

УДК 539.3

## РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

© 2013 г. С.А. Исхаков, В.Б. Кайдалов, Д.А. Лапшин, А.В. Рябцов

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

silaev@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 09.06.2012

Решена задача расчетного анализа деформирования шестигранного чехла тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (типа БН) с учетом радиационного распухания и радиационной ползучести. Материальные параметры моделей радиационного формоизменения ТВС получены на основе экспериментальных данных. Представлены результаты расчетно-экспериментального анализа формоизменения шестигранного чехла ТВС реактора типа БН с учетом радиационного распухания и радиационной ползучести. Результаты выполненных исследований показали, что разработанные блоки учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести позволяют проводить анализ формоизменения ТВС в активной зоне.

*Ключевые слова:* радиационное распухание, радиационная ползучесть, тепловыделяющие сборки, послереакторные исследования, расчет.

### Введение

Требования к повышению безопасности реакторных установок и увеличение срока эксплуатации топлива в активных зонах определяют необходимость учета эффектов, проявляющихся в чехлах тепловыделяющихборок (ТВС) вследствие размерной нестабильности конструкционных материалов под действием нейтронного облучения, температуры и давления. К ним относятся инициированные облучением радиационное распухание (РР) и радиационная ползучесть (РП) [1]. Оба этих явления приводят к формоизменению ТВС в активной зоне реактора.

Градиенты флюенса и температуры на противоположных гранях чехла вызывают неравномерное увеличение его размеров и, как следствие, искривление сборки с выпуклостью в сторону центра активной зоны. В условиях больших доз облучения быстрыми нейтронами формоизменение ТВС вследствие радиационного распухания и радиационной ползучести может стать причиной сокращения и даже перекрытия технологических зазоров между ТВС, нежелательного изменения реактивности и блокировки проходных сечений ТВС, что в конечном итоге приводит к ограничению выгорания топлива.

Важное значение имеют конечные параметры искривления ТВС, стрела проги-

ба и отклонение ТВС от оси, поскольку возможности перегрузочного тракта реактора ограничены.

Для решения задач радиационного формоизменения элементов активной зоны программный комплекс ANSYS [2] дополнен разработанными блоками учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести материала, в которых реализованы математические модели указанных процессов поведения материалов в реакторных условиях, получаемых, как правило, экспериментально. Введение моделей распухания и ползучести и выполнение соответствующих расчетов осуществляется за счет использования специальных управляющих программ, встроенных в ANSYS.

В настоящей работе приведены результаты расчетно-экспериментального анализа формоизменения шестигранного чехла ТВС реактора на быстрых нейтронах при воспроизведении эксплуатационных условий.

ТВС реактора типа БН работают в условиях одновременного длительного воздействия нейтронного облучения, температуры и давления, типичное распределение которых по высоте ТВС представлено на рис. 1.

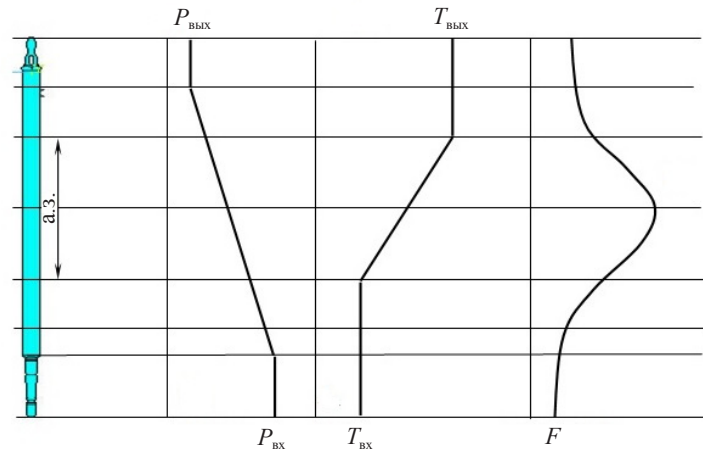


Рис. 1. Распределение давления ( $P$ ), температуры ( $T$ ) и нейтронного облучения ( $F$ ) по высоте ТВС типа БН

Формоизменение ТВС, вызванное облучением, связано, главным образом, с радиационной ползучестью. Радиационная ползучесть характеризуется нарастанием остаточной деформации конструкционного материала во времени под действием механической нагрузки и облучения.

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

Скорость радиационной ползучести записывается в виде

$$\dot{\epsilon}_{\text{eq}}^c = \sigma_{\text{eq}} B \Phi,$$

где  $B$  – модуль радиационной ползучести,  $(\text{МПа} \cdot \text{н}/\text{см}^2)^{-1}$ ;  $\sigma_{\text{eq}}$  – эквивалентное напряжение, МПа;  $\Phi$  – флюкс нейтронов,  $\text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ .

Суммарная деформация шестигранного чехла за период одной кампании

$$\varepsilon_{\text{eq}}^c = \int_0^{\tau_k} \dot{\varepsilon}_{\text{eq}}^c d\tau,$$

где  $\tau$  – время,  $\tau_k$  – длительность кампании,  $\dot{\varepsilon}_{\text{eq}}^c$  – скорость радиационной ползучести.

На внутреннюю поверхность шестигранного чехла действует давление теплоносителя, которое вызывает максимальные изгибные напряжения в средней части граней. Соответственно наибольшее значение радиационной ползучести наблюдается там же, приводя к нарушению его первоначальной конфигурации.

Качественная картина формоизменения чехла ТВС при радиационной ползучести в однородном поле нейтронов и постоянном давлении показана на рис. 2.

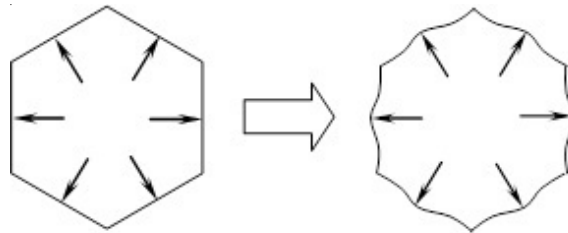


Рис. 2. Формоизменение чехла ТВС от радиационной ползучести

Для условий работы ТВС быстрых реакторов деформация, вызванная термической ползучестью, незначительна (не более 0,1%).

Радиационное распухание вызывает изменение размеров конструкционного материала в условиях облучения, однако исходная форма поперечного сечения ТВС при этом сохраняется. Радиационное распухание сталей имеет изотропный характер [3, 6] и описывается линейной зависимостью [7]:

$$\Delta V / V_0 (\%) = K k_\tau,$$

где  $K$  – коэффициент, определяемый экспериментально;  $k_\tau$  – накопленные радиационные повреждения, которые определяются величиной смещений на атом (сна).

Число смещений на атом – это характеристика, используемая для учета влияния различных энергетических спектров облучения (нейтронами, ионами, протонами и т.д.) на уровень радиационных повреждений в конструкционных материалах и сопоставления экспериментальных данных, получаемых в реакторах и на ускорителях.

Качественная картина изменения размера «под ключ» чехла ТВС от радиационного распухания в однородном поле нейтронов показана на рис. 3.

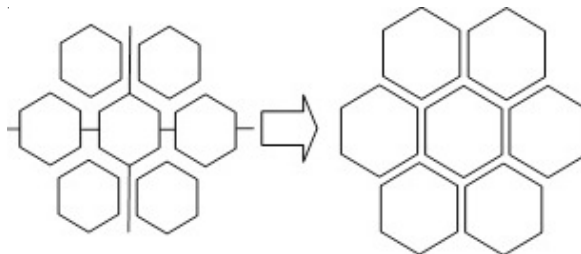


Рис. 3. Изотропный рост поперечных размеров «под ключ» ТВС от радиационного распухания

## Результаты расчетно-экспериментальных исследований

ТВС реактора типа БН состоит из трех основных частей: головки, шестигранного чехла и хвостовика (рис. 4). Основным несущим элементом ТВС является чехол.

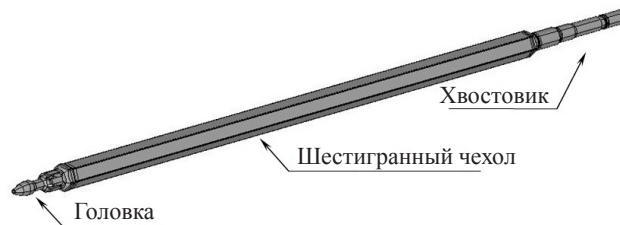


Рис. 4. Общий вид ТВС активной зоны реакторов типа БН

В качестве материала чехлов ТВС активных зон реакторов типа БН использована ферритно-мартенситная сталь ЭП-450, устойчивость к радиационному распуханию и радиационной ползучести которой позволяет продолжать эксплуатацию ТВС до высоких повреждающих доз облучения  $\sim 140$  сна [8].

Верификация разработанных блоков учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести в ПК ANSYS проводилась по результатам после-реакторных исследований сборок активной зоны реактора БН-600. Расчеты шести-гранных чехлов сборок выполнены для условий их работы в активной зоне реактора БН-600. Первая сборка эксплуатировалась в активной зоне реактора БН-600 в течение назначенного срока.

Давление, действующее на шестигранный чехол сборки, в центральной плоскости активной зоны незначительное, поэтому для нее составляющая ползучести пренебрежимо мала. Повреждающая доза меняется по высоте сборки по косинусоидальному закону. Максимальная повреждающая доза реализуется в центре топливной части сборки.

В расчетах использовалась конечно-элементная модель шестигранного чехла сборки, представленная на рис. 5. Толщина чехла 2 мм, внешний размер «под ключ» равен 96 мм. Сборка в районе нижнего переходника жестко закреплена.

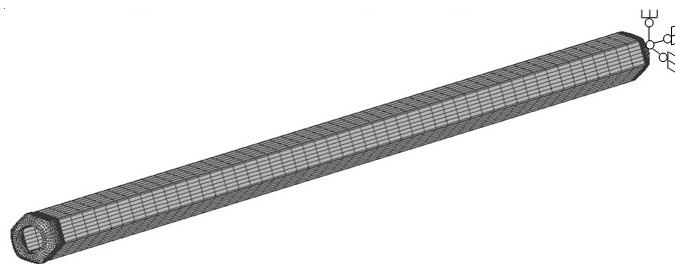


Рис. 5. Конечно-элементная модель шестигранного чехла

Результат расчета изменения размера «под ключ» шестигранного чехла в центральной плоскости активной зоны от радиационного распухания приведен на рис. 6. Расчетное значение увеличения размера «под ключ» шестигранного чехла составляет 0,42 мм, т.е. 0,43% от его первоначального размера.

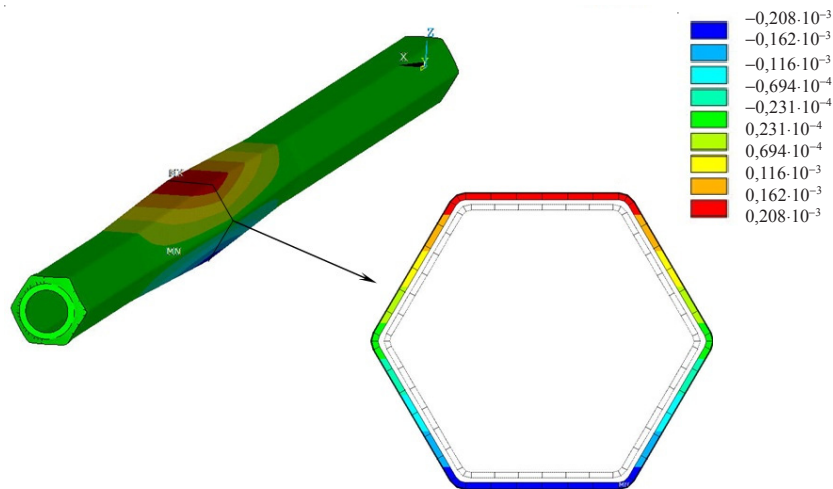


Рис. 6. Изменение размера «под ключ» шестигранного чехла от радиационного распухания, м

Проведены измерения чехловой трубы сборки после эксплуатации. По высоте чехловой трубы через 100 мм в сечении определялся размер «под ключ» по трем парам граней. Точность измерения – 0,1 мм. Максимальное изменение размера «под ключ» 0,45 мм зафиксировано в сборке на уровне центральной плоскости активной зоны, что составляет 0,47% от первоначального размера «под ключ».

Вторая сборка также отработала назначенный срок в реакторе БН-600. Расчетная модель и условия закрепления аналогичны сборке, рассмотренной ранее. Давление, действующее на шестигранный чехол сборки в центральной плоскости активной зоны, равно 0,2 МПа.

Повреждающая доза, накопленная за период эксплуатации, меньше, чем у первой сборки, в 2,5 раза. Повреждающая доза также меняется по высоте сборки по косинусоидальному закону. Максимальная повреждающая доза реализуется в центре топливной части сборки.

Результаты расчета изменения размера «под ключ» шестигранного чехла сборки в центральной плоскости активной зоны от давления, радиационного распухания и радиационной ползучести приведены на рис. 7–9.

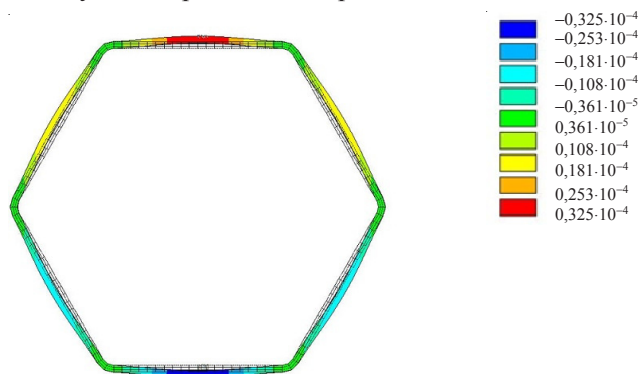


Рис. 7. Изменение размера «под ключ» шестигранного чехла сборки в центральной плоскости активной зоны от давления, м

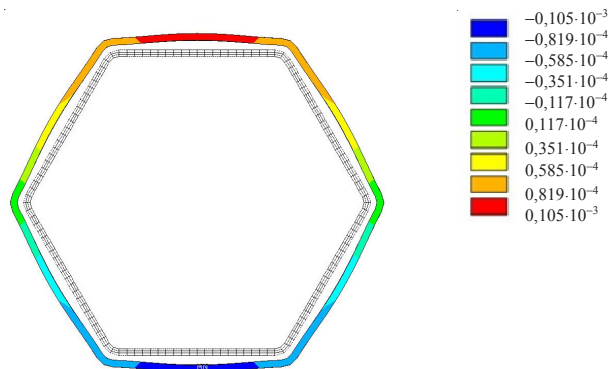


Рис. 8. Изменение размера «под ключ» шестигранного чехла сборки в центральной плоскости активной зоны от внутреннего давления и радиационного распухания, м

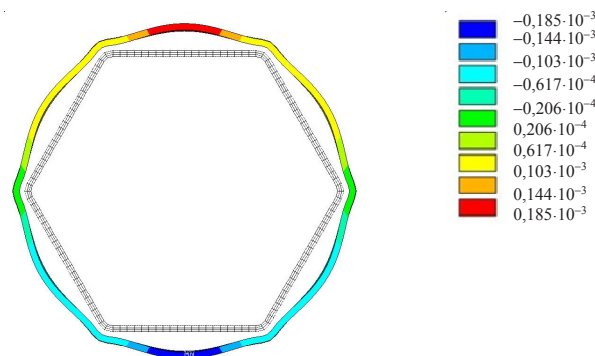


Рис. 9. Изменение размера «под ключ» шестигранного чехла сборки в центральной плоскости активной зоны от внутреннего давления, радиационного распухания и радиационной ползучести, м

Проведенные измерения чехловой трубы сборки после эксплуатации показали, что имеется тенденция к увеличению размера «под ключ» от низа до середины рабочей части сборки, где поток нейтронов в активной зоне максимален. При этом наибольшее увеличение этого размера составляет 0,43 мм и включает в себя изменение размера от суммарного действия давления, радиационного распухания и радиационной ползучести.

Расчетное значение изменения размера «под ключ» шестигранного чехла составляет 0,37 мм (см. рис. 9). При этом вклад давления в изменение размера «под ключ» составляет ~18%, радиационного распухания ~39% и радиационной ползучести ~43% от расчетного значения.

### Заключение

Решена задача расчетного анализа формоизменения ТВС реакторов типа БН с учетом радиационного распухания и радиационной ползучести конструкционных материалов.

Для поставленных целей программный комплекс ANSYS дополнен разработанными блоками учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести материала ТВС. Введение моделей распухания и ползучести и выполнение соответствующих расчетов осуществляется за счет использования специальных управляющих программ, встроенных в ANSYS.

Осуществлена верификация расчетных моделей и расчетного кода по результатам послереакторных исследований ТВС реактора БН-600.

Результаты расчета изменения размера «под ключ» шестигранного чехла с использованием подхода, основанного на предположении об изотропности радиационного набухания и радиационной ползучести материала, выполненные с помощью ПК ANSYS, показали удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента (погрешность не более 10%).

Разработанный подход, моделирование и расчетный код могут быть использованы для анализа формоизменения штатных и экспериментальных ТВС и других сборок активной зоны реакторов типа БН.

#### *Список литературы*

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющей сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий / С.А. Капустин, В.А. Горохов, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов, Б.В. Марголин, А.А. Бучатский // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2007. Вып. 69. С. 106–116.
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства: программа ANSYS 5.2-5.7: ПС № 145 от 31.10.02. 5 с.
3. *Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А.* Работоспособность ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
4. *Красноселов В.А. и др.* Экспериментальные исследования радиационной ползучести нержавеющей сталей. Препринт НИИАР. Димитровград, 1981. 14 с.
5. *Gilbert E.R., Harding N.E.* // Proc. Conf. Irradiation Embrittlement and Creep in Fuel Cladding and Core Components. London, 1972. P. 161.
6. Swelling and irradiation creep of ferritic-martensitic steels for wrapper application-irradiated in phenix / V. Levy, A. Maillard, H. Tourton et al. // Proc. Specialist Meeting on Cladding and Materials. Obninsk, 1992. P. 12.
7. *Астаиов С.Е. и др.* Основные результаты первичных исследований ТВС реактора БН-600 // В сб.: Исследование конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1994. С. 48–84.
8. *Чув В.В.* Поведение конструкционных материалов в спектре нейтронов быстрого реактора большой мощности: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. Заречный, 2007. 32 с.

#### **COMPUTATIONAL SIMULATION OF RADIATION-INDUCED SHAPE CHANGE IN FUEL ASSEMBLIES OF THE BN-TYPE REACTORS**

**S.A. Iskhakov, V.B. Kaydalov, D.A. Lapshin, A.V. Ryabtsov**

A computational analysis problem of deformation of a hexagonal wrapper tube in a fuel assembly (FA) of sodium-cooled fast reactors (the BN-type reactors), accounting for radiation-induced swelling and radiation-induced creep is solved. Determining equations for calculating the radiation-induced shape changes in FA's using the finite-element method are presented. The material parameters of the radiation-induced shape changes in FA's in are obtained based on the experimental data. The results of computational-and-experimental analysis of the shape changes in the wrapper tube of the BN-type reactor FA accounting for the radiation-induced swelling and radiation-induced creep are given. Results of the studies done showed that blocks developed to take account of the radiation-induced swelling and radiation-induced creep make it possible to analyze the FA shape changes in the core.

*Keywords:* radiation-induced swelling, radiation-induced creep, fuel assembly, post-irradiation examination, analysis.