

ЕНЕРГЕТИКА
ТЕПЛОТЕХНІКА
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ENERGETICS
HEAT ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.039.548:539.166

Р.Л. Гонтарь, магістр, Одес. нац. політехн. ун-т

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА
И ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ПРИ
МАНЕВРИРОВАНИИ МОЩНОСТЬЮ ВВЭР-1000**

Р.Л. Гонтарь. Моделювання вигорання палива та пошкодження оболонки твелів при маневруванні потужністю ВВЕР-1000. Виконано моделювання процесу експлуатації ядерного палива на протязі чотирьох років. Для розглянутого алгоритму перестановок тепловиділяючих збірок отримана відмінність у локалізації аксіальних сегментів з найбільшим пошкодженням оболонок твелів і з найбільшим вигоранням палива.

Ключові слова: ВВЕР, ТВЗ, твел, вигорання, пошкодження.

Р.Л. Гонтарь. Моделирование выгорания топлива и поврежденности оболочек твэлов при маневрировании мощностью ВВЭР-1000. Выполнено моделирование процесса эксплуатации ядерного топлива на протяжении четырех лет. Для рассмотренного алгоритма перестановок тепловыделяющих сборок получено различие в локализации аксиальных сегментов с наибольшей поврежденностью оболочек твэлов и с наибольшим выгоранием топлива.

Ключевые слова: ВВЭР, ТВС, твэл, выгорание, поврежденность.

R.L. Gontar. Modelling of fuel burnup and damage of fuel claddings in VVER-1000 power maneuvering. Operation of nuclear fuel has been modelled for four years. For the considered fuel assembly (FA) rearrangement algorithm, a difference in localization of the axial segments with the greatest fuel element cladding damage parameter and the axial segment with the highest fuel burnup has been obtained.

Keywords: VVER, FA, fuel element, burnup, damage.

Задача определения дефектных твэлов тепловыделяющей сборки (ТВС) водо-водяного реактора является актуальной, т.к. позволяет получить достоверную информацию о состоянии ТВС и ее дальнейшей пригодности к эксплуатации. При несении ВВЭР-1000 базовой нагрузки в энергосистеме все ТВС, входящие в активную зону (АкЗ), генерируют различное количество энергии в зависимости от глубины выгорания топлива и места расположения в АкЗ, при этом распределение энерговыделения по высоте ТВС описывается синусоидальным законом.

Максимум энерговыделения приходится на середину высоты ТВС, и суммарная деформация оболочек в результате механического взаимодействия между топливной таблеткой и оболочкой твэла максимальна именно здесь.

Приведенные предположения справедливы для стационарного режима работы реакторной установки (РУ), но для случая переменного режима эксплуатации РУ данное утверждение неверно. В процессе выполнения суточного маневра мощностью для поддержания регламентного уровня аксиального офсета (АО) необходимо вводить и выводить регулирующие стержни десятой группы (У-алгоритм) органов регулирования (ОР СУЗ). Данные движения ОР СУЗ приводят к регулярным скачкам линейной мощности в АкЗ. Можно предположить, что значительные скачки мощности будут не только в ТВС, в которые вводятся стержни ОР СУЗ, но и в граничащих ТВС, и даже далее.

Необходимо определить наиболее вероятные места повреждения оболочек твэлов по высоте ТВС при годовом маневрировании ВВЭР, с учетом изменения глубины выгорания топлива по высоте ТВС.

Целью данной статьи является исследование аксиального распределения поврежденности оболочек твэлов с учетом изменения глубины выгорания ядерного топлива в переменном режиме нагружения при четырехлетней кампании, где продолжительность каждой составляет не менее 290 эф. сут. Для этого необходимо исследовать поврежденность материала оболочек твэлов с учетом положения ОР СУЗ и перестановок ТВС.

Для моделирования нейтронного потока в АкЗ применена нейтронно-физическая модель, реализованная в виде программного комплекса “Имитатор Реактора” (ИР), который является универсальным средством расчетного моделирования работы реактора ВВЭР-1000 и предназначен для проведения расчетов по усовершенствованию топливных циклов и алгоритмов управления реактором [1].

Для анализа поведения топлива в области глубоких выгораний используется программное средство (ПС) FEMAXI [2], которое разработано для анализа поведения различных видов топлива в нормальной эксплуатации (аварийные условия не учитываются) при выгораниях вплоть до уровней, превышающих 40...50 МВт·сут/кг-U. С его помощью определяется реакция твэла на комбинированное воздействие, которому подвергается твэл, для заданной последовательности уровней мощности и значений параметров теплоносителя, с учетом конструктивных характеристик твэла.

Распределение шлаков в АЗ задавалось для момента начала реальной кампании.

Условно разделив высоту твэла на 16 аксиальных слоев и обозначив i -й (от низа АкЗ) аксиальный слой ТВС, расположенной в ячейке j , как расчетную ячейку (i, j) , определена тепловая мощность $Q_{i,j}$ расчетной ячейки (i, j) :

$$Q_{i,j} = q_{i,i,j} \cdot l_i, \text{ МВт}, \quad (1)$$

где $q_{i,i,j}$ — средняя линейная тепловая нагрузка расчетной ячейки (i, j) , определяемая программой ИР, МВт/см;

l_i — длина i -го аксиального сегмента ТВС, см.

В момент начала маневра мощностью первое состояние реактора ВВЭР-1000 рассчитывалось с равновесным распределением Хе. Для всех последующих состояний, с учетом выгорания топлива, рассчитывалось неравновесное распределение Хе и Sm. Входное давление и расход теплоносителя задавались постоянными, равными 16 МПа и 84103 м³/ч, соответственно. Входная температура теплоносителя при изменении мощности задавалась равной $T_{\text{вх}} = 287$ °С.

В соответствии с суточным алгоритмом эксплуатации энергоблока с ВВЭР [3] моделировалось ежесуточное снижение мощности РУ со 100 до 80 %, в дополнение к которому было применено еженедельное снижение мощности со 100 до 50 %. Данное маневрирование моделировалось для всей топливной кампании, с учетом перестановок ТВС в АкЗ (рис. 1).

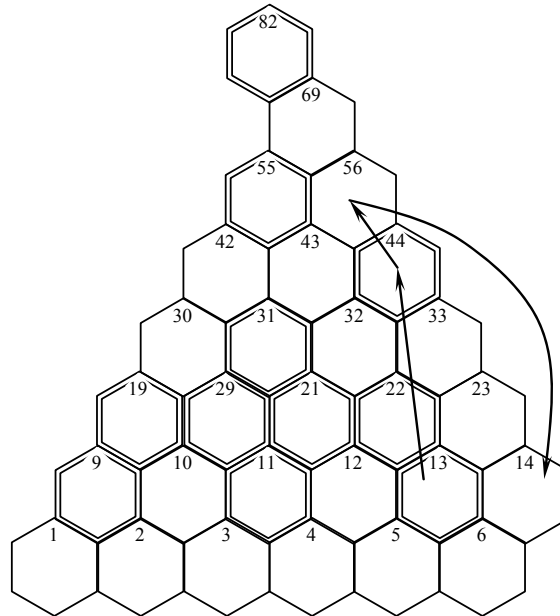


Рис. 1. Схема перестановок ТВС по АкЗ

Представлена схема перестановок ТВС по АкЗ в процессе эксплуатации ЯТ: в первый год эксплуатации наблюдаемая кассета располагалась в 13-й ячейке АкЗ, согласно картограмме АкЗ. Во второй год эксплуатации она была перемещена в 44-ю ячейку АкЗ, где попала под регулирование 10-й группой ОР СУЗ. В третий год эксплуатации кассета была перемещена в соседнюю 56-ю ячейку, где также на нее оказано влияние 10-й группы ОР СУЗ. В четвертый год эксплуатации кассета была установлена в 14-ю ячейку.

На основании полученных значений тепловой мощности рассчитана глубина выгорания расчетной ячейки

$$B_{i,j}(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{Q_{i,j} \cdot d\tau}{m_i}, \text{ МВт}\cdot\text{эф. сут./кг}, \quad (2)$$

где $Q_{i,j}$ — тепловая мощность расчетной ячейки, МВт;

τ — момент времени, эфф. сут.;

m — масса топлива в ячейке, кг.

Модельный эксперимент показал, что максимум глубины выгорания смещен к низу АкЗ, расположен в диапазоне 0,3...0,7 м, считая от низа АкЗ (рис. 2), и составляет 65 МВт*сут/кг.

Дальнейшая обработка данных проводилась с помощью ПС "FEMAXI", что позволило определить распределение удельной энергии рассеяния A по высоте твэлов, а также удельную энергию рассеяния в момент потери устойчивости материала оболочки A_0 .

Для оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла применяется метод расчета параметра $\omega(\tau)$ суммарной поврежденности материала оболочки, основанный на энергетическом варианте теории ползучести [4]. Для оценки времени эксплуатации оболочки твэла при многократных изменениях мощности РУ необходимо вычислить $A(\tau)$, накопленную от начала процесса ползучести до момента разрушения оболочки,

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (2)$$

где A_0 — удельная энергия рассеяния $A(\tau)$ в момент потери устойчивости τ_0 материала оболочки, $A_0=35$ МДж/м³.

Соблюдение условия $\omega=1$ свидетельствует о разрушении оболочки [4].

Зависимость поврежденности материала оболочки от аксиальной координаты (по высоте ТВС) представлена на рис. 3. Данная зависимость отражает изменение поврежденности материала оболочки для наблюдаемой топливной кассеты в течение полной топливной кампании — 1166 эф. сут. (4 календарных года).

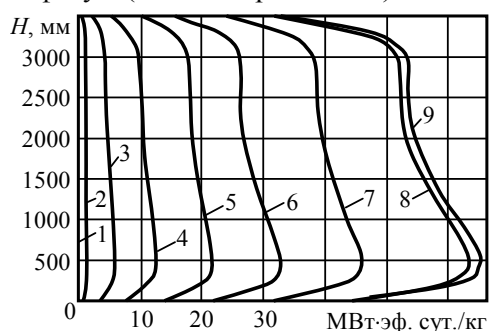


Рис. 2. Изменение глубины выгорания ЯТ по высоте твэлов наблюдаемой кассеты по состоянию на: момент начала кампании (1); 120 эффективные сутки (2); 240 эффективные сутки (3); 351 эффективные сутки (4); 471 эффективные сутки (5); 583 эффективные сутки (6); 723 эффективные сутки (7); 843 эффективные сутки (8); 1166 эффективные сутки (9)

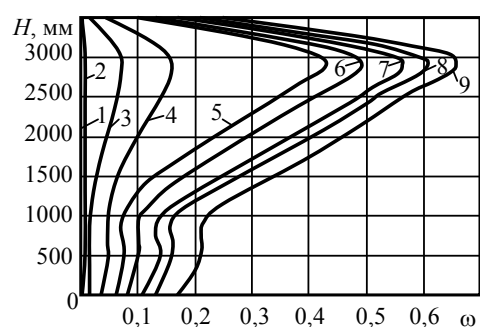


Рис. 3. Изменение поврежденности по высоте твэлов наблюдаемой кассеты по состоянию на: момент начала кампании (1); 120 эффективные сутки (2); 240 эффективные сутки (3); 351 эффективные сутки (4); 471 эффективные сутки (5); 583 эффективные сутки (6); 843 эффективные сутки (7); 974 эффективные сутки (8); 1166 эффективные сутки (9)

Из результатов, полученных в процессе моделирования для представленных алгоритма маневрирования и схемы перестановок ТВС, отраженных на рисунках 2 и 3, следует подчеркнуть следующее: несмотря на то, что наибольшая глубина выгорания смещена к низу АкЗ и приходится на область 0,3...0,7 м, считая от нижнего края нижней топливной таблетки твэла, и составляет 65 МВт.сут/кг, наибольшая вероятность возникновения разрушения оболочки твэла наблюдается в верхней части ТВС (2,7...3,2 м от нижнего края нижней топливной таблетки твэла), что соответствует области движения ОР СУЗ.

Необходимо подчеркнуть, что полученный результат, показывающий смещение максимума поврежденности оболочек твэлов в область АкЗ, расположенную между координатами 2,7 и 3,2 м, не соответствует имеющимся данным по аксиальному профилю распределения поврежденности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000, согласно которым максимум поврежденности оболочек твэлов приходится на область АкЗ, расположенную между координатами 1,8 и 2,7 м [4].

Кроме того, полученное смещение максимума глубины выгорания в область АкЗ, расположенную между координатами 0,3 и 0,7 м, не соответствует имеющимся данным по аксиальному профилю распределения выгорания ТВС реакторов ВВЭР-1000 Запорожской АЭС, согласно которым максимальная глубина выгорания распределена с высокой степенью равномерности в области АкЗ, расположенной между координатами 0,35 и 2,8 м [5].

Таким образом, представленные результаты моделирования изменения аксиального распределения поврежденности оболочек твэлов в переменном режиме нагружения реактора ВВЭР-1000, с учетом изменения в ходе четырехлетней кампании глубины выгорания ядерного топлива, а также с учетом размещения ОР СУЗ и перестановок ТВС в АкЗ, требуют дальнейшего уточнения.

Литература

1. Подольный, В.П. Применения искусственного интеллекта в АСУТП АЭС / В.П. Подольный, М.С. Малинин, Д.А. Симагин // Сб. статей IX Междунар. студенч. конф. "Полярное сияние — 2006". — М., 2006. — С. 178 — 179.

2. Suzuki, M. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1) / M. Suzuki. — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 p.
3. Баскаков, В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы / В.Е. Баскаков, М.В. Максимов, О.В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2007. — Вып. 2(28). — С. 56 — 59.
4. Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power WWER-1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Eng. and Design. — 2011. — Vol. 241, № 8. — P. 2956 — 2963.
5. Дудка, Е.А. Использование аксиального профиля распределения выгорания при анализе ядерной безопасности систем хранения отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР в Украине / Е.А. Дудка, Ю.П. Ковбасенко, Е.И. Белодед // Ядер. та радіац. безпека. — 2012. — Вип. 3(55). — С. 34 — 38.

References

1. Podolnyy, V.P. Primeneniya iskusstvennogo intellekta v ASUTP AES [Application of artificial intelligence in ACS of NPP] / V.P. Podolnyy, M.S. Malinin, D.A Simagin // Sbornik statey IX Mezhdunarodnaya studencheskaya konferentsiya “Polyarnoe siyanie — 2006” [Collection of Articles IX International Student Conference “Polar Lights — 2006”] — Moscow, 2006. — pp. 178 — 179.
2. Suzuki, M. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1) / M Suzuki. — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 pp.
3. Baskakov, V.E. Algoritm ekspluatatsii energobloka s VVER v podderzhanii sutochnogo balansa moshchnosti energosistemy [Algorithm of operating VVER in maintaining the balance of the daily power load capacity] / V.E. Baskakov, M.V. Maksimov, O.V. Maslov // Tr. Odes. politekhn. un-ta. [Proc. of Odesa Polytech. Univ.]. — Odessa, 2007. — Iss. 2(28). — pp. 56 — 59.
4. Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power WWER—1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Eng. and Design. — 2011. — Vol. 241, № 8. — pp. 2956 — 2963.
5. Dudka, E.A. Ispolzovanie aksialnogo profilya raspredeleniya vygoraniya pri analize yadernoy bezopasnosti sistem khraneniya otrabotavshego yadernogo topliva reaktorov VVER v Ukraine [Using the axial burnup distribution profile in the analysis of nuclear safety storage of spent nuclear fuel from VVER in Ukraine] / E.A. Dudka, YU.P. Kovbasenko, E.I. Beloded // Yader ta radiats. bezpeka. [Nuclear and Radiation Safety] — 2012. — Iss. 3(55). — pp. 34 — 38.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Одес. нац. политехн. ун-та Пелых С.Н.

Поступила в редакцию 30 августа 2012 года.