

ВЕРИФИКАЦИЯ БЛОКОВ УЧЕТА ЭФФЕКТОВ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ И РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРОВ ТИПА БН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ANSYS»

А. В. Рябцов, С. А. Исхаков, В. А. Замятин, В. Б. Кайдалов

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Требования к повышению безопасности реакторных установок и увеличение периода эксплуатации топлива ведут к необходимости лучшего понимания физических механизмов явлений, проявляющихся в чехлах тепло выделяющих сборок (ТВС) из-за размерной неустойчивости конструктивных материалов под действием нейтронного облучения, температуры и давления.

Из эффектов, вызванных облучением, следует выделить радиационное распухание (РР) и радиационную ползучесть (РП), причем радиационная ползучесть материала может проявиться в области низких температур, при которых тепловая ползучесть не наблюдается. Под действием этих эффектов происходит формоизменение ТВС (увеличение длины и поперечных размеров), а неравномерное распухание и температурное расширение материалов вызывает изгиб ТВС.

В настоящей работе приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния чехла ТВС с учетом эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести с использованием программного комплекса (ПК) «ANSYS» [1].

В качестве штатного материала чехлов ТВС активных зон реакторов на быстрых нейтронах (РБН) принята ферритно-мартенситная сталь ЭП-450, характеристики радиационного распухания и радиационной ползучести которой позволяют достичь высоких повреждающих доз облучения ~140 сна (выгорания топлива ~19 % т. а.) [2].

Для анализа радиационного формоизменения ТВС в ПК «ANSYS» разработаны блоки учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести материала.

Радиационная ползучесть

Результаты внутриреакторных испытаний, а также имитационные эксперименты на ускорителях показали линейную зависимость РП от напряжений в широком интервале температур, вплоть до напряжений, равных пределу текучести материала [3]. В большинстве экспериментальных работ отмечается линейная зависимость РП от повреждающей дозы [4, 5].

Скорость деформации от радиационной ползучести записывается в виде

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^c = \sigma_{eq} \cdot B \cdot \Phi, \quad (1)$$

где B – модуль радиационной ползучести; σ_{eq} – эквивалентные напряжения (по Мизесу), МПа; Φ – флюкс нейтронов.

Деформация шестигранного чехла за период одной кампании

$$\varepsilon_{eq}^c = \int_0^{\tau_k} \dot{\varepsilon}_{eq}^c \cdot d\tau, \quad (2)$$

где τ_k – длительность кампании; $\dot{\varepsilon}_{eq}^c$ – скорость изменения размера «под ключ».

При этом деформация ТВС вызванная термической ползучестью незначительна (не более 0,1 %), поэтому в расчетах не учитывается.

Формоизменение чехла ТВС от радиационной ползучести показано на рис. 1.

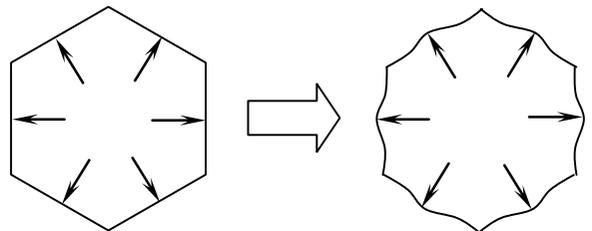


Рис. 1. Формоизменение чехла ТВС от радиационной ползучести

Радиационное распухание

Радиационное распухание конструктивных материалов ТВС становится заметным лишь при достаточно больших радиационных повреждениях $kt > 5$ сна.

Радиационное распухание ферритно-мартенситной стали ЭП-450 описывается зависимостью [6]

$$\Delta V/V(\%) = 0,0131 kt; \quad (3)$$

где kt – радиационные повреждения за кампанию, сна.

Изменение размера «под ключ» чехла ТВС от радиационного распухания показано на рис. 2.

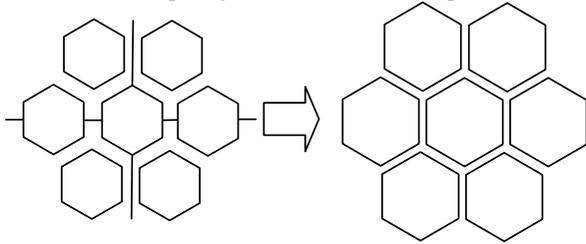


Рис. 2. Формоизменение чехла ТВС от радиационного распухания

Верификация разработанного блока учета радиационного распухания в ПК «ANSYS» проводилась при постоянном флюенсе нейтронов с учётом температурного воздействия. В качестве расчетной модели рассматривалась трехмерная конечно-элементная модель половины чехла ТВС РБН (рис. 3).

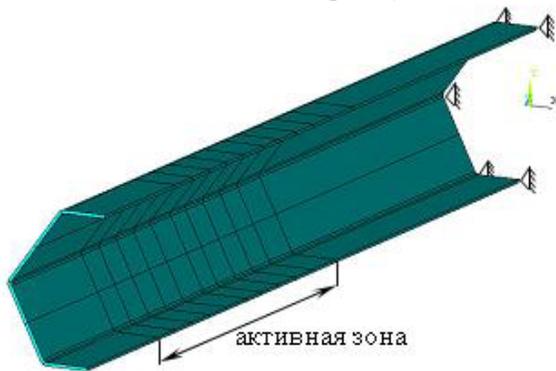


Рис. 3. Расчетная модель ТВС

Выбор типа конечного-элемента (Solid45) производился исходя из условий применения в модели эффекта радиационного распухания (swelling) и радиационной ползучести (creep) [7].

Нижний конец чехла ТВС жестко заделан в месте установки в напорный коллектор.

Плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии.

Оценка радиационного распухания осуществлялась последовательно в два этапа.

На первом этапе определялась деформация чехла, вызванная изменением температуры от 250 °С до 450 °С, а на втором этапе учитывался рост флюенса нейтронов до значения $F = 1,9 \cdot 10^{23}$ н/см² при неизменной температуре.

Процесс тестирования блока радиационной ползучести для ПК «ANSYS» проводился на той же модели, что и тестирование радиационного распухания с учётом температурных воздействий. Исключение составляло давление, приложенное к торцу чехла ТВС. Это давление введено искусственно для тестового примера с целью определения вклада радиационной ползучести в общее деформированное состояние ТВС и прикладывалось на первом этапе нагружения совместно с температурой.

Результаты решения задачи по определению деформации шестигранного чехла ТВС, вызванной радиационным распуханием и радиационной ползучестью, с использованием ПК «ANSYS» приведены на рис. 4–5.

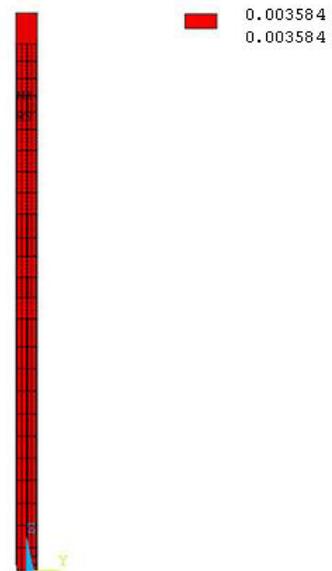


Рис. 4. Деформация, вызванная радиационным распуханием шестигранного чехла ТВС

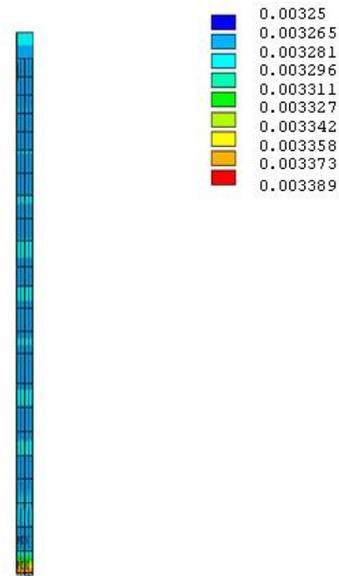


Рис. 5. Деформация, вызванная радиационной ползучестью шестигранного чехла ТВС

Результаты расчетов показали, что деформация в наиболее удаленном сечении от заделки, обусловленная радиационным распуханием, равна $\varepsilon_{sw} = 0,003584$, а деформация вызванная радиационной ползучестью составляет $\varepsilon_{eq}^c = 0,003285$. Отличие полученных результатов от решений, полученных по зависимостям (2)–(3) не превышает 0,2 %.

Оценка искривления ТВС в результате радиационного распухания

Вследствие особенности физики реакторов на быстрых нейтронах наблюдаются неравномерные радиационные повреждения конструкционных материалов по радиусу и по высоте активной зоны.

Из-за радиального изменения флюенса в активной зоне возникает значительный градиент РР по периметру чехла. Часть чехла ТВС, обращенная к центру активной зоны, расширяется больше, вызывая искривление сборки с выпуклостью в сторону центра. Согласно экспериментальным исследованиям изгибная жесткость ТВС определяется жесткостью шестигранного чехла. Влияние пучка твэл на изгибную жесткость ТВС незначительно.

В программе «ЗОНА-М» реализована методика, позволяющая оценить искривление ТВС от РР, которая базируется на аналогии распухания с действием объемных и поверхностных сил.

Для сравнения результатов полученных по программе «ЗОНА-М» и ПК «ANSYS» рассматривалась ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 в которой повреждающая доза ближней и дальней грани составляла соответственно 62,2 сна и 41,8 сна.

В качестве расчетной модели, используемой в ПК «ANSYS», принималась трехмерная конечно-элементная модель половины шестигранного чехла ТВС РБН. На чехол воздействует флюенс нейтронов с энергией $E > 0,1$ МэВ изменяющийся по высоте и по периметру. Основание жестко заделано, плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии (рис. 6).

Результаты расчета стрелы прогиба ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 с помощью программы «ЗОНА-М» для центральной плоскости активной зоны и сравнение с результатами полученным в ПК «ANSYS» представлены в табл. 1 и на рис. 7–8.

Таблица 1

Параметр	Зона-М	ANSYS	Отличие результатов
Стрела прогиба, мм	2,049	2,48	21 %
Отклонение головки ТВС, мм	4,581	4,541	1 %

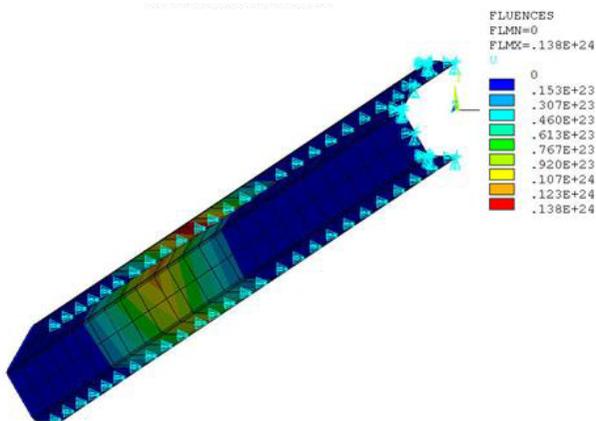


Рис. 6. Расчетная схема ТВС

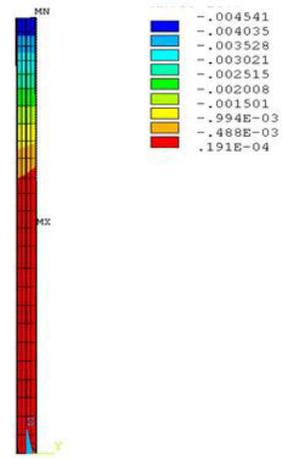


Рис. 7. Перемещение шестигранного чехла по сечению (вдоль оси Y), м

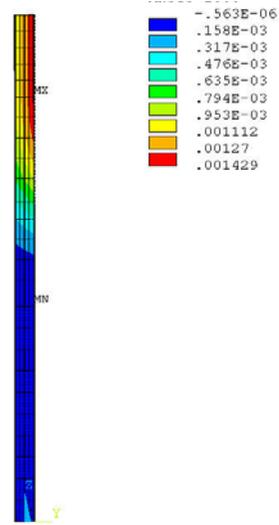


Рис. 8. Перемещение шестигранного чехла по высоте (вдоль оси Z), м

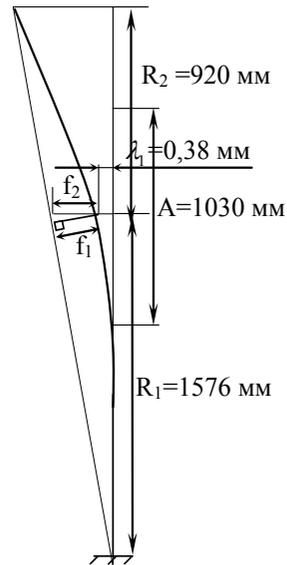


Рис. 9. Перемещение шестигранного чехла по сечению (вдоль оси Y) на уровне середины высоты активной зоны, м

Используя результаты отклонения оси шестигранного чехла ТВС на уровне центра активной зоны и уровне платиков (рис. 7) и принимая во внимание малые отклонения чехла от вертикальной оси (величины f_1 и f_2 практически совпадают), прогиб на уровне середины высоты топливной части составляет 2,48 мм (рис. 9).

Для проверки результатов решения определяет прогиб любого сечения ТВС аналитически.

Суммарное отклонение головки ТВС на уровне платиков составляет

$$\begin{aligned} \sum \lambda = & \int_{R_1 - \frac{A}{2}}^{R_1} \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot (z)^2}{\frac{A}{2} \cdot S} dz + \\ & + \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(\frac{A}{2}\right)^2}{\frac{A}{2} \cdot S} + \int_{R_1}^{R_1 + \frac{A}{2}} \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(2 \cdot \frac{A}{2} \cdot z - z^2\right)}{\frac{A}{2} \cdot S} dz + \\ & + \frac{\Delta \epsilon_{sw} \cdot \left(2 \cdot \frac{A}{2} \cdot \frac{A}{2} - \left(\frac{A}{2}\right)^2\right)}{\frac{A}{2} \cdot S}. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4) и подставив численные значения получаем, что суммарное отклонение головки ТВС на уровне платиков $\sum \lambda = 4,61$ мм, а отклонение ТВС на уровне центра активной зоны $\lambda_1 = 0,43$ мм.

Таким образом, отличие значения суммарного отклонения головки ТВС на уровне платиков определенного аналитически, от величин полученных с помощью ПК «ANSYS» и «ЗОНА-М» не более 2 %.

Используя аналитические результаты отклонения оси шестигранного чехла ТВС на уровне центра активной зоны и уровне платиков, прогиб на уровне середины высоты топливной части составляет 2,4808 мм. Это значение совпадает с результатом, полученным с помощью ПК «ANSYS» и отличается от величины определенной по программе «ЗОНА-М» на ~18 %.

Сравнение результатов расчета напряженно-деформированного состояния и радиационного формоизменения ТВС РБН по ПК «ANSYS» и верифицированной программе «ЗОНА-М»

Для сравнения результатов полученных по программе «ЗОНА-М» и ПК «ANSYS» рассматривалась ТВС зоны большого обогащения реактора БН-600 в которой значение повреждающих доз ближней и дальней грани одинаково и равно 82 сна.

Для определения формоизменения шестигранного чехла ТВС РБН с помощью ПК «ANSYS» использовалась 1/4 часть трехмерной конечно-элементной модели (рис. 10).

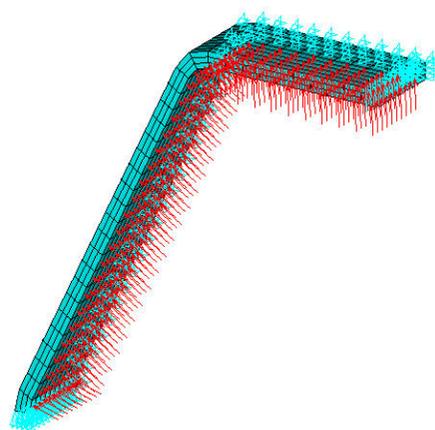


Рис. 10. Расчетная модель ТВС

Основание свободно оперто, плоскость деления ТВС является плоскостью симметрии. Нагружение состоит из двух этапов аналогично тестовым примерам.

Результаты расчетов прогибов середины грани шестигранного чехла от давления, радиационного набухания и радиационной ползучести приведены на рис. 11–14 и в табл. 2.

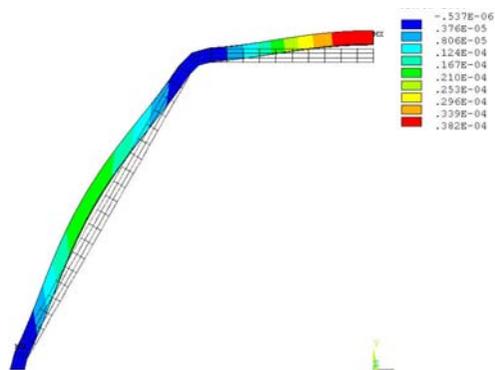


Рис. 11. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, м



Рис. 12. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления и изменения температуры

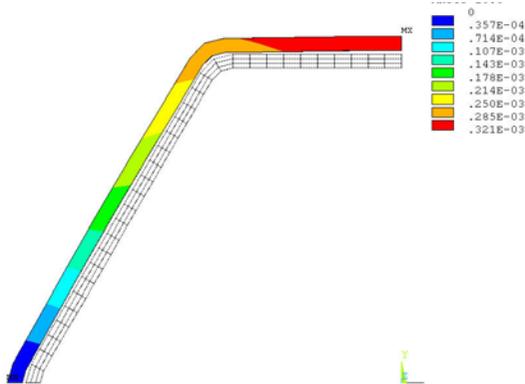


Рис. 13. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, изменения температуры с 250 °С до 450 °С и РР, м

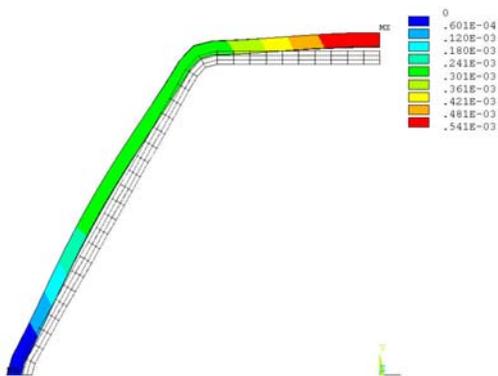


Рис. 14. Прогиб грани шестигранного чехла ТВС РБН от внутреннего давления, изменения температуры с 250 °С до 450 °С, РР и РП, м

Таблица 2

Параметр	Зона-М	ANSYS	Отличие результатов
Изменение размера «под ключ» от радиационного распухания, мм	0,328	$0,171 \cdot 2 = 0,342$	4 %
Изменение размера «под ключ» от радиационной ползучести и внутреннего давления, мм	0,496	$0,253 \cdot 2 = 0,506$	2 %
Суммарное изменение размера «под ключ», мм	0,823	0,848	3 %

Для корректного сравнения результатов расчета прогибов середины грани шестигранного чехла, из значений полученных по ПК «ANSYS», исключено влияние температуры, так как программа «ЗОНА-М» температурную деформацию не учитывает. Величины прогибов полученных с помощью ПК «ANSYS» отличаются от прогибов полученных с помощью программы «ЗОНА-М» незначительно (~4 %).

Прогиб одной грани шестигранного чехла ТВС РБН с учетом температурного расширения составляет (рис. 14) 0,541 мм. Суммарное изменение размера «под ключ» равно $0,541 \cdot 2 = 1,082$ мм, что больше

значения полученного по программе «ЗОНА-М» более чем на 30 %.

Заключение

Реализовано решение задач радиационного распухания и радиационной ползучести ТВС РБН с использованием программного комплекса «ANSYS».

Решение тестовых примеров подтвердили корректность программной реализации физических процессов РР и РП в ПК «ANSYS».

Результаты расчета тестовых примеров отдельной ТВС, сравнение их с аналитическими решениями и результатами расчета полученными при помощи программы «ЗОНА-М» показали их хорошую сходимость.

ПК «ANSYS» обладает следующими возможностями:

- заданием трехмерных моделей произвольной формы, что позволяет использовать программу не только для расчета шестигранных чехлов ТВС РБН;
- учетом эффектов от комплексного воздействия внешних факторов (давление, температуры, нейтронного облучения) при прочностном анализе;
- возможностью расчета ансамбля сборок. Контакт может быть задан по любой из поверхностей чехла ТВС;
- удобным интерфейсом пользователя;
- большим объемом выходной информации по напряжениям, перемещениям, деформациям в любой точке заданной конструкции. Представлением результатов как в табличной форме так и в виде рисунков и графиков.

Литература

1. ANSYS Программа «ANSYS». Регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002.
2. Чуев В. В. Поведение конструкционных материалов в спектре нейтронов быстрого реактора большой мощности. // Автореферат Заречный, 2007.
3. Забудько Л. М. и др. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоиздат, 1988.
4. Красноселов В. А. и др. Экспериментальные исследования радиационной ползучести нержавеющей сталей // Препринт НИИАР. Димитровград, 1981.
5. Gilbert E. R., Harding N. E. // Proc. Conf. Irradiation Embrittlement and Creep in Fuel Cladding and Core Components. London, 1972. p.161.
6. Асташов С. Е. и др. Основные результаты первичных исследований ТВС реактора БН-600 // В сб. Исследование конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов / Под ред. А. Г. Шейкмана. Екатеринбург, 1994.
7. ANSYS. Advanced Structural Nonlinearities. Release 7.0.