

УДК 539.3
РЕШЕНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ПРИ
ТЕРМОРАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, В. М. ХВИСЕВИЧ

Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Брест, Беларусь

Рассматривается бесконечно длинный однородный сплошной цилиндр, который подвергается воздействию температурной нагрузки, радиационного распухания и внешнего давления. В связи со спецификой заданных нагрузок и с учетом физической и геометрической симметрии рассматривается осесимметричная задача теории упругости.

Дифференциальное уравнение равновесия имеет вид:

$$\sigma_r - \sigma_\theta + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0, \quad (1)$$

где σ_r, σ_θ – радиальное и касательное напряжение, r – переменный радиус.

Граничные условия задачи: $u_r = 0$ при $r=0$, $\sigma_r = -P$ при $r=R$, где P – внешнее давление, R – наружный радиус цилиндра.

Эмпирическая функция радиационного распухания принята согласно [1]:

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

где t – время, Φ – нейтронный поток, T – температурное поле как функция координаты:

$$T = T_s + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

где T_s – температура на наружной поверхности, q_v – объемное тепловыделение, λ – коэффициент теплопроводности материала.

При уравнениях обобщенного закона Гука и геометрических соотношениях Коши [1] получены компоненты напряжений рассматриваемой задачи, выраженные через перемещения:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left((1-\nu) \cdot \frac{du_r}{dr} + \nu \cdot \frac{u_r}{r} - (1+\nu) \cdot \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left((1-\nu) \cdot \frac{u_r}{r} + \nu \cdot \frac{du_r}{dr} - (1+\nu) \cdot \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right), \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1-2\nu)} \cdot \left(\frac{\nu}{1+\nu} \cdot \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{u_r}{r} \right) - \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (1) и (4) получено дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \left(\alpha \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{1}{3} \frac{dS}{dr} \right), \quad (5)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Общее решение, удовлетворяющее однородному уравнению:

$$\bar{u}_r = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}. \quad (6)$$

Для нахождения частного решения (5) применен принцип суперпозиции, т. е. рассматривалось решение отдельно от температурного нагружения и радиационного распухания. Для температурной части получено частное решение в виде:

$$u_{r1}^* = -\frac{1}{16} \cdot \frac{\alpha q_v}{\lambda} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot r^3. \quad (7)$$

Подобрать частное решение для радиационной задачи ввиду сложности функции радиационного распухания в аналитическом виде не удалось. Проведена аппроксимация функции S полиномом $y = A + Br + Cr^2 + Dr^3$. Определение постоянных A, B, C, D ввиду громоздкости математических вычислений проводилось с учетом характеристик для материала ОХ16Н15МЗБ [1]. Окончательно для фиксированного момента времени $t = 1000$ ч получена следующая зависимость аппроксимирующей функции от радиуса: $y = 0,002267 + 0,005185r + 75,309r^2 + 7316r^3$. С учетом того, что для данного материала $u_{r1}^* = -39,54379r^3$, окончательное решение (5) с учетом граничных условий имеет вид:

$$u_r = 0,02255126r + 0,00172833r^2 - 20,71654r^3 + 1463,2r^4. \quad (8)$$

Получены значения компонент напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ и деформаций $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ в зависимости от координаты. Исследована их зависимость от времени облучения и свойств материала. Анализ полученных результатов показывает, что с течением времени влияние радиационного воздействия на радиальные напряжения значительно возрастает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, И. С.** Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов // И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин. – Минск, 1984.
2. **Хвисевич, В. М.** Исследование напряженно-деформированного состояния сплошного цилиндра при температурном, механическом и радиационном нагружении / В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 25–28.