

УДК 624.04+624.07 : 519.63

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

¹Курачев Р.М., ²Чепурненко А.С., ²Литвинов С.В.¹ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала,
e-mail: kurachev.rasul@mail.ru;²ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», Ростов-на-Дону,
e-mail: litvstep@gmail.com

Рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния железобетонного корпуса высокого давления (КВД). Такие конструкции используются в ядерной энергетике и совмещают в себе функции биологической защиты, воспринимая действие внутреннего давления, температуры и радиации. В результате воздействия на конструкцию физических полей в ней возникают вынужденные температурные и радиационные деформации. Кроме того, поток нейтронов и высокая температура приводят к изменению физико-механических характеристик материала корпуса. В данной работе исследуется влияние косвенной неоднородности материала на напряженно-деформированное состояние конструкции. Решение выполняется в осесимметричной постановке при помощи метода конечных элементов (МКЭ). Также для средней части стенки корпуса приводится сравнение результатов, полученных на основе МКЭ, с решением плоской осесимметричной задачи методом конечных разностей.

Ключевые слова: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, температура, радиация, флюенс нейтронов, неоднородность

MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF THE PRESSURE VESSEL TAKING INTO ACCOUNT EFFECTS OF PHYSICAL FIELDS

¹Kurachev R.M., ²Chepurnenko A.S., ²Litvinov S.V.¹FGBOU VO «Dagestan State Technical University», Makhachkala, e-mail: kurachev.rasul@mail.ru;²FGBOU VPO «Rostov State University of Civil Engineering», Rostov-on-Don, e-mail: litvstep@gmail.com

We consider the problem of determining the stress strain state of reinforced concrete pressure vessel. Such structures are used in nuclear power and combine the functions of biological protection, sensing internal pressure, temperature and radiation. The impact of physical fields causes in structure forced temperature and radiation deformations. In addition, the neutron flux and high temperature lead to a change in the physical and mechanical characteristics of the material. In this paper, we investigate the impact of indirect material inhomogeneity on the stress-strain state of the structure. The solution is performed in axisymmetric formulation using the finite element method (FEM). Also for the middle part of the wall of vessel we compare results obtained by the finite element method with the solution of the flat axially symmetric problem by finite difference method.

Keywords: finite element method, the stress-strain state, temperature, radiation, neutron flux, heterogeneity

В настоящее время, как показывает опыт европейских стран, перспективным направлением развития атомной энергетики являются АЭС на базе газовых реакторов, выполненных из предварительно напряженного железобетона [6]. При этом сам корпус, как правило, имеющий цилиндрическую или сферическую форму, воспринимает как внутреннее давление, так и температурные и радиационные воздействия, совмещая таким образом в себе функции биологической защиты. По сравнению с металлическими, железобетонные КВД характеризуются повышенной надежностью, однако технология их изготовления весьма сложна и требует для создания предварительных напряжений применения домкратов с усилием более 1000 тонн.

В настоящей работе рассматривается методика определения напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов

высокого давления с учетом силовых, температурных и радиационных воздействий на примере сферического КВД. Такие конструкции обладают исключительно высокими показателями трещиностойкости и пределами упругой работы. Напряженно-деформированное состояние сферических КВД характеризуется большей однородностью по сравнению с цилиндрическими аналогами [6]. Все это обуславливает повышенную надежность и безопасность. Расчетная схема сферического КВД приведена на рис. 1.

Физико-механические характеристики материала корпуса являются функциями от температуры T , а также флюенса (интегрального потока) нейтронов, поэтому определению НДС корпуса предшествует расчет распределения температурного поля и флюенса нейтронов Φ . Температурное поле определяется из уравнения теплопроводности Фурье:

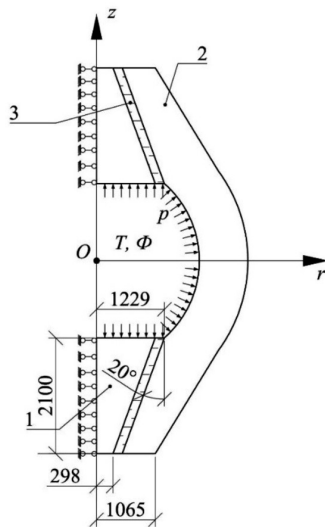


Рис. 1. Расчетная схема сферического КВД:
1 – торцевые элементы; 2 – стенка;
3 – слои, моделирующие шпонки

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = -W(r, z), \quad (1)$$

где $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; $W(r, z)$ – плотность внутренних источников тепловыделений.

$$k_T(T) = \begin{cases} 1, T \leq 50^\circ\text{C}; \\ -0,0533 \left(\frac{T}{100} \right)^3 + 0,3301 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 0,7994 \frac{T}{100} + 1,322, & 50^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (4)$$

Коэффициент k_ϕ вычисляется следующим образом [3]:

$$k_\phi = \begin{cases} 1, \Phi \leq \Phi^*; \\ \gamma_1 - \alpha_1 \lg(\beta_1 \Phi), \Phi > \Phi^* \end{cases} \quad (5)$$

где $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – эмпирические параметры, зависящие от класса бетона и его состава; Φ^* – пороговое значение флюенса, определяемое из условия:

$$\lg(\beta_1 \Phi^*) = \frac{\gamma_1 - 1}{\alpha_1}. \quad (6)$$

Радиационные деформации определяются следующим образом:

$$\varepsilon_p = \frac{\alpha \varepsilon_{\max} [\exp(\beta \Phi) - 1]}{\varepsilon_{\max} + \alpha \exp(\beta \Phi)}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\max}$ – максимальная радиационная деформация, зависящая от состава бетона; Φ – флюенс (интегральный поток) нейтронов; α и β – эмпирические константы, зависящие от энергетического спектра нейтронов и вида заполнителя.

Для определения флюенса нейтронов используется диффузионное приближение:

$$\nabla^2 \Phi - \Phi/L^2 = 0, \quad (2)$$

где L – длина диффузии; ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа.

Целью исследования является изучение влияния косвенной (наведенной) неоднородности материала на напряженно-деформированное состояние корпуса высокого давления.

Материалы и методы исследования

Уравнения (1) и (2) решаются при помощи МКЭ. Методика определения температурного поля с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры приводится в работе [1]. Зная распределение температуры и флюенса нейтронов, можно определить, как изменяется модуль упругости бетона в толще конструкции. Зависимость $E(T, \Phi)$ можно записать в виде

$$E(T, \Phi) = E_0 \cdot k_T(T) \cdot k_\phi(\Phi), \quad (3)$$

где E_0 – модуль упругости необлученного бетона при нормальной температуре; k_T – коэффициент влияния температуры; k_ϕ – коэффициент влияния радиационного облучения.

Данные по температурной зависимости модуля упругости бетона имеются в нормативной литературе [5]. Для жаростойких бетонов на портландцементе с андезитовыми, диоритовыми, базальтовыми или диабазовыми заполнителями (состав № 2 по табл. 5.1 [5]) аппроксимирующая функция $k_T(T)$ имеет вид

Задача решается в осесимметричной постановке. Связь между напряжениями и деформациями с учетом вынужденных деформаций имеет вид

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_b\}), \quad (8)$$

где $[D]$ – матрица упругих характеристик; $\{\sigma\} = \{\sigma_r, \sigma_z, \sigma_{\theta}, \tau_{rz}\}$ – вектор напряжений; $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_{\theta}, \gamma_{rz}\}$ – вектор полных деформаций; $\{\varepsilon_b\} = (\varepsilon_T + \varepsilon_p) \{1, 1, 1, 0\}$ – вектор вынужденных деформаций.

Для изотропного материала матрица $[D]$ имеет вид

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Согласно вариационному принципу Лагранжа, решение уравнений теории упругости соответствует минимуму функционала полной энергии системы [4]:

$$I(u, w) = W(u, w) - \int_V (Ru + Zw) dV - \int_A (\bar{R}u + \bar{Z}w) dA, \quad (10)$$

где R, Z – объемные силы; $\bar{R}, \bar{Z}$ – поверхностные нагрузки; $W(u, w)$ – потенциальная энергия деформации, которая вычисляется следующим образом:

$$W = \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon^{el}\} dV, \quad (11)$$

где $\{\varepsilon^{el}\}$ – вектор упругих деформаций, представляющих разность между полными деформациями и вынужденными деформациями:

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon_b\}. \quad (12)$$

Связь между полными деформациями и перемещениями имеет вид:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \varepsilon_\theta = \frac{u}{r};$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}. \quad (13)$$

Поле перемещений аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2k-1} \\ U_{2k} \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

где N_p, N_r, N_k – функции формы; U_{2m-1} и U_{2m} – соответственно перемещения узла с номером m по r и z .

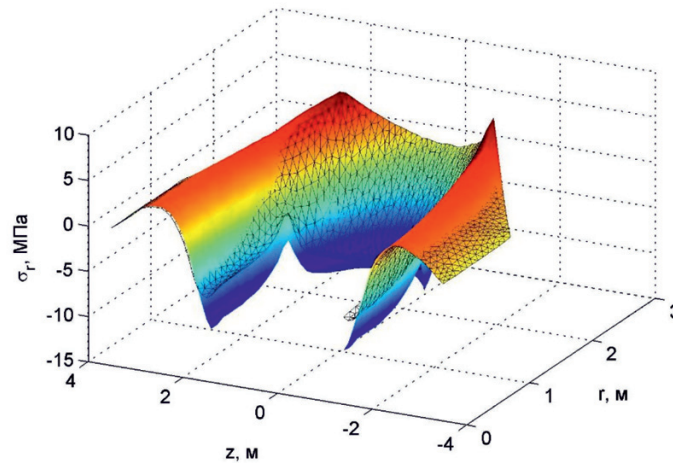


Рис. 2. Распределение напряжений σ_r

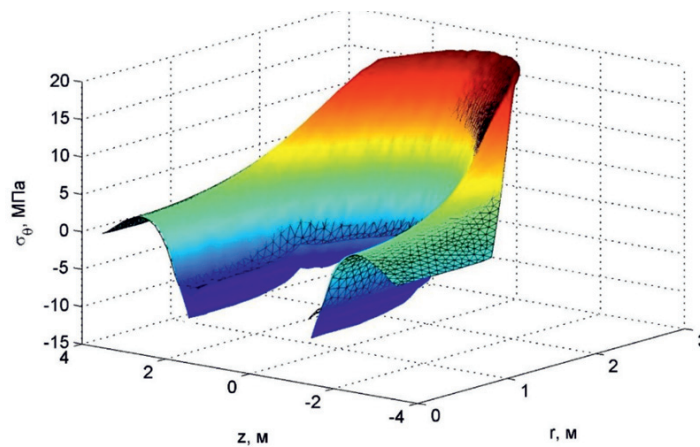


Рис. 3. Распределение напряжений σ_θ

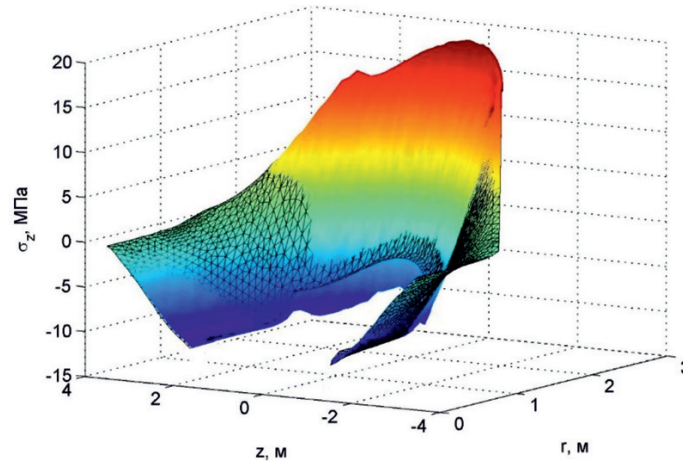


Рис. 4. Распределение напряжений σ_z

$$N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i r + c_i z), \quad (15)$$

где A – площадь элемента; $a_i = r_j z_k - r_k z_j$; $b_i = z_j - z_k$; $c_i = r_k - r_j$.

Выражения для функций N_j и N_k , а также коэффициентов $a_j, b_j, c_j, a_k, b_k, c_k$ можно получить циклической заменой индексов.

В результате минимизации полной энергии, задача сводится к системе линейных уравнений:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (15)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости; $\{F\}$ – глобальный вектор нагрузки; $\{U\}$ – вектор узловых перемещений.

Расчет корпуса высокого давления выполнялся при следующих исходных данных: $E_0 = 3 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,2$, внутреннее давление $p_a = 10$ МПа, температура у внутренней поверхности корпуса $T_a = 100$ °С, температура у внешней поверхности $T_b = 20$ °С, флюенс нейтронов у внутренней поверхности $\Phi_a = 4 \cdot 10^{24}$ нейтрон/м², у внешней поверхности $\Phi_b = 0$, длина диффузии $L = 0,16$ м, коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 9,1 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,51$ Вт/(м·К).

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2–4 представлены соответственно графики распределения в зависимости от r и z напряжений $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$. Закрашенным поверхностям соответствует решение для однородного материала, а сетчатым поверхностям – для неоднородного.

Из представленных графиков видно, что учет неоднородности материала приводит к существенному снижению напряжений у внутренней поверхности корпуса за счет уменьшения модуля упругости в результате температурных и радиационных воздействий. Касательные напряжения при

учете неоднородности практически не изменились.

Средняя часть стенки сферического КВД находится в условиях центрально-симметричной задачи теории упругости. При наличии центральной симметрии задача сводится к дифференциальному уравнению второго порядка относительно радиальных напряжений [2]:

$$\sigma_r'' + \left(\frac{4}{r} - \frac{E'}{E} \right) \sigma_r' - \left[-\frac{2}{r} \cdot \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \frac{E'}{E} \sigma_r - \frac{2E\varepsilon_b'}{r(1-\nu)} \right] = 0, \quad (14)$$

Штрихом в уравнении (14) обозначена производная по радиусу.

Граничные условия для данного уравнения имеют вид

$$\sigma_r(a) = -p_a; \quad \sigma_r(b) = -p_b, \quad (15)$$

где a и b – соответственно внутренний и внешний радиус сферы; p_a и p_b – внутреннее и внешнее давление.

Напряжения σ_θ можно определить из уравнения равновесия:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \frac{1}{2} r \sigma_r'. \quad (16)$$

Уравнение (14) было решено методом конечных разностей (МКР). На рис. 5 сплошной линии соответствует распределение напряжений σ_θ в средней части стенки КВД, полученное при помощи МКР, а штриховой – при помощи МКЭ. Результаты практически совпадают, что свидетельствует о их достоверности.

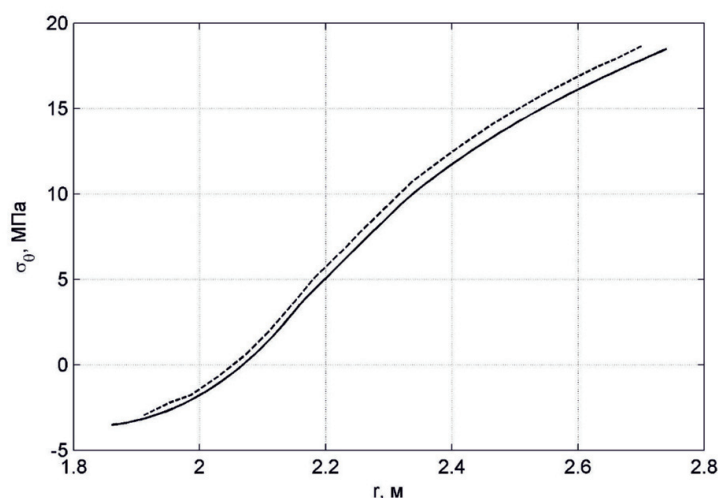


Рис. 5. Распределение напряжений σ_θ в средней части стенки КВД: сплошная линия – решение при помощи МКР, а штриховая – при помощи МКЭ

Выводы

Рассмотренный пример расчёта показывает, что анализ влияния неоднородности материала на напряженно-деформированное состояние конструкции должен проводиться комплексно и учитывать все возможные факторы. Из представленных результатов следует, что как растягивающие, так и сжимающие напряжения по абсолютной величине значительно превышают расчетные сопротивления бетона. Данное обстоятельство следует учитывать при назначении схем армирования конструкций.

Список литературы

1. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для ра-

диационно-теплого экрана реактора АЭС // Инженерный вестник Дона: электронный журнал. – 2015. – № 4; URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421>.

2. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: монография. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 288 с.

3. Козельский Ю.Ф. Изменение деформационных свойств защитных железобетонных конструкций под влиянием физических полей: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2013. – 155 с.

4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 329 с.

5. СП 27.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84. – М., 2011. – 121 с.

6. Юй Хуэй. Напряженно-деформированное состояние толстостенных цилиндрических и сферических сосудов для ядерных реакторов при действии внутреннего давления и температуры // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6(35). – С. 23–27.