

ВЛИЯНИЕ АКСИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТВС НА ЗНАЧЕНИЕ $K_{эфф}$ КОНТЕЙНЕРОВ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

В.С. Внуков*, В.И. Куликов, Л.И. Чкуасели***

** АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского.*

249033 г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, д. 1,

*** АО «Атомпроект», 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82*



Цель работы – определение минимально допустимых глубин выгорания топлива, позволяющих компоновать безопасные загрузки транспортного упаковочного комплекта ТУК-6 для транспортирования отработавшего топлива реакторов ВВЭР-440.

Ядерная безопасность загрузки считается доказанной, если $K_{эфф}$ не превышает безопасного значения в вероятных аварийных ситуациях, в частности, при изменении плотности воды в контейнере.

Для повышения точности расчетов необходима оценка влияния аксиального распределения глубины выгорания ОТВС на значение $K_{эфф}$ ТУК-6.

Представлены данные по сравнению влияния аксиального распределения выгорания ОТВС на значения $K_{эфф}$ для американского контейнера GBC-32 с отработавшим топливом PWR [1] и российского контейнера ТУК-6 с отработавшим топливом ВВЭР-440.

Рассмотрено большое количество аксиальных профилей выгорания различных сборок PWR и ВВЭР-440. Показано различие во влиянии аксиальной неравномерности выгорания на $K_{эфф}$, связанное с разной конструкцией контейнеров, наличием поглотителей нейтронов в контейнере GBC-32 и отсутствием их в контейнере ТУК-6.

Ключевые слова: глубина выгорания, ядерная безопасность, отработавшее топливо, контейнер, хранение, транспортирование, аксиальное распределение выгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее при обосновании ядерной безопасности контейнеров для отработавшего топлива АЭС принималось предположение, что топливо «свежее».

С введением в проекты АЭС ТВС с большим содержанием и загрузкой урана появились проблемы обоснования ядерной безопасности существующих контейнеров в предположении «свежего» топлива. Поэтому возникла концепция установления глубины выгорания, при которой или выше которой значение $K_{эфф}$ контейнера не превышает установленное правилами значение $K_{эфф}$, равное 0,95.

Для учета глубины выгорания необходимо решить ряд проблем: разработать приборы для контроля выгорания, оттестировать методы расчета $K_{эфф}$ с учетом выгорания, откорректировать сечения поглощения наиболее важных осколков деления, учесть не-

© В.С. Внуков, В.И. Куликов, Л.И. Чкуасели, 2015

равномерность выгорания.

В настоящее время эти проблемы находятся в состоянии исследования как в России, так и за рубежом.

Концепция установления предела выгорания благодаря выгоранию топлива в зарубежной литературе обозначается как «burnup credit». Уменьшение значения $K_{эфф}$ из-за выгорания топлива обусловлено уменьшением концентрации делящихся материалов и образованием актиноидных элементов и продуктов деления, которые поглощают нейтроны. Это уменьшение зависит от конструкции ТВС, глубины выгорания и других факторов. Важным элементом является аксиальное и радиальное распределение глубины выгорания в ТВС.

Радиальное распределение, как установлено расчетами, имеет малое влияние на $K_{эфф}$, а аксиальное распределение по высоте ТВС является важным компонентом в анализе влияния глубины выгорания на $K_{эфф}$ контейнера или хранилища отработавшего топлива.

Аксиальная неравномерность выгорания характеризуется изменением глубины выгорания топлива по высоте (длине) ОТВС из-за неравномерности потока нейтронов по высоте активной зоны реактора, в основном, вследствие торцевых утечек нейтронов и изменения с высотой температуры и плотности замедлителя.

В системах с реальным аксиальным распределением выгорания области с максимальным значением $K_{эфф}$ находятся на концах ОТВС, поскольку там выгорание ниже, чем в центре сборки. Поэтому в системе формируется баланс между увеличением $K_{эфф}$ вследствие уменьшения выгорания на концах сборок и уменьшением $K_{эфф}$ вследствие увеличения выгорания в середине ОТВС и увеличения утечки на концах сборок.

Условия формирования баланса определяют, в основном,

- профилем аксиальной неравномерности (отношением выгорания на участках по высоте z сборки к среднему по ОТВС выгоранию – часто эту величину обозначают как k_z);
- геометрией и материальным составом системы из ОТВС;
- распределением замедлителя в системе.

Поэтому необходимые для анализа влияния аксиальной неравномерности на реактивность системы (ТУК, хранилище) расчеты $K_{эфф}$ должны проводиться в реальной геометрии и учитывать влияние изменения состояния замедлителя.

В работе приведены результаты наиболее полного цикла зарубежных исследований [1] влияния аксиального профиля выгорания на $K_{эфф}$ для ОТВС реакторов PWR, размещенных в двухцелевом контейнере GBC-32, а также исследований, проведенных авторами применительно к транспортированию ОТВС реакторов ВВЭР-440 в ТУК-6.

ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ АКСИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ДЛЯ КОНТЕЙНЕРА GBC-32

В работе [1] было проанализировано большое количество различных профилей выгорания ОТВС реакторов PWR (~1700 сборок различных реакторов) и изучено их влияние на реактивность ТУК с помощью величины $\Delta K_{эфф}$, т.е. разницы между $K_{эфф}$ с учетом аксиального распределения и $K_{эфф}$ для равномерного распределения по высоте глубины выгорания для контейнера GBC-32.

$$\Delta K_{эфф} = K_{эфф}^{\text{нравн}} - K_{эфф}^{\text{равн}}. \quad (1)$$

Результаты расчетов, приведенных в [1], показывают, что для ОТВС реакторов PWR, размещенных в ТУК GBC-32, предположение равномерного среднего профиля аксиального выгорания является консервативным до выгорания 15 ГВт·сут/т и неконсервативным при увеличении выгорания при плотности воды 1 г/см³.

Степень неконсервативности зависит от первоначального обогащения, времени выдержки ОТВС и числа нуклидов, включенных в расчеты (например, присутствие осколков деления).

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

На рисунке 1 показаны результаты расчетов $\Delta K_{эфф}$ для различного времени выдержки и наличия продуктов деления в ОТВС реакторов PWR.

При расчетах в число актиноидов были включены U-234, U-235, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241.

В число осколков деления включены Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-151, Eu-153, Gd-155.

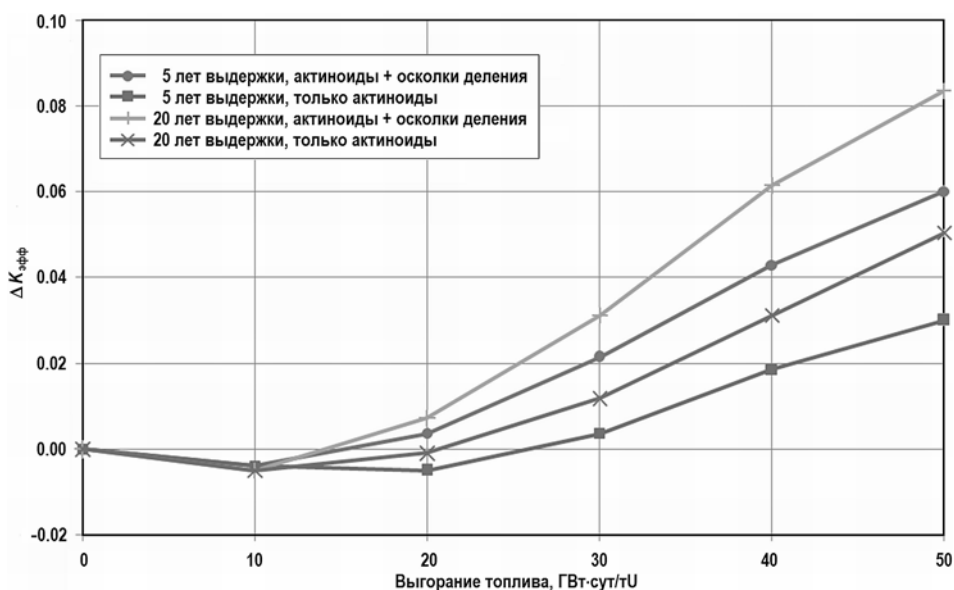


Рис. 1. Значения $K_{эфф}$ в зависимости от выгорания топлива при плотности воды 1 г/см³

Рисунок 2 иллюстрирует зависимость $\Delta K_{эфф}$ для трех различных профилей выгорания в отсутствие осколков деления.

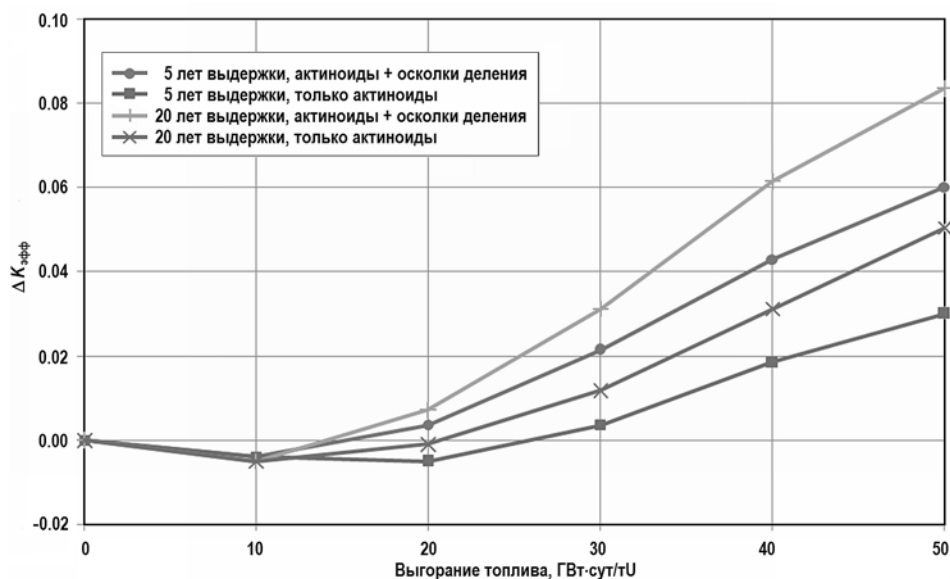


Рис. 2. Примеры эффектов аксиального выгорания для трех различных профилей выгорания топлива 4%-го обогащения при учете только актиноидных элементов

ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОГО АКСИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ДЛЯ КОНТЕЙНЕРА ТУК-6

В работе проводился аналогичный анализ для контейнеров ТУК-6 с ОТВС реактора ВВЭР-440.

Контейнер ТУК-6 предназначен для транспортирования 30-ти ОТВС реакторов ВВЭР-440. Контейнер ТУК-6 не имеет поглотителей нейтронов, и максимальное значение $K_{эфф}$ достигается у него при плотности воды $\sim 0,3 \text{ г/см}^3$ в аварийных ситуациях.

Для оценки влияния профилей выгорания на реактивность ТУК необходимо определить подход, позволяющий из всего многообразия этих профилей определить как наиболее *характерные* профили, так и профили, обеспечивающие консервативный подход к анализу ядерной безопасности (обозначим их как *окаймляющие* или ограничивающие профили).

Анализ ядерной безопасности проводился для всех основных типов топливных сборок, использующихся на Кольской и Нововоронежской АЭС, причем отдельно рассматривались как рабочие кассеты (РК), так и ТВС АРК, поскольку известно [2], что последние имеют максимальные аксиальные неравномерности выгорания топлива.

Форма пространственного распределения выгорания существенным образом определяется величиной выгорания. Как правило, неравномерность больше на начальных этапах работы сборок, а с ростом глубины выгорания распределение «уплощается», приближаясь к равномерному. Поэтому каждый тип топливных сборок рассматривался в пяти группах по средним глубинам выгорания (ширина интервала приблизительно соответствует одной микрокампании топлива): до 15 ГВт-сут/т У; 15 – 25 ГВт-сут/т У; 25 – 35 ГВт-сут/т У; 35 – 45 ГВт-сут/т У; более 45 ГВт-сут/т У.

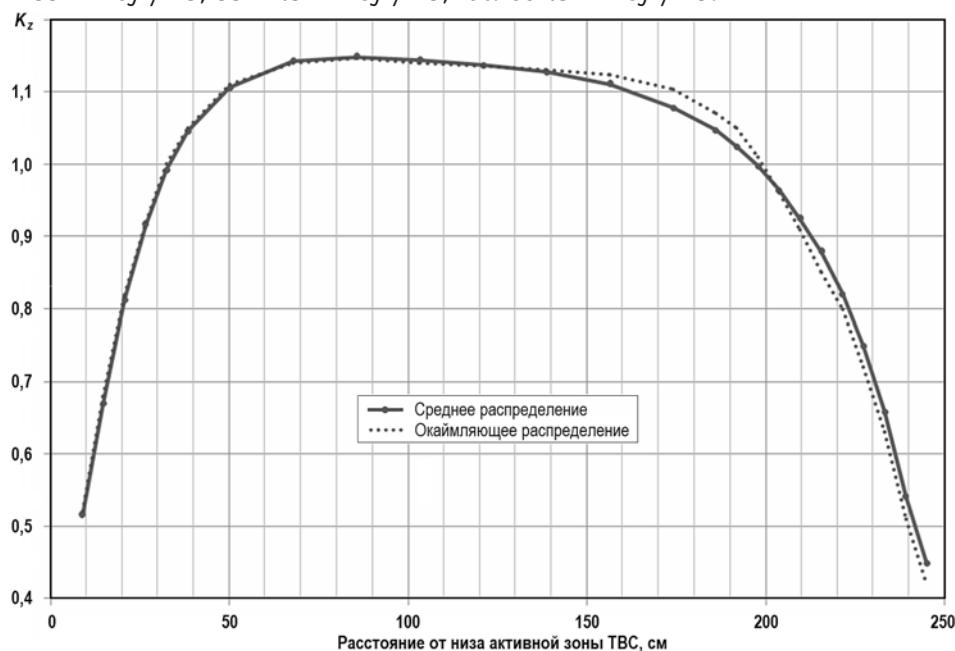


Рис. 3. Высотное распределение выгорания ОЯТ в РК с начальным обогащением 4.4% и средним по ОТВС выгоранием в интервале 25 – 35 ГВт-сут/т

Характерные профили определялись как средние для каждого типа РК или ТВС АРК в каждом интервале выгорания. *Окаймляющие* профили можно определить прямыми расчетами $K_{эфф}$ для каждого имевшегося профиля. Такой подход дает исчерпывающий результат, но при большом количестве выгруженных из реакторов ОТВС его трудно реализовать. Окаймляющий профиль определялся как профиль, обеспечивающий минимальное (относительно среднего) выгорание на концах активных зон среди всех рас-

смаатриваемых в группе ОТВС.

В работе использовались аксиальные неравномерности выгорания топлива, содержащиеся в базе данных Кольской АЭС «КАСКАД» [3 – 5]. Проведен анализ профилей более 20000 выгруженных ОТВС ВВЭР-440.

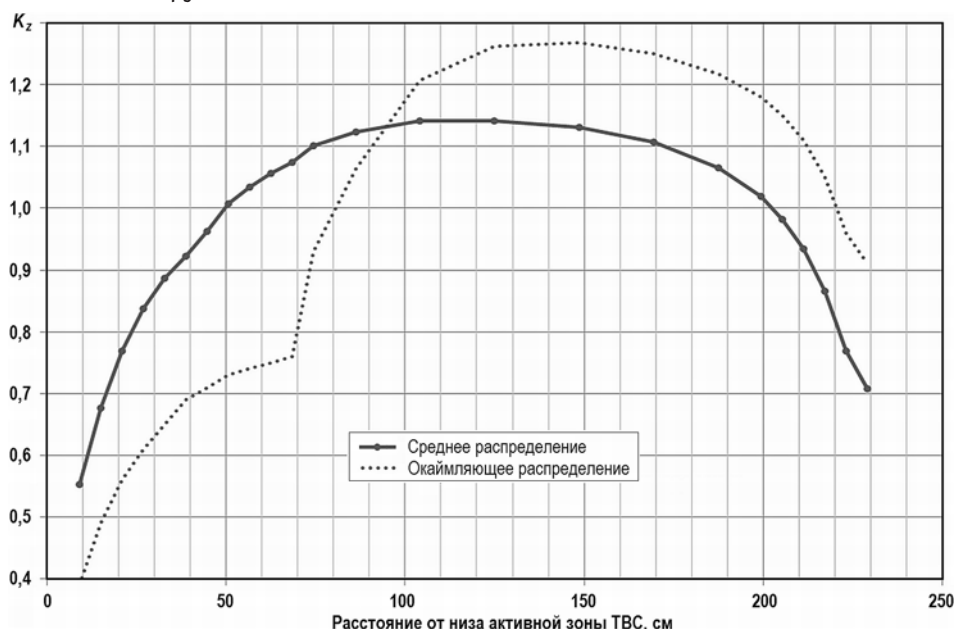


Рис. 4. Высотное распределение (профиль) выгорания ОЯТ в ТВС АРК с начальным обогащением 3,6% со средним по ОТВС выгоранием в интервале 25–35 ГВт·сут/т

На Кольской АЭС используются оптимальные режимы выгорания топлива, вследствие чего средние и окаймляющие профили при выгорании рабочих кассет (РК) практически мало отличаются во всех группах выгорания.

На рисунках 3, 4 приведены соответствующие примеры аксиальных распределений для ТВС РК и ТВС АРК.

Расчеты $K_{эфф}$ проводились с помощью аттестованного программного комплекса ММКФК-2 [6] и с использованием следующих основных актинидов: U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 и Pu-242 («Actinide-OnlyBurnupCredit»).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов величин $\Delta K_{эфф}$ (конечный эффект), согласно соотношению (1), для отдельных типов рассмотренных РК и ТВС АРК приведены на рис. 5, 6 и в табл. 1, 2. Расчеты проводились для глубин выгорания, соответствующих серединам определенных выше энергетических интервалов. При этом осколки деления не учитывались.

На рисунках 5, 6 приняты следующие обозначения графиков зависимости $K_{эфф}$ от различных высотных распределений средних по ОТВС величин выгорания топлива

- 1 – среднее распределение (профиля) при выгорании 10 ГВт·сут/т;
- 2 – окаймляющее распределение среднего выгорания 10 ГВт·сут/т;
- 3 – равномерное распределение среднего выгорания 10 ГВт·сут/т;
- 4 – среднее распределение (профиля) при выгорании 20 ГВт·сут/т;
- 5 – окаймляющее распределение среднего выгорания 20 ГВт·сут/т;
- 6 – равномерное распределение среднего выгорания 20 ГВт·сут/т;
- 7 – среднее распределение (профиля) при выгорании 30 ГВт·сут/т;
- 8 – окаймляющее распределение среднего выгорания 30 ГВт·сут/т;
- 9 – равномерное распределения среднего выгорания 30 ГВт·сут/т;

- 10 – среднее распределение (профиля) при выгорании 40 ГВт-сут/т;
 11 – ойкаймляющее распределение среднего выгорания 40 ГВт-сут/т;
 12 – равномерное распределение среднего выгорания 40 ГВт-сут/т.

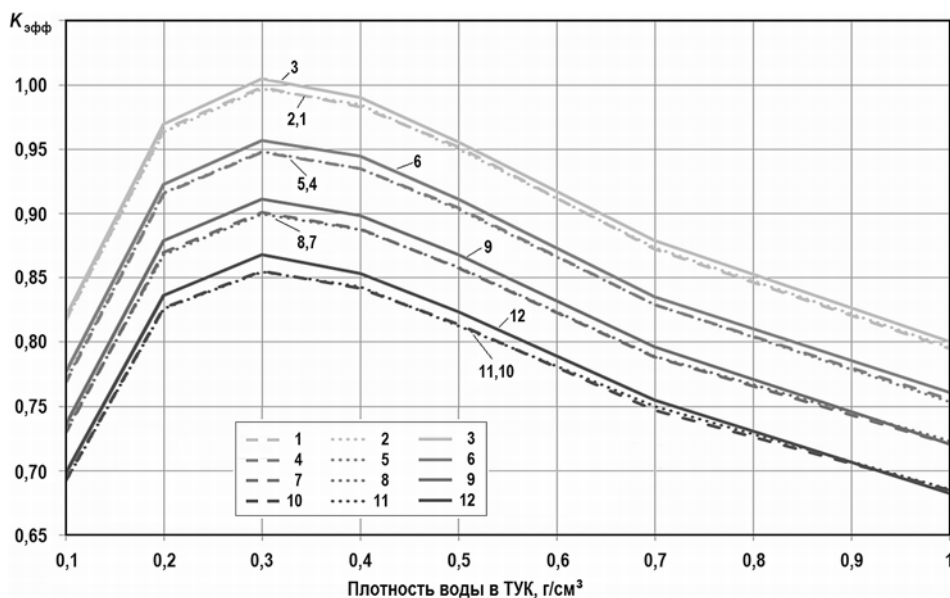


Рис. 5. Зависимость $K_{эфф}$ ТУК-6, загруженного ОТВС ВВЭР-440 (РК) с 3,6%-ным начальным обогащением и выгоранием 10, 20, 30 и 40 ГВт-сут/т, от плотности воды в контейнере и для различных профилей выгорания ОЯТ по длине ОТВС (обозначения графиков см. в тексте)

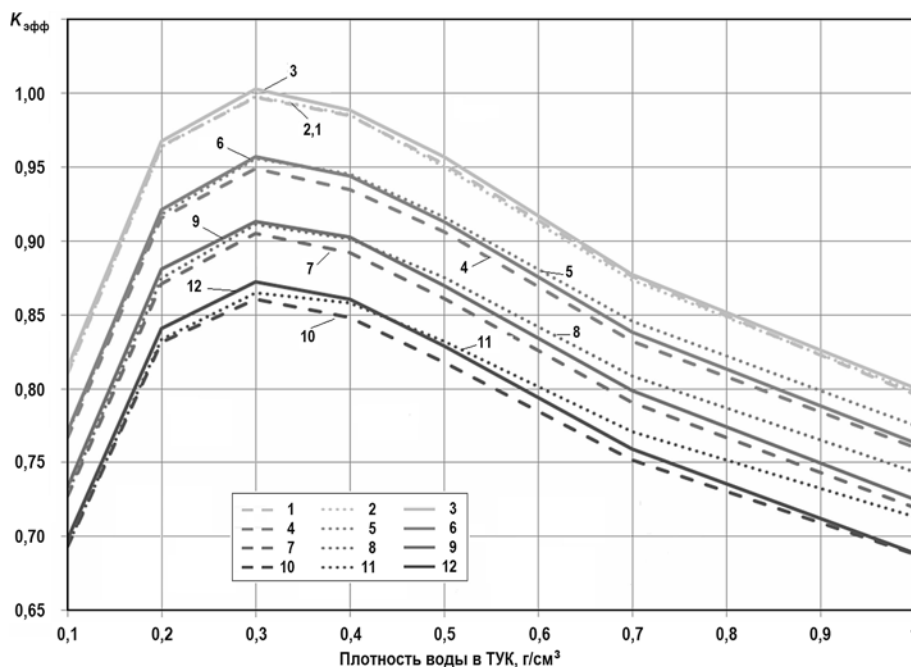


Рис. 6. Зависимость $K_{эфф}$ ТУК-6, загруженного ОТВС ВВЭР-440 (ТВС АРК) с 3,6%-ным начальным обогащением и выгоранием 10, 20, 30 и 40 ГВт-сут/т, от плотности воды в контейнере и для различных профилей выгорания ОЯТ по длине ОТВС (обозначения графиков см. в тексте)

Анализ результатов расчетов показал, что для всех типов рабочих кассет ВВЭР-440 (РК) практически во всем интервале изменения плотности воды в ТУК-6 равномерное

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

распределение выгорания топлива по длине ОТВС позволяет получить консервативную оценку величины $K_{эфф}$ ТУК. Исключение может составить узкая область плотностей воды в районе 1 г/см^3 . Аналогичный вывод можно сделать и для средних (характерных) по выгрузке профилей выгорания ОЯТ ТВС АРК.

Таблица 1

Величина $\Delta K_{эфф}$ для ТУК-6, загруженного ОТВС ВВЭР-440 (РК) с 3,6%-ным начальным обогащением и средним выгоранием 10, 20, 30 и 40 ГВт·сут/т в зависимости от плотности воды в контейнере и степени аксиальной неравномерности выгорания ОЯТ

Плотность воды, г/см^3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1
Среднее распределение – 10 ГВт·сут/т	–0.002	–0.004	–0.007	–0.007	–0.004	–0.007	–0.006
Окаймляющее – 10 ГВт·сут/т	–0.003	–0.006	–0.008	–0.005	–0.006	–0.006	–0.005
Среднее распределение – 20 ГВт·сут/т	–0.008	–0.007	–0.009	–0.010	–0.007	–0.006	–0.006
Окаймляющее – 20 ГВт·сут/т	–0.006	–0.006	–0.009	–0.010	–0.008	–0.006	–0.007
Среднее распределение – 30 ГВт·сут/т	–0.006	–0.009	–0.011	–0.011	–0.011	–0.008	0.000
Окаймляющее – 30 ГВт·сут/т	–0.004	–0.011	–0.011	–0.011	–0.010	–0.007	0.002
Среднее распределение – 40 ГВт·сут/т	–0.005	–0.010	–0.013	–0.011	–0.010	–0.008	0.003
Окаймляющее – 40 ГВт·сут/т	–0.006	–0.010	–0.013	–0.010	–0.011	–0.005	0.003

Таблица 2

Величина $\Delta K_{эфф}$ для ТУК-6, загруженного ОТВС ВВЭР-440 (ТВС АРК) с 3,6%-ным начальным обогащением и средним выгоранием 10, 20, 30 и 40 ГВт·сут/т в зависимости от плотности воды в контейнере и степени аксиальной неравномерности выгорания ОЯТ

Плотность воды, г/см^3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1
Среднее распределение – 10 ГВт·сут/т	–0.004	–0.003	–0.006	–0.004	–0.005	–0.001	–0.004
Окаймляющее – 10 ГВт·сут/т	–0.004	–0.004	–0.005	–0.003	–0.007	–0.004	–0.003
Среднее распределение – 20 ГВт·сут/т	–0.005	–0.006	–0.008	–0.009	–0.007	–0.006	–0.003
Окаймляющее – 20 ГВт·сут/т	–0.001	–0.003	–0.001	0.000	0.003	0.008	0.012
Среднее распределение – 30 ГВт·сут/т	–0.006	–0.010	–0.008	–0.010	–0.009	–0.008	–0.006
Окаймляющее – 30 ГВт·сут/т	–0.004	–0.006	–0.002	–0.001	0.005	0.010	0.018
Среднее распределение – 40 ГВт·сут/т	–0.005	–0.009	–0.012	–0.013	–0.011	–0.008	0.000
Окаймляющее – 40 ГВт·сут/т	–0.004	–0.007	–0.008	–0.003	0.003	0.012	0.025

Однако в случае использования окаймляющих распределений при обосновании транспортирования отработавших ТВС АРК значения $K_{эфф}$ могут быть больше соответствующих значений для равномерных распределений выгорания при плотностях воды в ТУК более $0,5 \text{ г/см}^3$.

Расчеты показывают, что максимальные значения $K_{эфф}$ ТУК достигаются при плотности воды в контейнере, равной $0,3 \text{ г/см}^3$. Для этого интервала плотностей воды равномерное распределение выгорания дает консервативную оценку $K_{эфф}$ и для ТВС АРК.

Таким образом, использование равномерного распределения выгорания топлива по высоте ОТВС позволяет получить консервативную оценку $K_{эфф}$ ТУК для всех типов сборок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов по оценке влияния аксиального распределения глубины выгорания ОТВС на значение $K_{эфф}$, полученные в работе, показали, что эффект аксиального распределения глубины выгорания на $K_{эфф}$ контейнеров зависит не только от степени неравномерности глубины выгорания, но и от конструкции контейнера. ТУК-6 не имеет поглотителей нейтронов, поэтому при уменьшении плотности воды значение $K_{эфф}$ увеличивается и достигает максимума при плотности воды $0,3 \text{ г/см}^3$. $\Delta K_{эфф}$, характеризующее влияние неравномерности выгорания по высоте на $K_{эфф}$, становится отрицательным в области плотностей воды от $0,1$ до $0,9 \text{ г/см}^3$. Таким образом, модель равномерного распределения выгорания топлива по длине ОТВС позволяет получить консервативную оценку величины $K_{эфф}$ ТУК-6 для глубины выгорания до 40 ГВт-сут/т в нормальных условиях и аварийных ситуациях.

Контейнер GBC-32 имеет поглотители нейтронов. Максимальное значение $K_{эфф}$ наблюдается при плотности воды 1 г/см^3 , при которой $\Delta K_{эфф}$ благодаря аксиальному распределению выгорания может достигать положительного значения, равного $0,1$ при выгорании 50 ГВт-сут/т . Поэтому в расчетах $K_{эфф}$ необходимо учитывать неравномерность распределения глубины выгорания.

Авторы благодарят рецензента и ответственного секретаря редакции за ценные замечания, позволившие улучшить качество работы.

Литература

1. *Wagner J.C., DeHart M.D., Parks C.V.* Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses. NUREG/CR-6801. ORNL. 2003 г.
2. *Hegyi G.* Influence of the Axial Burnup Credit Application in VVER System. ICNC-99. France. 1999. P. 1654.
3. Аттестационный паспорт программного средства. Название программного средства БИПР-7А (Версия 1.5). Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 241. Дата выдачи 23.09.2008 г. Разработчик – РНЦ «Курчатовский институт».
4. Аттестационный паспорт программного средства. Название программного средства ПЕР-МАК-А (Версия 1.5). Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 240. Дата выдачи 23.09.2008 г. Разработчик – РНЦ «Курчатовский институт».
5. Аттестационный паспорт программного средства. Название программного средства ТВС-РАД (Версия 1.0). Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 282. Дата выдачи 09.12.2010 г. Разработчик – РНЦ «Курчатовский институт».
6. *Полевой В.Б., Тарасова О.Б.* Базовый пакет комплекса программ ММКФК-2 для расчета методом Монте-Карло задач переноса нейтрона в физике реакторов. Аттестационный паспорт ПС № 134. РНЦ «Курчатовский институт». 2001 г.

Поступила в редакцию 26.02.2015 г.

Авторы

Внуков Виктор Сергеевич, ведущий научный сотрудник, кандидат техн. наук.

E-mail: vsviridov@ippe.ru

Куликов Владимир Иванович, главный специалист отдела, кандидат техн. наук.

E-mail: vkulikov@givnpiet.ru

Чкуасели Лидия Иосифовна, научный сотрудник

E-mail: vsviridov@ippe.ru

UDC 611.036.546.3

THE INFLUENCE OF AXIAL-BURNUP DISTRIBUTION ON K_{eff} FOR CASKS WITH SPENT FUELVnukov V.S.*, Kulikov V.I.**, Chkuaseli L.I.*

* State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

** Scientific Research and Design Institute for Energy Technologies ATOMPROEKT. 82, Savuchkina st., St-Petersburg, 197183 Russia.

ABSTRACT

This article presents axial burnup data and evaluates the effects of axial-burnup on K_{eff} for american cask GBC-32 storage and transportation spent fuel PWR and russian cask TUK-6 spent fuel VVER-440. The concept of taking credit for the reduction in reactivity due to fuel burnup is commonly referred to as «burnup credit». The reduction in reactivity that occurs with fuel burnup is due to the change concentration of fissile nuclides and the production of actinide and fissile-product neutron absorbers. This reduction reactivity is dependent upon the axial and horizontal variation of burnup. The horizontal variation of burnup has been investigated elsewhere and shown to have a relatively minor in part on neutron multiplication in a typical burnup credit. In contrast, the axial burnup profile has a significant impact on reactivity and therefore is an impotent of a burnup credit safety analysis. Great number axial profiles different assemblies PWR and VVER-440 was performed to evaluate. The difference in the neutron multiplication factor (K_{eff}) between a calculation of axial-burnup distribution and a calculation that assumes uniform axial-burnup has become known as end effect (ΔK).

Cask GBC-32 have neutron absorbers. Cask TUK-6 have not neutron absorbers. The end effect increases with burnup and becomes positive at burnup higher 20 GWd/MTU.

ΔK becomes negative for burnup from 10 to 40 GWd/MTU for cask TUK-6 in water density from 0.1 to 0.9 g/cm³. This conclusion is possible used in nuclear safety analysis TUK-6 in normal and accident situation.

Key words: burnup, nuclear safety, spent fuel, cask, storage, transportation, axial-burnup, distribution.

REFERENCES

1. Wagner J.C., DeHart M.D., Parks C.V. Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses. NUREG/CR-6801. ORNL. 2003 r.
2. Hegyi G. Influence of the Axial Burnup Credit Application in VVER System. ICNC-99. France. 1999. p. 1654.
3. Attestacionnyj pasport programmogo sredstva. Nazvanie programmogo sredstva: BIPR-7A (Versiya 1.5). Registracionnyj nomer pasporta attestacii PC: № 241. Data vydachi 23.09.2008. Razrabotchik: RNC «Kurchatovskiy institut» (in Russian).
4. Attestacionnyj pasport programmogo sredstva. Nazvanie programmogo sredstva: PERMAK-A (Versiya 1.5). Registracionnyj nomer pasporta attestacii PC: № 240. Data vydachi 23.09.2008. Razrabotchik: RNC «Kurchatovskiy institut» (in Russian).
5. Attestacionnyj pasport programmogo sredstva. Nazvanie programmogo sredstva: TWC-RAD (Versiya 1.0). Registracionnyj nomer pasporta attestacii PC: № 282. Data vydachi 09.12.2010. Razrabotchik: NIC «Kurchatovskiy institut».
6. Polevoi V.B., Tarasova O.B. Bazovyy paket kompleksa programm MMKFK-2 dlya raschyota metodom Monte-Karlo zadach perenosu neitronov v fizike reaktorov. Attestacionnyj passport PS No. 134. RNC «Kurchatovskiy institut» (in Russian).

Authors

Vnukov Viktor Sergeevich, Leading Researcher E-mail: vsviridov@ippe.ruKulikov Vladimir Ivanovich, Chief Specialist E-mail: vkulikov@givnpiet.ruChkuaseli Lidiya Iosifovna, Scientific Worker E-mail: vsviridov@ippe.ru