

С. А. Солдатов, С. В. Черницкий,  
С. Н. Леонов

Национальный научный центр  
«Харьковский физико-технический институт», г. Харьков,  
Украина

## Определение систематической ошибки и дисперсии расчётной последовательности CSAS26 пакета программ SCALE-5 для гексагональной геометрии

Проведена валидация пакета программ SCALE версий 5.0 и 5.1 для моделирования топлива реакторов ВВЭР-1000 при выполнении расчетов по критичности. Определена систематическая погрешность и дисперсия расчётной последовательности CSAS26 пакета SCALE, ответственной за выполнение расчетов по критичности, на основе моделирования 60 критических экспериментов.

Ключевые слова: SCALE, валидация, коэффициент размножения нейтронов, критический эксперимент, систематическая ошибка, дисперсия.

С. А. Солдатов, С. В. Черницкий, С. М. Леонов

Визначення систематичної похибки та дисперсії розрахункової послідовності CSAS26 пакета програм SCALE-5 для гексагональної геометрії

Виконано валідацію пакета програм SCALE версій 5.0 та 5.1 для моделювання палива реакторів ВВЕР-1000 у розрахунках за критичністю. Визначено систематичну похибку та дисперсію розрахункової послідовності CSAS26 пакета SCALE, яка відповідає за виконання розрахунків за критичністю, на основі моделювання 60 критичних експериментів.

Ключові слова: SCALE, валідація, коефіцієнт розмноження нейтронів, критичний експеримент, систематична похибка, дисперсія.

© С. А. Солдатов, С. В. Черницкий, С. Н. Леонов, 2011

SCALE — Модульная система стандартизированного компьютерного анализа для лицензирования — была разработана Ок-Риджской Национальной лабораторией США по заказу Комиссии ядерного регулирования США (US NRC) для проведения анализа критичности, радиационной безопасности, теплопередачи и выгорания. Начиная с первого выпуска в 1980 г., пакет программ SCALE постоянно используется многими организациями как в США, так и в других странах, для моделирования систем обращения со свежим и отработавшим топливом, а также хранилищ ядерного топлива. В Украине этот пакет программ используется различными организациями для проведения анализа ядерной безопасности при обращении с топливом реакторов ВВЭР-1000.

Пакет программ SCALE — это многофункциональный программный комплекс, выполняющий различные типы расчетов путем вызова так называемых расчетных последовательностей. Расчеты критичности выполняются вызовом расчетной последовательности CSAS26 (Criticality Safety Analysis Sequences). Эта расчетная последовательность вызывает функциональные модули BONAMI, NITAWL и KENO-VI. Основным модулем по расчету критичности является модуль KENO-VI, для которого модули BONAMI и NITAWL готовят многогрупповую библиотеку сечений для материалов, определенных в расчете. Традиционно в различных версиях пакета доступны следующие библиотеки нейтронных сечений: 27-групповая библиотека 27GROUPNDF4, 44-групповая библиотека 44GROUPNDF5 и 238-групповая библиотека 238GROUPNDF5.

Использование этих библиотек в расчетах по ядерной безопасности ставит естественный вопрос о точности расчета коэффициента размножения нейтронов для топлива реакторов ВВЭР-1000. В 2001 г. сотрудниками Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности (ГНТЦ ЯРБ) была предпринята, пожалуй, первая в Украине попытка получить ответ на этот вопрос [1]. Версии 4.3 и 4.4а пакета программ SCALE были валидированы для применения к топливу реакторов типа ВВЭР-1000 и РБМК. Результаты валидационных расчетов показали, что 44-групповая библиотека 44GROUPNDF5 при хорошей корреляции расчетных и экспериментальных данных дает некоторое завышение расчетных значений коэффициента размножения нейтронов по сравнению с экспериментальными данными и может быть рекомендована для расчетов по критичности.

С момента выхода первой версии SCALE прошло уже 30 лет. За этот период времени выпущены новые версии включительно до 6.0 (февраль 2009 г. [2]). Последние официально выпущенные версии SCALE могут быть заказаны на сайте RSICC (Radiation Safety Information Computational Center [3]) путем оформления через интернет в режиме online соответствующей заявки. Таким образом Харьковский физико-технический институт официально получил версии SCALE 5.0 и 5.1 (соответственно в 2004 и 2009 гг.). При использовании этих версий для расчетов по ядерной безопасности возникает тот же вопрос о точности расчета коэффициента размножения нейтронов.

Настоящая работа посвящена валидации пакета SCALE версий 5.0 и 5.1 на основе моделирования критических экспериментов, проведенных в Институте атомной энергии (Венгрия) и Российском научном центре «Курчатовский институт» для гексагональных решеток с шагом расстановки твэлов 12,7 мм. Цель валидации — установить законность применения пакета SCALE версий 5.0 и 5.1 к топливу

реакторов ВВЭР-1000 для выполнения критических расчетов и определить систематическую погрешность и дисперсию расчетной последовательности CSAS26, ответственной за выполнение критических расчетов.

**Описание критических экспериментов.** Исходные данные для построения моделей тестовых критических экспериментов были взяты из ICSBEP Handbook [4]. ICSBEP (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project) — это международный проект, основанный в 1992 г., целью которого являются сбор, проверка и редактирование результатов тестовых критических экспериментов, компиляция этих данных в стандартном формате, а также поверочный расчет каждого критического эксперимента с использованием стандартных кодов по анализу ядерной безопасности и официальный выпуск сводной базы данных тестовых критических экспериментов.

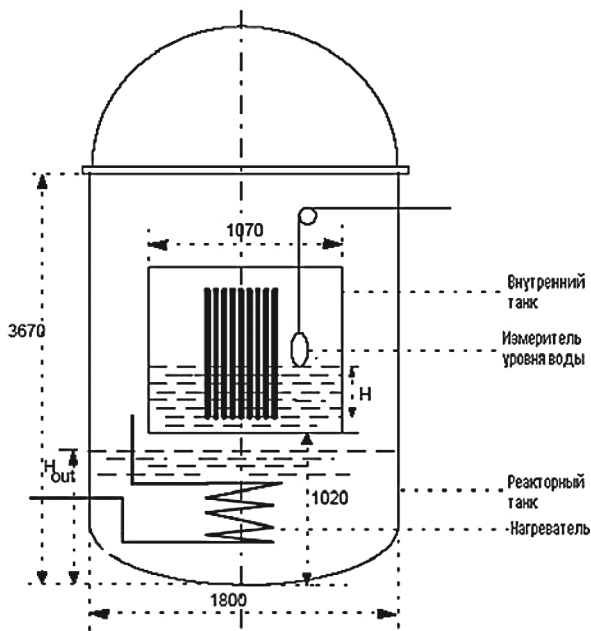


Рис. 1. Схема реактора ZR-6M

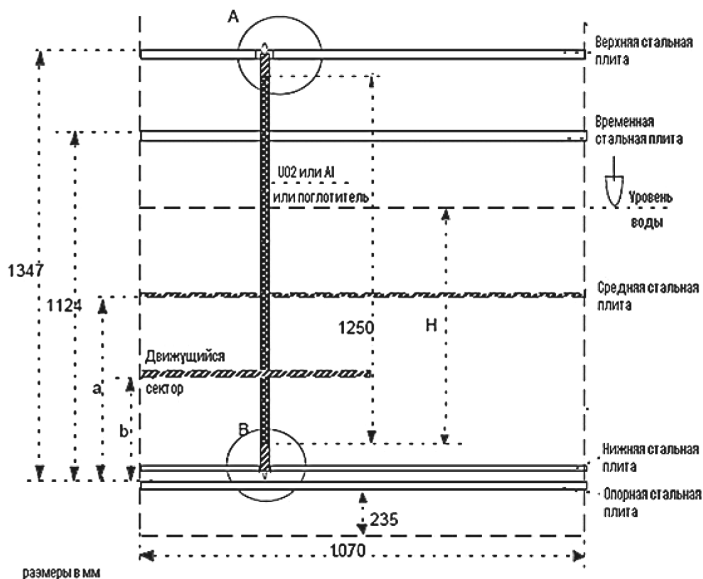


Рис. 2. Схема активной зоны реактора

Из всей совокупности данных критических экспериментов, приведенных в ICSBEP Handbook, отбирались эксперименты для гексагональных решеток с топливом из низкообогащенного урана (до 5 масс. % по  $^{235}\text{U}$ ). Под эту категорию критических экспериментов попали эксперименты, выполненные в Институте атомной энергии (Венгрия) в период с 1973 по 1979 г. на реакторной установке ZR-6M [5]. Из 257 критических экспериментов было отобрано 52. Кроме того, было отобрано ещё 8 критических экспериментов, проведенных в Курчатовском институте [6]. Основным критерием отбора экспериментов служил шаг решетки расстановки твэлов — 12,7 мм. Эта величина почти совпадает с шагом решетки (12,75 мм), который применяется в ТВС, поставляемых на атомные станции Украины. Спектр экспериментов достаточно широк: они проводились как с обычной, так и борированной водой; при компоновках активной зоны использовалось топливо обогащения от 1,6 до 4,4 масс. % по  $^{235}\text{U}$ , а также поглотители и вытеснители.

Общий схематический вид экспериментальной установки ZR-6M представлен на рис. 1. Активная зона (рис. 2) размещена во внутреннем стальном баке цилиндрической формы с внутренним диаметром 1070 мм, толщиной стенки 4 мм и высотой 1800 мм. Внутренний бак с активной зоной помещен во внешний реакторный бак больших размеров (внутренний диаметр бака 1800 мм, высота 3670 мм и толщина стенки 8 мм). Дно внутреннего бака размещено на расстоянии 1020 мм от дна внешнего реакторного бака.

Для фиксации топливных стержней активной зоны используются верхняя и нижняя дистанцирующие стальные плиты. Нижняя опорная плита, на которой держится вся конструкция активной зоны, располагается на расстоянии 235 мм от дна внутреннего бака. Верхняя дистанцирующая плита толщиной 14 мм располагается на высоте 1347 мм относительно опорной плиты толщиной 20 мм. Толщина нижней дистанцирующей плиты — 5 мм, а толщина средней дистанцирующей плиты меняется от 3 до 6 мм в зависимости от конфигурации эксперимента. Плиты держатся на четырех стальных вертикальных опорах диаметром 48 мм каждая, которые располагаются по углам квадрата с размерами 680×680 мм.

Внутренний и внешний баки реактора не изолированы, а связаны между собой таким образом, что изменение уровня воды в одном из баков ведёт к изменению уровня воды в другом баке. Изменением уровня воды во внутреннем баке достигалось условие равенства единице коэффициента размножения нейтронов ( $k_{eff} = 1$ ), что соответствует условию критического эксперимента. Проводимые эксперименты были «холодные»: температура замедлителя в реакторе Института атомной энергии равнялась 21 °С, а в реакторе Курчатовского института — 18 °С. В ранних экспериментах внешний реакторный бак был открыт, однако в более поздних экспериментах закрывался крышкой.

Основными отличиями исследовательского реактора Курчатовского института от реактора ZR-6M является отсутствие внутреннего бака и наличие шести стальных вертикальных опор (диаметр 20 мм), расположенных по окружности диаметром 925 мм.

На рис. 3 представлена схема твэла, используемого в критических экспериментах. Каждый твэл содержит 581,3 г  $\text{UO}_2$  различного обогащения (1,6; 3,6 и 4,4 масс. % по  $^{235}\text{U}$ ) в цилиндрическом объёме диаметром 7,6 мм и высотой 1250 мм. При обогащении топлива 1,6 и 3,6 масс. % по  $^{235}\text{U}$

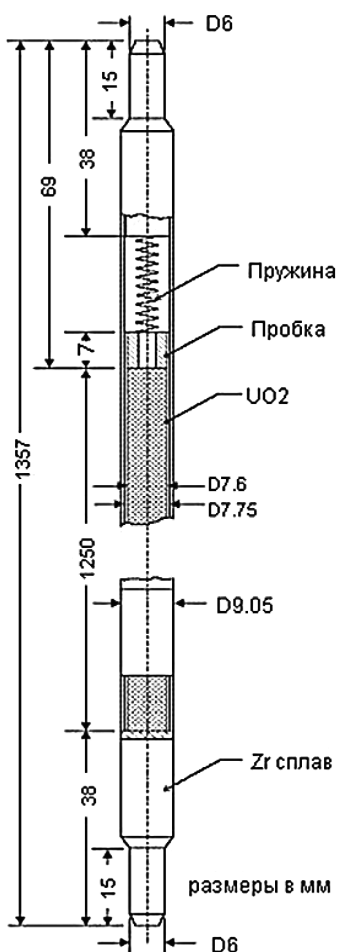


Рис. 3. Чертеж топливного стержня

в качестве замедлителя использовалась вода, а при обогащении топлива 4,4 — вода с растворенной в ней борной кислотой.

Загрузка активной зоны для каждого отобранного эксперимента формировалась на основе картограмм загрузки. В качестве примера на рис. 4 показана картограмма загрузки для реактора ZR-6М в 30-градусной симметрии. Числами на картограмме обозначаются типы топливных элементов.

Соответствие между числом и типом топливного элемента определялось по таблице, приведенной в [5].

Для завершения определения конфигурации эксперимента из другой таблицы брались дополнительные данные, определяющие тип решетки, положение средней дистанцирующей плиты, ее толщину и положение уровня воды, соответствующее критическому состоянию.

Тип решетки определялся последовательностью чисел, разделенных наклонной чертой и обозначающих величину шага решетки в миллиметрах, обогащение топлива в твэлах в массовых процентах и концентрацию борной кислоты в граммах на кубический дециметр.

Для критических экспериментов Курчатовского института схема загрузки активной зоны также задавалась в виде картограмм загрузки (рис. 5). Кроме того, каждый эксперимент сопровождался описанием используемых поглотителей или вытеснителей, обогащения топлива и уровня воды в реакторе, обеспечивающего критическое состояние [6].

Карта зоны №201

0	1
1	1
2	1 1
3	1 1
4	1 1 1
5	1 1 1
6	1 1 1 1
7	1 1 1 1
8	1 1 1 1 1
9	1 1 1 1 1
10	1 1 1 1 1 1
11	1 1 1 1 1 1
12	1 1 1 1 1 1
13	1 1 1 1 1 1 1
14	1 1 1 1 1 1 1 2
15	1 1 1 1 1 3 3 5
16	2 2 2 3 3 4 6 7 7
17	4 4 6 6 7 7 8 8 8
18	6 6 7 8 8 8 8 9 9 9
19	8 8 8 8 8 9 9 9 9 9
20	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9
21	9 9 9 9 9 9 9 9 9 10 10
22	9 9 9 9 9 9 9 9 10 10 10 10
23	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
24	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0 0
25	10 10 10 10 10 10 10 10 10 0 0 0 0
26	10 10 10 10 10 10 0 0 0 0 0 0 0 0

h2/h1 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

Рис. 4. Картограмма загрузки активной зоны реактора ZR-6М в 30-градусной симметрии

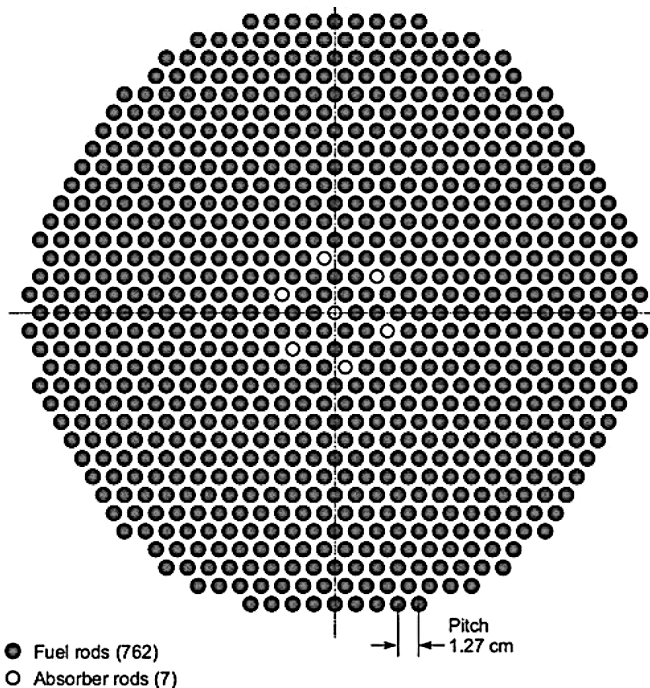


Рис. 5. Картограмма загрузки для реактора Курчатовского института

лей или вытеснителей, обогащения топлива и уровня воды в реакторе, обеспечивающего критическое состояние [6].

**Результаты расчётов.** Систематическая ошибка и дисперсия, присущие пакету программ SCALE версий 5.0 и 5.1, определялись на основе моделирования 60 отобранных

критических экспериментов. При разработке моделей детально учитывались условия критических экспериментов: геометрия топливных элементов, обогащение, компоновка активной зоны, температура и уровень замедлителя в емкостях реактора, наличие поглотителей в активной зоне и т. д. Для одного и того же эксперимента создавались расчетные модели с использованием различных многогрупповых библиотек нейтронных сечений, чтобы определить систематическую ошибку, присущую этой библиотеке. Многогрупповые библиотеки зависят от конкретной расчетной модели, т. е. являются проблемно-зависимыми, и подготавливаются соответствующими функциональными модулями пакета программ SCALE при запуске расчетного задания на выполнение. При подготовке этих библиотек применяются различные методы учета эффекта самоэкранировки в резонансной области. В версии 5.0 пакета SCALE по умолчанию используется метод Нордгейма расчета резонансных интегралов и метод Бондаренко для учета эффекта самоэкранировки, которые реализованы, соответственно, в функциональных модулях NITAWL и BONAMI.

В версии 5.1 подготовка многогрупповых библиотек основана на расчете непрерывного спектра нейтронов путем использования разных детерминистских методов решения транспортного уравнения Больцмана в одномерной (1-D) геометрии или в бесконечной среде. Этот метод реализован в функциональном модуле CENTRM (Continuous ENergy TRansport Module), в котором с высокой точностью вычисляются угловые зависимости спектра нейтронов. Затем вычисленные спектры используются как проблемно-зависимые весовые функции для усреднения по энергетическим группам. Это многогрупповое усреднение осуществляется функциональным модулем PMC, который считывает непрерывные энергетические спектры и нейтронные сечения, подготовленные модулем CENTRM, вычисляет проблемно-зависимые многогрупповые сечения, усредненные по данным энергетическим интервалам, и записывает полученные данные в соответствующую AMPX библиотеку. Полученная таким образом многогрупповая библиотека нейтронных сечений используется для последующих многомерных расчетов, выполняемых многогрупповыми кодами Монте-Карло, такими как KENO V.a или KENO-VI, входящими в состав пакета SCALE.

Пакет SCALE валидировался, соответственно, для 27-, 44- и 238-групповых библиотек в версии 5.0 и 44- и 238-групповых библиотек в версии 5.1. Для версии 5.0 в случае 27-групповой библиотеки расчёты выполнялись только для 49 экспериментов. Это связано с тем, что в 27-групповой библиотеке отсутствует диспрозий, который использовался в качестве поглощающего материала в 11 экспериментах. В версии 5.1 27-групповая библиотека исключена из списка доступных библиотек, поэтому расчеты проводились только для 44- и 238-групповых библиотек. Для каждого эксперимента расчет выполнялся по 3503 поколениям нейтронов с 6000 нейтронов в каждом поколении.

В табл. 1 приведены результаты валидационных расчетов для отобранных критических экспериментов. Результаты в таблице представлены как отклонение расчетного значения  $k_{eff}$  от критического значения, т. е. разности величины коэффициента размножения нейтронов, полученной в расчете, и 1 — величины коэффициента размножения нейтронов в критическом эксперименте. Во всех проведенных расчетах статистическая ошибка в среднем равнялась  $1,8 \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 1. Результаты валидационных расчетов SCALE 5.0 (NITAWL, BONAMI) и SCALE 5.1 (CENTRM)

№ эксперимента	$(k_{eff}-1)$ , SCALE 5.0			$(k_{eff}-1)$ , SCALE 5.1	
	27 групп	44 группы	238 групп	44 группы	238 групп
Критические эксперименты Института атомной энергии (Венгрия)					
11	-0,00644	-0,00209	-0,00520	-0,00251	-0,00684
12a	-0,00761	-0,00256	-0,00606	-0,00350	-0,00774
12b	-0,00474	0,00086	-0,00280	0,00019	-0,00373
14b	-0,00456	0,00105	-0,00248	0,00040	-0,00333
18b	-0,00547	0,00037	-0,00281	-0,00040	-0,00388
29	-0,00465	0,00142	-0,00250	0,00046	-0,00359
30	-0,00514	0,00066	-0,00296	0,00022	-0,00350
36	-0,00584	0,00034	-0,00278	-0,00020	-0,00390
37	-0,00407	0,00218	-0,00046	0,00184	-0,00171
83	-0,01569	-0,01106	-0,01523	-0,00647	-0,01023
84	-0,01059	-0,00730	-0,01005	-0,00239	-0,00890
85	-0,00885	-0,00518	-0,00851	-0,00639	-0,00996
86	-0,01038	-0,00723	-0,01040	-0,00581	-0,00969
90	-0,00927	-0,00534	-0,00944	-0,00350	-0,00976
91	-0,00963	-0,00537	-0,00965	-0,00726	-0,01070
92	-0,01166	-0,00755	-0,01128	-0,00851	-0,01256
110	-0,01003	-0,00579	-0,00975	-0,00605	-0,01070
111	-0,00690	-0,00314	-0,00682	-0,00360	-0,00763
112	-0,01495	-0,00904	-0,01203	-0,00965	-0,00965
138	-0,01113	-0,00679	-0,01007	-0,01012	-0,00979
142	-0,01231	-0,00694	-0,01086	-0,01100	-0,01064
147	-0,00887	-0,00375	-0,00704	-0,00740	-0,00727
154	-0,00827	-0,00336	-0,00720	-0,00383	-0,01327
156	-0,00534	-0,00092	-0,00444	0,00209	-0,00594
156-1	-0,00554	-0,00148	-0,00403	0,00106	-0,00604
157	-0,00820	-0,00357	-0,00707	-0,00008	-0,00580
158	-0,00836	-0,00299	-0,00671	-0,00051	-0,00586
158-1	-0,00837	-0,00337	-0,00714	-0,00433	-0,00840
158-2	-0,00868	-0,00382	-0,00740	-0,00673	-0,00730
158-3	-0,00823	-0,00302	-0,00659	-0,00397	-0,00858
158-4	-0,00814	-0,00335	-0,00727	-0,00451	-0,00890
158-6	-0,00804	-0,00315	-0,00684	-0,00375	-0,00808
158-7	-0,00833	-0,00350	-0,00694	-0,00424	-0,00850
160	-0,00981	-0,00403	-0,00642	-0,00406	-0,00835
161	-0,00513	0,00053	-0,00264	-0,00403	-0,00786
162	-0,00728	-0,00162	-0,00550	-0,00395	-0,00832
163	-0,00514	0,00071	-0,00201	-0,00400	-0,00775
164	-0,00914	-0,00461	-0,00842	0,00021	-0,00379
166	-0,00788	-0,00385	-0,00755	-0,00288	-0,00704

Табл. 1 (окончание)

№ эксперимента	$(k_{eff}-1)$ , SCALE 5.0			$(k_{eff}-1)$ , SCALE 5.1	
	27 групп	44 группы	238 групп	44 группы	238 групп
169	-0,00753	-0,00223	-0,00562	0,00023	-0,00289
170	-0,00666	-0,00190	-0,00547	-0,00550	-0,00962
171	0,00609	0,01090	0,00753	-0,00426	-0,00885
172	0,00577	0,01023	0,00661	-0,00341	-0,00791
173	0,00433	0,00911	0,00524	-0,00400	-0,00556
174	0,00325	0,00800	0,00443	0,00704	0,00703
175	0,00153	0,00622	0,00272	0,00997	0,00560
176	0,00880	0,01273	0,00878	0,00553	0,00548
188	-0,01643	-0,00600	-0,01104	0,00422	0,00435
195	-0,01611	-0,00644	-0,01079	0,00564	0,00155
155	-0,00644	-0,00209	-0,00520	-0,00251	-0,00684
155-1	-0,00761	-0,00256	-0,00606	-0,00350	-0,00774
158-5	-0,00474	0,00086	-0,00280	0,00019	-0,00373
Критические эксперименты Курчатовского института					
1	-	0,00559	-0,00242	0,00931	0,00860
2	-	0,00436	-0,00281	-0,00653	-0,01253
3	-	-0,00287	-0,00694	-0,00666	-0,01273
4	-	0,00210	-0,00132	0,00292	-0,00247
5	-	0,00203	-0,00192	0,00228	-0,00305
6	-	0,00740	0,00109	0,00623	0,00107
7	-	0,00736	0,00113	0,00606	0,00047
8	-	0,01060	0,00401	0,00892	0,00314

Последующая статистическая обработка полученных результатов проводилась следующим образом [7]: по формуле (1) рассчитывалось систематическое отклонение как средняя величина отклонения коэффициента размножения нейтронов от 1 во всех экспериментах; по формуле (2) — дисперсия систематического отклонения.

$$\Delta k_{bias} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (1 - k_i), \quad (1)$$

$$\sigma_m^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - k_{ave})^2 \frac{1}{\sigma_i^2}}{(n-1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} + \sigma_{ave}^2, \quad (2)$$

где  $k_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{1}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$ ;  $\sigma_{ave}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2$ ;  $k_i$  — расчетное значение коэффициента размножения нейтронов  $i$ -го критического эксперимента;  $\sigma_i$  — расчетное значение дисперсии коэффициента размножения нейтронов  $i$ -го эксперимента.

Результаты обработки по формулам (1) и (2) проведенных расчетов для версий 5.0 и 5.1 пакета SCALE приведены, соответственно, в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Систематическая ошибка и дисперсия, пакет SCALE, версия 5.0

Кол-во групп	$\Delta k_{bias}$	$\sigma_m^2$	$M_{95/95}$
27	0,006849	0,005294 <sup>2</sup>	2,070
44	0,000527	0,005479 <sup>2</sup>	2,022
238	0,004434	0,005199 <sup>2</sup>	2,022

Таблица 3. Систематическая ошибка и дисперсия, пакет SCALE, версия 5.1

Кол-во групп	$\Delta k_{bias}$	$\sigma_m^2$	$M_{95/95}$
44	0,001400	0,005076 <sup>2</sup>	2,022
238	0,005397	0,005203 <sup>2</sup>	2,022

Наличие систематического отклонения во всех многогрупповых библиотеках версий 5.0 и 5.1 пакета SCALE требует учета этих отклонений при подготовке окончательного значения коэффициента размножения нейтронов. Для этого можно воспользоваться формулой

$$k_{95/95} = k_{KENO} + \Delta k_{bias} + M_{95/95} \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{KENO}^2}, \quad (3)$$

где  $k_{KENO}$  — коэффициент размножения нейтронов, рассчитанный модулем KENO-VI, который вызывается расчетной последовательностью CSAS26 при выполнении критических расчетов;  $\sigma_{KENO}^2$  — дисперсия, соответствующая расчету;  $\Delta k_{bias}$  — систематическое отклонение;  $\sigma_m^2$  — дисперсия систематического отклонения;  $M_{95/95}$  — коэффициент Оуэна уровня 95/95, определяемый количеством критических экспериментов, использованных в анализе.

Формула (3) определяет конечную величину коэффициента размножения нейтронов уровня 95/95, означающую, что он не будет превышен в 95 % случаев с вероятностью 95 %.

Значения коэффициентов Оуэна  $M_{95/95}$  можно найти в [8]. В частности, значения этих коэффициентов для 60 и 49 экспериментов, соответственно, равны  $M_{95/95}^{[60]} = 2,022$  и  $M_{95/95}^{[49]} = 2,070$ . Положительные значения систематического отклонения, полученные по результатам анализа, указывают на то, что расчетная последовательность CSAS26 пакета программ SCALE-5 и SCALE-5.1 при выполнении расчетов по критичности систематически недооценивает величину коэффициента размножения нейтронов.

### Выводы

Анализ результатов тестовых расчетов критических экспериментов показал, что расчетная последовательность CSAS26 пакета программ SCALE версии 5.0 и версии 5.1 хорошо воспроизводит результаты критических экспериментов

на гексагональных решетках с шагом расстановки твэлов 12,7 мм. Расчетное значение коэффициента размножения нейтронов, полученное для всех отобранных критических экспериментов, близко к единице; максимальное отличие от единицы для всех многогрупповых библиотек находится в пределах от  $-0,01643$  до  $+0,01273$ . Общая тенденция, наблюдаемая для обеих версий пакета SCALE и для всех библиотек, — недооценка величины коэффициента размножения нейтронов, т. е. результаты расчетов со значениями меньше 1 появляются чаще, чем результаты со значениями больше 1. Так, для версии 5.0 наблюдается следующая ситуация: 27-групповая библиотека — 6 расчетных значений из 49 больше 1; 44-групповая библиотека — 25 расчетных значений из 60 больше 1; 238-групповая библиотека — 12 расчетных значений из 60 больше 1. Для версии 5.1 ситуация аналогичная: 44-групповая библиотека — 23 расчетных значения из 60 больше 1; 238-групповая библиотека — 10 расчетных значений из 60 больше 1.

В работе [5] приведены результаты расчетов критических экспериментов, полученные с помощью расчетной последовательности CSAS25 пакета программ SCALE версии 4.2. Значение коэффициента размножения нейтронов, полученное в этих расчетах, также ниже единицы, что указывает на систематическую недооценку величины коэффициента размножения нейтронов и предыдущими версиями пакета SCALE.

Систематическая недооценка величины коэффициента размножения нейтронов, присущая расчетной последовательности CSAS26 пакета SCALE, может быть учтена при подготовке окончательного результата. Для этого можно воспользоваться формулой (3), определяющей величину коэффициента размножения нейтронов, которая не может быть превышена в 95 % случаев с 95 % вероятностью. Значения систематического отклонения и его дисперсии для формулы (3) можно взять из табл. 2 и 3 в зависимости от того, какой версией пакета SCALE и с какой многогрупповой библиотекой был выполнен расчет. Поскольку каждой версии пакета SCALE и любой из доступных многогрупповых библиотек присущи свои систематическое отклонение и дисперсия, то не имеет особого смысла отдавать предпочтение той или иной версии и многогрупповой библиотеке. Авторы считают, что для проведения критических расчетов можно пользоваться любой из версий пакета (5.0 или 5.1) и любой из доступных многогрупповых библиотек, но при подготовке окончательной величины

коэффициента размножения нейтронов воспользоваться формулой (3), в которую подставить соответствующие значения систематического отклонения и дисперсии.

Проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод: пакет программ SCALE версий 5.0 и 5.1 может применяться для критических расчетов в обоснование ядерной безопасности контейнеров и хранилищ свежего и отработанного ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000.

### Список литературы

1. Koybasenko Y., Khalimonchuk V., Kuchin A., Bilodid Y., Yermenko M., Dudka O. NUREG/CR-6736, PNNL-13694 «Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs». — Washington, U.S.NRS, 2002.
2. [http://www.ornl.gov/sci/scale/news/SCALENews\\_Jan2009.pdf](http://www.ornl.gov/sci/scale/news/SCALENews_Jan2009.pdf)
3. <http://www-rsicc.ornl.gov/index.html>
4. <http://icsbep.inel.gov/>
5. Szátmáry Zóltan. The VVER experiments: regular and perturbed hexagonal lattices of low-enriched  $UO_2$  fuel rods in light water // LEU-COMP-THERM-015, NEA/NSC/DOC/(95)03, ICSBEP Handbook.
6. Alexejev Nikolai, Krainov Yuri, Kravchenko Yuri, Tchekov Victor. VVER physics experiments: hexagonal (1.27-cm pitch) lattices of  $U$  (4.4 wt.%  $^{235}U$ )  $O_2$  fuel rods in light water, perturbed by boron, hafnium, or dysprosium absorber rods, or water gap with/without empty aluminium tubes // LEU-COMP-THERM-061, NEA/NSC/DOC/(95)03, ICSBEP Handbook.
7. Худсон Д. Статистика для физиков. — М.: Мир, 1970. — 297 с.
8. Owen D. B. Factors for one-side tolerance limits and for variables sampling plans. SCR-607, Sandia Corporation Monograph, 1963.

Надійшла до редакції 08.02.2011.