

## Оценка влияния неопределенности в исходных данных на результаты анализа критичности ядерного топлива

Приведены полученные с помощью расчетного комплекса SCALE-4.4 результаты расчетной оценки влияния технологических допусков изготовления и неопределенности исходных данных по геометрическому и материальному составу элементов тепловыделяющей сборки (ТВС) ВВЭР-1000 на результаты расчета критичности ядерного топлива. Определена наиболее консервативная совокупность параметров в пределах производственной погрешности с точки зрения влияния на размножающие свойства топливной системы. Проанализирована зависимость размножающих свойств от температуры материалов ТВС.

**Ключевые слова:** неопределенность, ВВЭР-1000, коэффициент размножения нейтронов, критичность, SCALE.

**Є. І. Білодід, П. Ковбасенко**

### Оцінка впливу невизначеності у вихідних даних на результати аналізу критичності ядерного палива

Наведено отримані за допомогою розрахункового комплексу SCALE-4.4 результати розрахункової оцінки впливу технологічних допусків на виготовлення та невизначеності вихідних даних з геометричного й матеріального складу елементів тепловидільної збірки (ТВЗ) ВВЕР-1000 на результати розрахунку критичності ядерного палива. Визначено найбільш консервативну сукупність параметрів у межах виробничої похибки з точки зору впливу на розмножувальні властивості паливної системи. Проаналізовано залежність розмножувальних властивостей від температури матеріалів ТВЗ.

**Ключові слова:** невизначеність, ВВЕР-1000, коефіцієнт розмноження нейтронів, критичність, SCALE.

© Е. И. Белодед, Ю. П. Ковбасенко, 2015

При численном моделировании систем хранения и транспортировки ядерного топлива существуют неопределенности в значениях ряда моделируемых параметров. Как правило, к таким параметрам относятся геометрические характеристики, материальный состав отдельных элементов и условия эксплуатации систем.

В настоящей работе проанализированы неопределенности, связанные с наличием технологических допусков при изготовлении тепловыделяющих сборок (ТВС) и возможными колебаниями температуры окружающей среды при их хранении. Согласно нормативным требованиям в области ядерной безопасности, все неопределенности должны учитываться с применением консервативного подхода, т. е. из возможного диапазона параметров необходимо выбирать такие их значения, которые приводят к наибольшему значению эффективного коэффициента размножения нейтронов системы. Из этого требования вытекает необходимость оценки консервативности принимаемых допущений при выполнении нейтронно-физических расчетов.

Приведенные в статье результаты получены при помощи расчетного комплекса SCALE-4.4a [1].

### Исходные данные

ТВС реакторов ВВЭР-1000 состоит из 312 тепловыделяющих элементов длиной 3,84 м и диаметром 9,1 мм каждый. Твэлы реакторов ВВЭР имеют оболочку, изготовленную из сплава Zr-Nb (1 %), и komponуются в массив с треугольной решеткой с шагом 12,75 мм. В качестве ядерного топлива используются таблетки из UO<sub>2</sub> с центральным отверстием диаметром 2,4 мм. Помимо твэлов в состав ТВС ВВЭР-1000 входят 18 направляющих каналов из нержавеющей стали с внешним диаметром 12,6 мм и толщиной стенки 0,8 мм, в которые вводятся стержни системы управления и защиты (СУЗ) или стержни выгорающего поглотителя. В центре топливной кассеты расположена центральная труба из циркониевого сплава, предназначенная для фиксации дистанционирующих решеток и размещения внутриреакторных датчиков.

### Основные параметры ТВС ВВЭР-1000 [2]

#### Топливный стержень

Высота топливного столба (горячего) . . .	3530 мм
Таблетка . . . . .	UO <sub>2</sub>
Внешний радиус . . . . .	0,3765 см
Диаметр центрального отверстия таблетки . . . . .	2,4 мм

#### Оболочка топливного стержня

Внутренний радиус . . . . .	0,386 см
Внешний радиус . . . . .	0,455 см
Плотность . . . . .	6,45157 г/см <sup>3</sup>
Состав (в весовых процентах) . . . . .	Zr (98,97 %), Nb (1 %), Hf (0,03 %)

#### Центральная труба

Внутренний радиус . . . . .	0,48 см
Внешний радиус . . . . .	0,56 см
Плотность . . . . .	6,45157 г/см <sup>3</sup>
Состав (в весовых процентах) . . . . .	Zr (98,97 %), Nb (1 %), Hf (0,03 %)

<i>Направляющий канал</i>	
Внутренний радиус . . . . .	0,55 см
Внешний радиус . . . . .	0,63 см
Плотность . . . . .	7,9 г/см <sup>3</sup>
Состав (в весовых процентах) . . . . .	Сталь (Fe — 69,5 %, Cr — 18 %, Ni — 11 %, Mn — 1,5 %)

<i>TBC</i>	
Тип . . . . .	Шестигранная решетка
Шаг решетки . . . . .	12,75 мм
Количество элементов в решетке . . . . .	331
Количество топливных стержней . . . . .	312
Количество поглощающих элементов/стержней с выгорающим поглотителем . . . . .	18
Масса топлива (UO <sub>2</sub> ) . . . . .	455,52 кг
Обогащение по <sup>235</sup> U . . . . .	1,6; 2,0; 3,0; 3,3; 3,6; 4,23, 4,4 %

**Описание программы и расчетной модели, использованных в расчетах критичности**

**Описание программного комплекса.** Расчеты критичности, результаты которых использованы в данной работе, проводились с использованием монте-карловского кода KENO-VI из программного комплекса SCALE 4.4a [1].

Программный комплекс SCALE разработан в Ок-Риджской Национальной лаборатории США по заказу Комиссии по ядерному регулированию США (US NRC). Целью разработки данной системы кодов был анализ критичности, радиационной безопасности, теплотермодинамики и выгорания. Начиная с первого выпуска SCALE в 1980 году, этот пакет программ постоянно используется многими организациями как в США, так и во всем мире для моделирования систем обращения со свежим и отработавшим топливом.

Наиболее полно вопрос применимости пакета SCALE-4.4a и его библиотек нейтронно-физических констант для расчета критичности систем хранения и транспортировки топлива реакторов ВВЭР рассмотрен в [3]. Расчеты, в соответствии с результатами работы [3], проводились с использованием стандартной 44-групповой библиотеки нейтронно-физических констант пакета, основанной на файлах оцененных данных ENDF/B-V, которая при хорошей корреляции расчетных и экспериментальных данных дает некоторое завышение расчетных значений коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  по сравнению с экспериментальными данными.

**Описание условий расчетов.** Расчеты проводились для модели, представляющей собой бесконечную во всех направлениях решетку TBC реактора ВВЭР-1000 за счет использования на границах TBC граничных условий зеркального отражения. При этом в горизонтальном (поперечном) направлении шаг размещения TBC выбирался равным шагу расположения TBC в реакторе и составлял 23,6 см. Результаты расчетов представлены в виде  $k_{эфф} \pm 3\sigma$ , где  $\sigma$  — статистическая погрешность определения  $k_{эфф}$  методом Монте-Карло, что соответствует доверительному интервалу в 99 %.

TBC моделировались потвзельно и в полную высоту. Размещение элементов TBC, их геометрия и материальный состав соответствовали кассете ВВЭР-1000 [2]. Столб

топливных таблеток внутри оболочки твэла моделировался в виде сплошного уранового стержня с центральным отверстием. Эффективная плотность этого стержня определялась исходя из общей массы топлива в кассете. Для упрощения модели концевые элементы TBC и дистанционирующие решетки замещались водой.

Если не указано другое, все элементы кассеты моделировались при комнатной температуре (20 °C). Плотность воды принималась равной 1 г/см<sup>3</sup>, количество поколений нейтронов — равным 4000, количество нейтронов в поколении — 5000, т. е. общее количество историй составляет 20 млн. Это количество историй нейтронов является достаточным для обеспечения статистической погрешности определения коэффициента размножения нейтронов методом Монте-Карло  $\sigma(k_{эфф}) \approx 0,0001$ . Анализ результатов проводился по величине абсолютного отклонения  $\Delta$  от выбранного базового значения.

**Результаты анализа**

**Оценка влияния неопределенности в исходных данных на результаты анализа критичности реактора.** При расчетах приходится сталкиваться, в одном случае, с ситуацией, когда некоторые исходные данные по материальному составу, геометрическим характеристикам, условиям эксплуатации TBC неизвестны или не определены достаточно достоверно. В другом случае, любой технологический процесс, в том числе и производство TBC, имеет свои допуски при изготовлении, которые, согласно [4], необходимо учитывать при анализе ядерной безопасности. В обоих случаях задача состоит в выборе консервативных параметров модели TBC.

Для анализа влияния допусков при изготовлении были приняты следующие исходные данные:

Внутренний диаметр оболочки твэла . . .	7,72 <sup>+0.08</sup> мм
Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке . . . . .	2,4 <sup>+0.2</sup> мм
Наружный диаметр оболочки твэла . . .	9,1 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.05</sub> мм
Наружный диаметр топливной таблетки . . . . .	7,53 <sub>-0.04</sub> мм
Загрузка UO <sub>2</sub> . . . . .	455±4,5 кг

Результаты и описание расчетов сведены в табл. 1.

В базовой конфигурации TBC выбраны номинальные геометрические параметры, за исключением обогащения топлива, принятого в консервативную сторону и не изменяемого в данном анализе.

Заметим, что о влиянии рассматриваемого параметра на  $k_{эфф}$  может идти речь только при разности величин, большей  $3\sigma$  ( $\sigma$  — статистическая погрешность определения рассматриваемой характеристики). Это связано с тем, что при нормальном распределении какой-либо характеристики вероятность попадания истинного значения в интервал  $\pm 3\sigma$  составляет 99,73 %.

В конфигурациях 2.1 и 2.2 (см. табл. 1) исследовалось влияние нейтронно-физических свойств материала оболочки твэлов на размножающие свойства TBC за счет уменьшения толщины стенки оболочки (конфигурация 2.1) или уменьшения количества замедлителя между твэлами вследствие уменьшения проходного сечения (конфигурация 2.2). При этом внутренний диаметр оболочки твэлов изменялся на величину технологического допуска в сторону

Таблица 1. Влияние геометрических допусков на размножающие свойства бесконечной решетки ТВС

Расчетная конфигурация	$k_{эфф} \pm 3\sigma$	$\Delta$
1. Базовая конфигурация: плотность топлива 10,44 г/см <sup>3</sup> ; обогащение 4,45 %; расчет без стержней СУЗ; центральная трубка — Zr+1 %Nb; направляющие каналы — сталь 08X18H10T; масса топлива в ТВС 455,52 + 4,5 = 460,02 кг; зеркальные граничные условия	1,4540 ± 0,0003	—
2. Внутренний диаметр оболочки твэла 7,72 + 0,08 = 7,8 мм:		
2.1. Наружный диаметр не меняется	1,4549 ± 0,0003	0,0009
2.2. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 + 0,08 = 9,18 мм, т. е. сохраняется толщина стенки	1,4532 ± 0,0003	-0,0008
3. Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке 2,4 + 0,2 = 2,6 мм:		
3.1. Плотность топлива остается такой же, как в базовой конфигурации	1,4553 ± 0,0003	0,0013
3.2. Плотность топлива пересчитывается с сохранением общей массы топлива в ТВС	1,4550 ± 0,0003	0,0010
4. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 + 0,08 = 9,18 мм	1,4519 ± 0,0003	-0,0021
5. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 - 0,05 = 9,05 мм	1,4553 ± 0,0003	0,0013
6. Наружный диаметр топливной таблетки 7,53 - 0,04 = 7,49 мм		
6.1. Плотность топлива остается такой же, как в базовой конфигурации	1,4545 ± 0,0003	0,0005
6.2. Плотность топлива пересчитывается с сохранением общей массы топлива в ТВС	1,4543 ± 0,0003	0,0003
7. Масса топлива в ТВС 455,52 кг	1,4543 ± 0,0003	0,0003
8. Масса топлива в ТВС 455,52 - 4,5 = 450,5 кг	1,4543 ± 0,0003	0,0003
9. Наиболее консервативная конфигурация: диаметр осевого отверстия в топливной таблетке 2,4+0,2=2,6 мм; внутренний диаметр оболочки твэла 7,72+0,08=7,8 мм; наружный диаметр оболочки твэла 9,1-0,05=9,05 мм; наружный диаметр топливной таблетки 7,53...7,49 мм; плотность топлива такая же, как в базовой конфигурации	1,4577 ± 0,0003	0,0037

увеличения. Таким образом, в первом случае анализировалось влияние нейтронно-физических свойств оболочки твэлов на  $k_{\infty}$  в случае ее утонения, во втором случае — увеличение перекрытия твэлов друг другом и, как следствие, уменьшение замедления в теплоносителе и ужесточение спектра. Как видно из полученных результатов (табл. 1), утонение оболочки твэлов ведет к увеличению  $k_{\infty}$ , а увеличение наружного диаметра оболочки твэлов — к его снижению.

Как известно, процесс взаимодействия нейтронов с топливной композицией характеризуется эффектом самоэкранирования (преимущественного поглощения тепловых нейтронов поверхностными слоями твэлов). При наличии центрального отверстия в топливной таблетке эффект самоэкранирования может присутствовать как на ее внешней границе, так и на внутренней. Оценить баланс процессов экранирования и поглощения в топливном стержне при изменении внутреннего и наружного диаметров топливной таблетки позволяют конфигурации 3 и 6. Плотность топлива оставалась такой же, как и в базовой конфигурации (конфигурации 3.1, 6.1), либо пересчитывалась согласно новым геометрическим характеристикам топливного стержня (конфигурации 3.2, 6.2). Полученные результаты свидетельствуют о двукратном преобладании

влияния изменения диаметра осевого отверстия твэлов над влиянием изменения наружного диаметра твэлов. При этом увеличение внутреннего отверстия твэлов приводит к увеличению  $k_{\infty}$ .

Помимо процессов поглощения и замедления нейтронов, происходящих в оболочке твэлов, большое влияние на размножающие свойства ядерного топлива оказывает количество замедлителя между твэлами. Изменение количества замедлителя между твэлами смещает спектр нейтронов в область более высоких или низких энергий, что приводит в рассматриваемой системе к изменению количества актов деления. Конфигурации 4 и 5 дают возможность оценить влияние толщины оболочки твэла с изменением количества теплоносителя между твэлами. Как видно из приведенных в табл. 1 результатов, увеличение наружного диаметра оболочки твэлов приводит к снижению  $k_{\infty}$  и, наоборот, его уменьшение ведет к пропорциональному увеличению размножающих свойств топлива.

Конфигурации 1, 7 и 8 демонстрируют влияние консервативности в оценке массы топлива в ТВС. Согласно результатам расчетов, влияние отклонения массы топлива в пределах 1 % от номинального значения на размножающие свойства рассматриваемой расчетной системы отсутствует.

Таблица 2. Влияние геометрических допусков при изготовлении элементов ТВС на размножающие свойства контейнера хранения ОТВС

Расчетная конфигурация	$k_{эфф} \pm 3\sigma$	$\Delta$
1. Базовая конфигурация: плотность топлива 10,44 г/см <sup>3</sup> ; обогащение 4,45 %; расчет без стержней СУЗ; центральная трубка — Zr + 1 % Nb; направляющие каналы — сталь 08X18H10T; масса топлива в ТВС 455,52 + 4,5 = 460,02 кг; зеркальные граничные условия	1,0006 ± 0,0003	—
2. Внутренний диаметр оболочки твэла 7,72 + 0,08 = 7,8 мм:		
2.1. Наружный диаметр не меняется	1,0010 ± 0,0003	0,0004
2.2. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 + 0,08 = 9,18 мм, т. е. сохраняется толщина стенки	0,9976 ± 0,0003	-0,0030
3. Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке 2,4 + 0,2 = 2,6 мм:		
3.1. Плотность топлива остается такой же, как в базовой конфигурации	0,9982 ± 0,0003	-0,0024
3.2. Плотность топлива пересчитывается с сохранением общей массы топлива в ТВС	1,0013 ± 0,0003	0,0007
4. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 + 0,08 = 9,18 мм	0,9972 ± 0,0003	-0,0034
5. Наружный диаметр оболочки твэла 9,1 - 0,05 = 9,05 мм	1,0026 ± 0,0003	0,0020
6. Наружный диаметр топливной таблетки 7,53 - 0,04 = 7,49 мм:		
6.1. Плотность топлива остается такой же, как в базовой конфигурации	0,9991 ± 0,0003	-0,0015
6.2. Плотность топлива пересчитывается с сохранением общей массы топлива в ТВС	1,0006 ± 0,0003	0,0000
7. Масса топлива в ТВС 455,52 кг	0,9991 ± 0,0003	-0,0015
8. Масса топлива в ТВС 455,52 - 4,5 = 450,5 кг	0,9976 ± 0,0003	-0,0030
9. Наиболее консервативная конфигурация: внутренний диаметр осевого отверстия в топливной таблетке 2,4 + 0,2 = 2,6 мм; наружный диаметр топливной таблетки 7,53 - 0,04 = 7,49 мм; внутренний диаметр оболочки твэла 7,72 + 0,08 = 7,8 мм; наружный диаметр оболочки твэла 9,1 - 0,05 = 9,05 мм; плотность топлива пересчитывается с сохранением общей массы топлива в ТВС	1,0035 ± 0,0003	0,0029

Как видно из расчета наиболее консервативной конфигурации (сочетающей изменение всех рассмотренных параметров в сторону увеличения размножающих свойств) по вариантам 1—8, относительное изменение коэффициента размножения нейтронов составило 0,25 %.

Аналогичные расчеты проведены для одиночной корзины хранения ВКХ-ВВЭР хранилища отработавшего ядерного топлива сухого типа на Запорожской АЭС (табл. 2).

Как видно из представленных результатов, при консервативном учете погрешностей максимальное относительное отклонение эффективного коэффициента размножения

нейтронов составляет 0,29 % и незначительно отличается от полученного в табл. 1 значения для бесконечной решетки (0,25 %).

**Оценка влияния условий моделирования на результаты анализа критичности реактора.** Выполняя оценку ядерной безопасности при составлении модели размножающей среды, необходимо руководствоваться принципом консерватизма. Это относится, в частности, к температуре материалов ТВС. Сравнение размножающих свойств бесконечной решетки ТВС при изменении физической характеристики топлива и замедлителя представлено в табл. 3.

Таблица 3. Влияние температуры элементов ТВС

Расчетная конфигурация	$k_{эфф} \pm 3\sigma$	$\Delta$
Базовая конфигурация: плотность топлива 10,44 г/см <sup>3</sup> ; обогащение 4,45 %; расчет без учета поглощающего материала стержней СУЗ; зеркальные граничные условия	1,4540 ± 0,0003	—
Повышение температуры замедлителя на 100 °С без изменения плотности	1,4532 ± 0,0003	-0,0008
Повышение температуры топлива на 100 °С без изменения плотности	1,4496 ± 0,0003	-0,0044

Из полученных результатов следует, что изменение температуры топлива оказывает значительно большее влияние на результаты расчета коэффициента размножения нейтронов, чем изменение температуры замедлителя.

### Выводы

В статье рассмотрено влияние технологических допусков и неопределенности исходных данных по геометрическому и материальному составу элементов ТВС на ее размножающие свойства. Определена наиболее консервативная совокупность параметров в пределах производственной погрешности с точки зрения влияния на размножающие свойства топливной системы:

диаметр внутреннего отверстия в топливной таблетке (сильное влияние);

внутренний диаметр оболочки твэла (сильное влияние);

наружный диаметр оболочки твэла (слабое влияние);

масса (плотность) топлива (сильное влияние).

В целом можно отметить, что рассмотренные изменения проектных значений приводят к незначительному изменению размножающих свойств как бесконечной решетки ТВС, так и системы хранения ОТВС (не более 0,3 %  $k_{эфф}$ ).

Анализ зависимости размножающих свойств бесконечной решетки ТВС от температуры материалов ТВС показывает большее влияние изменения температуры топлива на коэффициент размножения нейтронов, чем такое же повышение температуры замедлителя (без учета изменения плотности материалов).

### Список использованной литературы

1. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.

2. Комплекс кассет ВВЭР-1000 (тип В-302, В-320, В-338). Каталогное описание : У 0401.04.00.000 ДКО-ЛУ / ОАО «НЗКХ». — Новосибирск, 2003. — 47 с.

3. NUREG/CR-6736, PNNL-13694. Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs / Y. Kovbasenko, V. Khalimonchuk, A. Kuchin, Y. Bilodid, M. Yeremenko, O. Dudka. — Washington : U.S.NRC, 2002. — 325 p.

4. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики : ПНАЭГ-14-029-91 : утв. Постановлением Госпроматомнадзора СССР от 31.10.1991 № 12 ; введ. в действие с 01.07.1992. — М. ЦНИИАтоминформ, 1992. — 21 с.

### References

1. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.

2. Set of Fuel Assemblies for VVER-1000 (V-302, V-320, V-338). Catalogue Number: U 0401.04.00.000 DKO-LU, Novosibirsk Chemical Concentrates Plant, Novosibirsk, 2003. — 47 p.

3. Kovbasenko, Yu., Khalimonchuk, V., Kuchin, A., Bilodid, Ye., Yeremenko, M., Dudka, O. (2002), NUREG/CR-6736, PNNL-13694. Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs, Washington, U.S.NRC, 325 p.

4. "Safety Rules for Storage and Transport of Nuclear Fuel at Nuclear Facilities", PNAEG-14-029-91 [Pravila bezopasnosti pri khranenii i transportirovke yadernogo topliva na ob'ektakh atomnoi energetiki], approved by Ordinance of USSR Gospromatomnadzor No. 12 dated 31 October 1991, put into force on 01 July 1992, Moscow, CNEEAAtomInform, 1992, 29 p. (Rus)

Получено 25.06.2015.