

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ЧЕХЛА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ (ТВС) ЯДЕРНОГО РАКТОРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ANSYS 12

Куликов И.С., Коваль Ю.Г., Томило Е.В.

The definition of the stress-strain condition of a fuel elements assemblies hexagonal shell of a nuclear reactor is presented.

Advantage of the decision of the combined temperature-deformation problem with use of software package ANSYS 12 that has allowed to simplify the solution of problem of stress-strain of the hexagonal shell subjected to non-uniform heating and loaded with external allocated pressure is shown.

Для обеспечения энергетической безопасности в Республике Беларусь планируется строительство атомной электростанции мощностью около 2,4 тыс. МВт. Ввод первого энергоблока запланирован на 2016 год, второго – на 2018-й. Для строительства выбран проект реактора Санкт-Петербургского «Атомэнергопроекта».

При разработке проекта строительства АЭС применяется компьютерная высокопроизводительная техника и современное программное обеспечение, что позволяет ученым решать комплекс задач по научному сопровождению строительства атомной электростанции, в том числе по созданию и внедрению инноваций для повышения ядерной, радиационной и экологической безопасности станции. Возможности пакетов программ можно применять также для разработки методов контроля качества оборудования, совершенствования технологий обращения с радиоактивными отходами, анализа и моделирования процессов использования оборудования АЭС на всех жизненных циклах.

В данной работе рассмотрен вариант расчета чехла тепловыделяющей сборки ядерного реактора нагруженного внешним распределенным давлением и подвергнутого неравномерному нагреву. Размеры чехла: высота 1500 мм, ширина ребра 60 мм, толщина стенки 2 мм. Температура внутри чехла 530°C, по наружной поверхности 500°C.

Чехол ТВС представляет собой шестигранную оболочку с днищем. Расчёт можно проводить, рассматривая отдельно грани и решая задачу для закреплённой по трём кромкам пластины, четвёртая кромка которой свободна (рис. 1). Закрепление осуществлено по кромкам $y=0$ и $x=\pm a/2$, кромка $y=b$ оставлена свободной. Под равномерно распределённой нагрузкой интенсивностью q пластина испытывает прогиб w , эквивалентный результату наложения трёх прогибов [1]:

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

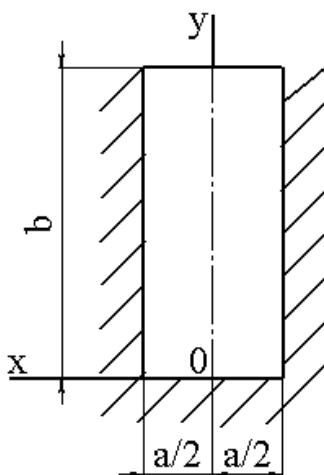


Рис. 1. Пластина, закреплённая по трём кромкам

Первый из них
$$w_1 = \frac{4qa^4}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \cos \frac{m\pi x}{a},$$

Второй
$$w_2 = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \gamma_m (-1)^{(m-2)/2} \cos \frac{m\pi x}{a}, \quad (1)$$

Третий
$$w_3 = \frac{qa^4}{D} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(F_n \gamma_n ch \frac{n\pi x}{2b} - F_n \frac{n\pi x}{2b} sh \frac{n\pi x}{2b} \right) \sin \frac{n\pi y}{2b} +$$

$$+ \frac{qa^4}{D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(G_m sh \frac{m\pi y}{a} + H_m \frac{m\pi y}{a} ch \frac{m\pi y}{a} + I_m \frac{m\pi y}{a} sh \frac{m\pi y}{a} \right) \cos \frac{m\pi x}{a}.$$

Также учтём:
$$D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -M,$$

где $\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = D$; $\gamma_n = \frac{n\pi a}{4b}$; F_n, \dots – постоянные, h – толщина пластины, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Поскольку пластина закреплена по трём кромкам ($y=0, x=\pm a/2$), граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} w_3 &= 0; \\ \left(\frac{\partial^2 w_3}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w_3}{\partial x^2} \right)_{y=b} &= 0; \\ \left(\frac{\partial^2 w_3}{\partial y^2} + (2-\mu) \frac{\partial^2 w_3}{\partial x \partial y} \right)_{y=b} &= 0; \quad \left(\frac{\delta w_3}{\delta y} \right)_{y=0} = 0; \\ \left(\frac{\delta(w_1 + w_2 + w_3)}{\delta x} \right)_{x=\pm a/2} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Далее рассмотрим температурное воздействие на данную пластину. Рассмотрим изменение температуры по толщине пластины h . Определение нестационарного температурного поля при постоянных теплофизических характеристиках сводится к решению уравнения [2]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3)$$

Решение уравнения должно удовлетворять следующим начальным и граничным условиям:

$$T = T_0 \text{ при } t = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta n} &= -\frac{a_0}{\lambda_T} (T - v_0) \text{ на контуре пластины,} \\ \frac{\delta T}{\delta z} &= -\frac{a_3}{\lambda_T} (T - v_3) \quad z = \frac{h}{2}, \\ \frac{\delta T}{\delta z} &= -\frac{a_4}{\lambda_T} (T - v_4) \quad z = -\frac{h}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь T – температура пластины; T_0 – начальная температура пластины; v_0, v_3, v_4 – температуры среды соответственно на контуре пластины и на её поверхностях; a_0, a_3, a_4 – коэффициенты теплоотдачи соответственно на контуре пластины и на её поверхностях; λ_T и a – коэффициенты теплопроводности и температуропро-

водности материала пластины; соответственно n – внешняя нормаль на контуре пластины. Решение уравнения (3) может быть получено численно, например методом конечных разностей.

Приведенный способ расчёта с использованием зависимостей (1)-(4) является крайне громоздким, трудоёмким и сложным в использовании, также практически не позволяет учитывать в расчетах такие факторы, как радиационное распухание и пол-

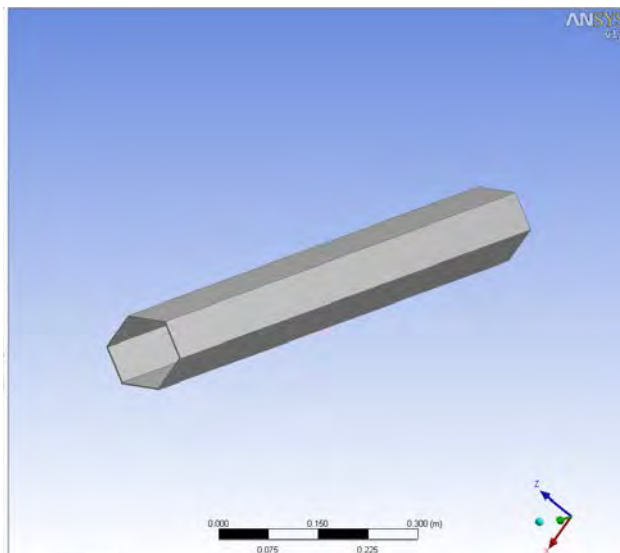


Рис. 2. Твёрдая модель чехла ТВС ядерного реактора

зучесть.

По этой причине был выбран метод конечных элементов, реализованный в программном пакете ANSYS 12. Он позволяет быстро, наглядно и достаточно точно произвести данный расчёт для всего чехла целиком.

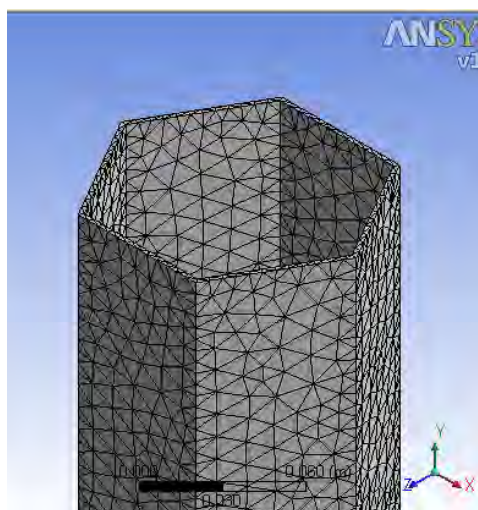


Рис. 3. Сеточная модель чехла ТВС ядерного реактора

В первую очередь следует построение модели в SolidWorks с учётом параметров $a=60$ мм, $b=1500$ мм, $h=2$ мм. За модель чехла взята шестигранная оболочка с днищем. Далее построенная модель импортируется в ANSYS 12 (рис. 2), с последующим заданием свойств материала: нержавеющая сталь с модулем упругости $2 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона 0,3. Модель разбивается 462422 элемента, количество узлов 152783 (рис. 3). Непосредственное решение задачи проходит с использованием двух модулей. Steady-State Thermal (ANSYS), где производится расчет неравно-

мерного нагрева чехла. Чехол подвергают нагреву 500°C по внешней поверхности (рис. 4а) и 530°C по внутренней (рис. 4б). Результат неравномерного нагрева импортируется в модуль Static Structural (ANSYS), где производится нагружение модели внешней распределенной нагрузкой 0.8 МПа (рис. 5а) и задаются условия перемещения. Учтена сила тяжести чехла, и налагаются ограничения на перемещения дна вдоль оси y .

Распределение температуры и вызванные этим деформации представлены на рис. 5b и 6а соответственно.

Анализируя полученное решение, можно утверждать, что наибольшие перемещения наблюдаются на вершине чехла, а наибольшие напряжения около граней чехла.

После задания нагрузки, равной 0.8 МПа , на внешней поверхности чехла тепловыделяющей сборки, интенсивность деформаций не сильно изменила свое значение и распределение, однако максимальная интенсивность напряжения увеличилась с 63 МПа (рис. 5b) до 152 МПа (рис. 6).

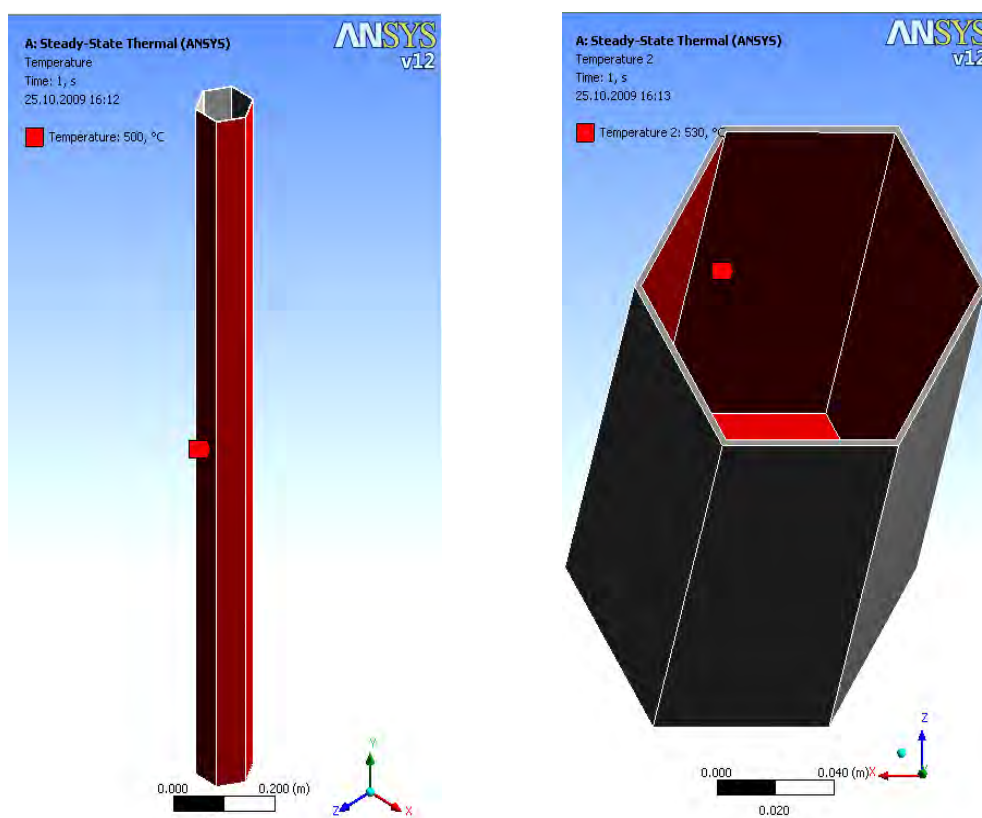


Рис. 4. Температура (а) внутренняя (б) внешняя

Распределение интенсивности напряжений и их максимальное значение представлены на рис. 7. Из этих данных следует, что максимальные значения возникли на внутренних гранях чехла тепловыделяющей сборки.

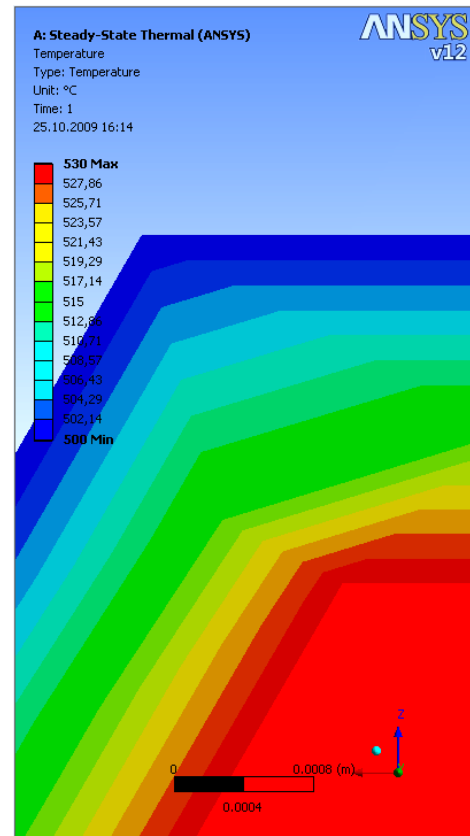
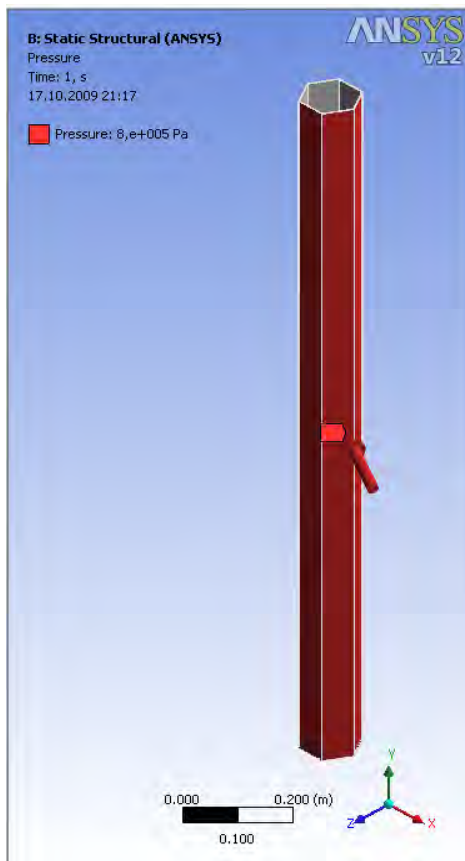


Рис. 5. Нагрузка (а) распределение температуры (b)

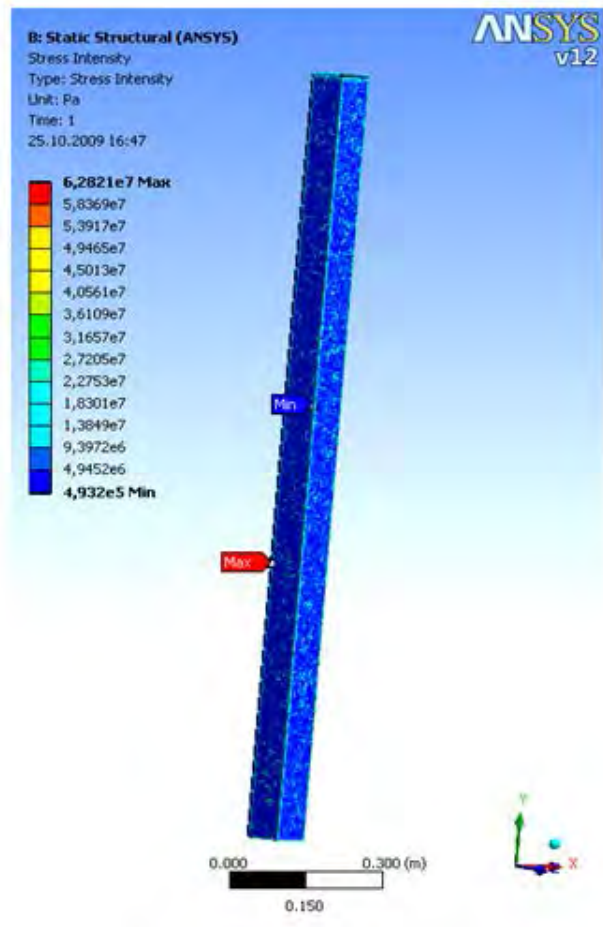
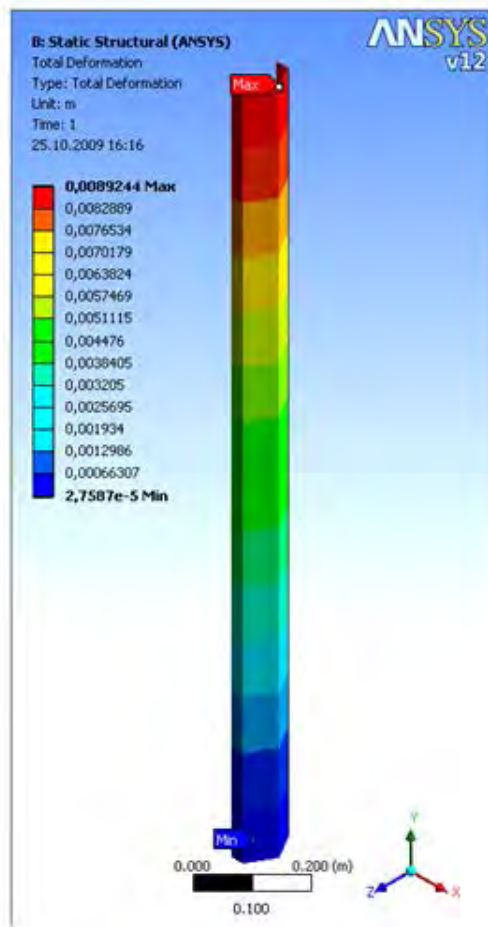


Рис. 6. Распределение интенсивности деформации (а) и напряжений (b) в модели чехла ТВС

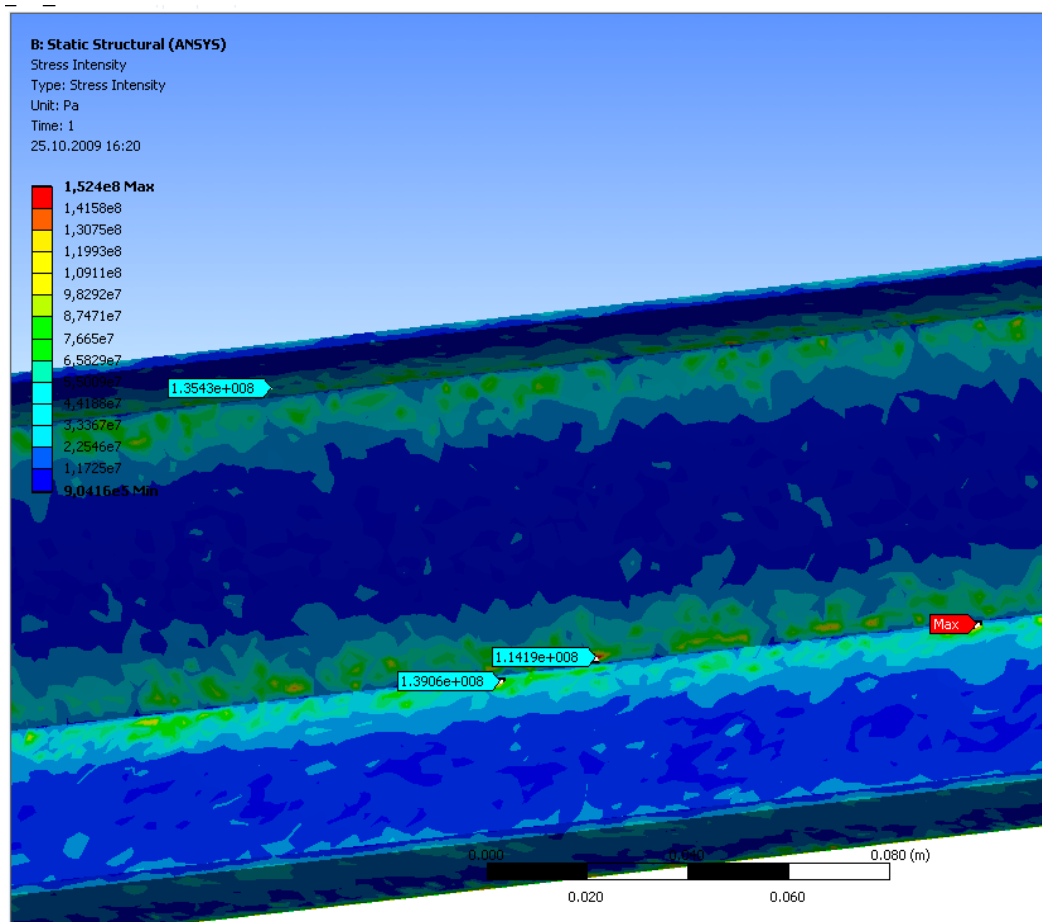


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений

Из рисунка 7 можно также заключить, что при линейном распределении температуры по толщине стенки чехла и избыточном внешнем давлении 0,8 МПа максимальные напряжения достигают величины 152 МПа при пределе тугоучести материала чехла 200 МПа, что можно считать предельным состоянием.

В проведенных расчетах не учитывались такие факторы как радиационная ползучесть, вызванная воздействием быстрых нейтронов с энергией $E > 0,1$ МэВ и радиационное распухание материала чехла (объемное изменение материала под воздействием быстрых нейтронов, зависящее от температуры). В дальнейшем, учитывая длительность работы чехла в условиях ядерного реактора (8000-16000 часов), радиационную ползучесть и радиационное распухание необходимо учесть, адаптировав программный комплекс ANSYS 12 для этой цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М: Наука, 1966. – 636 с.
2. Коваленко А.Д. Введение в термоупругость. – Киев: Наукова думка, 1965. – 204 с.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М: Машиностроение, 2004. – 506 с.