫМ И РАДИАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ, НА НДС ТЕЛ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Докт. физ.-мат. наук, проф. КУЛИКОВ И. С., магистр КЛУС С. А.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время при исследовании конструкций ядерных энергетических реакторов представляет интерес ряд задач о напряженно-деформированном состоянии их отдельных элементов. Оценка напряженно-деформированного состояния элементов активных зон ядерных энергетических реакторов – достаточно существенный фактор при определении работоспособности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые в большинстве случаев имеют форму цилиндров. С этой точки зрения учет неравномерного нагрева и облучения при расчетах на прочность является важнейшим этапом перед проведением дорогостоящих экспериментальных исследований.

Составной частью тепловыделяющего элемента является имеющая форму полого цилиндра оболочка, сдерживающая выход продуктов деления из топлива. Поэтому исследование напряженно-деформированного состояния оболочки – один из ключевых моментов в процессе конструирования и эксплуатации ядерных энергетических установок.

Рассмотрим оболочку ТВЭЛа, имеющую форму полого бесконечно длинного цилиндра (рис. 1), под воздействием поля высоких температур и нейтронного потока, приводящих к появлению тепловой и радиационной ползучести, что является весьма существенным фактором при оценке работоспособности элементов активных зон ядерных реакторов. Тепловая и радиационная ползучести совместно с распуханием, вызванным нейтронным воздействием, могут привести к изменению размеров и формы оболочек ТВЭЛов и чехлов тепловыделяющих сборок, являющихся тонкостенными конструкциями.

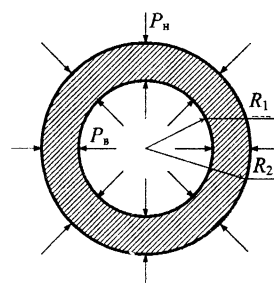


Рис. 1. Сечение цилиндра, нагруженного внешним и внутренним давлениями

В качестве конкретного примера рассмотрим напряженно-деформированное состояние оболочки ТВЭЛа быстрого энергетического реактора, имеющей форму полого осесимметричного цилиндра, изготовленного из стали ОХ16Н15МЗБ (316L – зарубежный аналог). Оболочка внутренним радиусом $R_1 = 0,003$ м и внешним радиусом $R_2 = 0,0033$ м находится под действием: внутренних $P_в = 7,5$ МПа и внешних $P_н = 0,1$ МПа нагрузок в условиях объемных термических $T(r)$ и радиационных $S(T(r), \phi t)$ деформаций со следующими данными: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $T(R_1) = 300$ (573) °С (К), $\alpha = 18,3 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ [1].

Основное отличие бесконечно длинного цилиндра состоит в том, что можно рассматривать не весь цилиндр, а лишь его отдельное сечение.

Будем считать, что тензор напряжений и деформаций имеет отличные от нуля компоненты σ_{11} , σ_{22} , ε_{11} , ε_{22} (плоская задача).

Определим напряжения и деформации, возникающие при таком нагружении, численными методами (методом аппроксимации). Для этого запишем уравнение равновесия и граничные

условия, выраженные через радиальные перемещения [1, 2]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = (1 + \nu) \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \frac{\partial \varepsilon_{11}^c}{\partial r} + \nu \frac{\partial \varepsilon_{22}^c}{\partial r} + \frac{1 - \nu}{r} (\varepsilon_{11}^c - \varepsilon_{22}^c); \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{R_1} = -P_B \frac{1 - \nu^2}{E} \times \left((1 + \nu)(\alpha T(R_1) + \frac{1}{3} S(T(R_1), \phi, t)) + \varepsilon_{11}^c + \nu \varepsilon_{22}^c \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{R_2} = -P_H \frac{1 - \nu^2}{E} \times \left((1 + \nu)(\alpha T(R_2) + \frac{1}{3} S(T(R_2), \phi, t)) + \varepsilon_{22}^c + \nu \varepsilon_{11}^c \right),$$

где $T(r)$ – предполагается заданной функцией от координат,

$$T(r) = T_S + \frac{q_V}{4\lambda} (R_2^2 - r^2). \quad (3)$$

$S(T(r), \phi, t)$ – функция радиационного распухания, зависящая от температуры, времени, заданного нейтронного потока,

$$S(T(r), \phi, t) = 4,9 \cdot 10^{-51} (\phi t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T(r)} + \frac{5,98 \cdot 10^6}{(T(r))^2}}; \quad (4)$$

ϕ – нейтронный поток; ε_{ij}^c – деформации ползучести.

Для определения перемещений используем шаговый метод, одновременно решая на каждом временном шаге уравнение (1) с учетом граничных условий (2). Для чего уравнение равновесия и граничные условия запишем в виде

$$\frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2} - \frac{u_i}{r_i^2} + \frac{1}{r_i} \frac{u_i - u_{i-1}}{h} = B_i, \quad (5)$$

где

$$B_i = (1 + \nu) \left(\alpha \frac{T_i - T_{i-1}}{h} + \frac{1}{3} \frac{S_i - S_{i-1}}{h} \right) + \frac{\varepsilon_{11,i}^c - \varepsilon_{11,i-1}^c}{h} + \nu \frac{\varepsilon_{22,i}^c - \varepsilon_{22,i-1}^c}{h} + \frac{1 - \nu}{r_i} (\varepsilon_{11,i}^c - \varepsilon_{22,i}^c);$$

$$\frac{u_1 - u_0}{h} + \nu \frac{u_0}{r_0} = -P_B \frac{1 - \nu^2}{E} \times \left((1 + \nu)(\alpha T(r_0) + \frac{1}{3} S(T(r_0), \phi, t)) + \varepsilon_{11,0}^c + \nu \varepsilon_{22,0}^c \right); \quad (6)$$

$$\frac{u_n - u_{n-1}}{h} + \nu \frac{u_n}{r_n} = -P_H \frac{1 - \nu^2}{E} \times \left((1 + \nu)(\alpha T(r_n) + \frac{1}{3} S(T(r_n), \phi, t)) + \varepsilon_{11,n}^c + \nu \varepsilon_{22,n}^c \right).$$

После нахождения радиальных перемещений определяем тензор деформаций, используя соотношения Коши. Для установления тензора напряжений используем физические уравнения. Деформации ползучести определяем по алгоритму, предложенному в [3].

На рис. 2–5 представлены результаты расчетов на прочность по специальной программе, разработанной в среде C++.

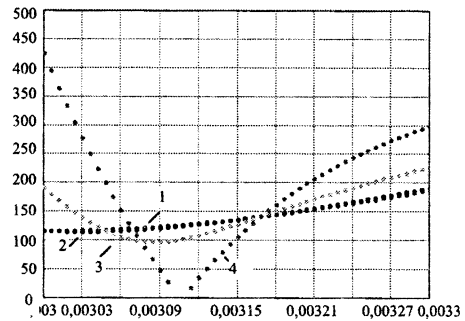


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений без учета деформаций ползучести: 1 – в начальный момент времени; 2 – по истечении 1000 ч; 3 – то же 4000 ч; 4 – то же 7000 ч

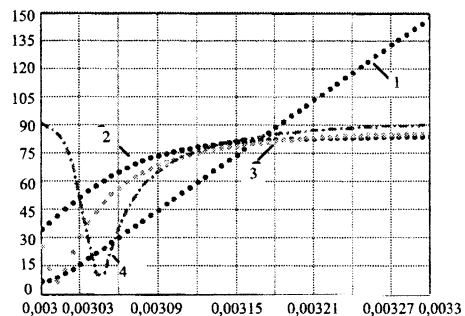


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений с учетом деформаций ползучести: 1 – в начальный момент времени; 2 – по истечении 1000 ч; 3 – то же 4000 ч; 4 – то же 7000 ч

Полученные результаты показывают большое влияние радиационного распухания на напряженно-деформированное состояние элемен-

тов конструкций ядерных энергетических реакторов (рис. 2), что обусловлено его зависимостью от дозы облучения, температуры и времени эксплуатации. Анализируя напряжения отметим, что они релаксируют с течением времени в результате ползучести. Однако деформации ползучести накапливаются во времени (рис. 4, 5) и после определенного периода в результате охрупчивания материала под действием нейтронного потока они могут стать причиной разрушения оболочки.

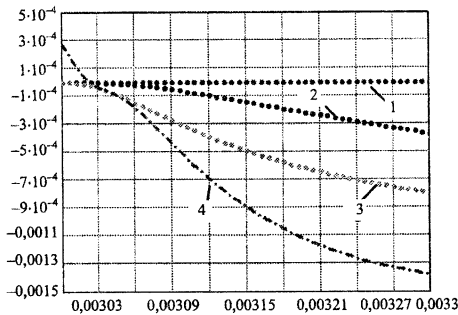


Рис. 4. Распределение радиальных деформаций ползучести: 1 – в начальный момент времени; 2 – после 1000 ч; 3 – после 4000 ч; 4 – после 7000 ч

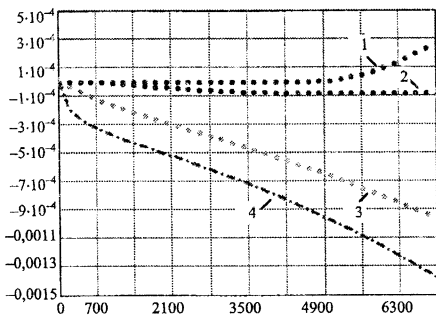


Рис. 5. Распределение радиальных деформаций ползучести по времени; 1 – для $r = 0,003$; 2 – $r = 0,00304$; 3 – $r = 0,00315$; 4 – $r = 0,0033$

Кроме этого, кривые эквивалентных напряжений, изменяющихся со временем, перестают иметь гладкий характер, что обусловлено присутствием конкурирующих факторов: одно-временное воздействие температуры, нейтронного облучения и ползучести, роль которых в процессе кампании ядерного реактора различна.

ВЫВОД

Полученные расчетные данные показывают значительное влияние деформаций ползучести на прочностные характеристики оболочек ТВЭЛов ядерных энергетических реакторов и подтверждают важность учета в расчетах тепловой и радиационной ползучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прочность** элементов конструкций при облучении / И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин. – Минск, 1990. – 134 с.
2. **Клус, С. А.** Напряженно-деформированное состояние полого толстостенного цилиндра при неравномерном нагреве и радиационном облучении / С. А. Клус, И. С. Куликов, А. В. Чигарев // *Инновации в машиностроении*. – Минск, 2008. – С. 218–224.
3. **Клус, С. А.** Численный анализ НДС тел цилиндрической геометрии с учетом тепловой и радиационной ползучести / С. А. Клус, И. С. Куликов // *Вестник БНТУ*. – 2009. – № 3. – С. 58–60.

Поступила 07.07.2009