

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОДА PSG2/SERPENT ДЛЯ РАСЧЕТА K_{ef} УРАН-ВОДО-ГРАФИТОВЫХ СИСТЕМ

А. А. Строганов, А. В. Курындин, А. Ю. Аникин, Д. К. Герасимов

ФБУ «НТЦ ЯРБ»

Расчет K_{ef} с использованием различных программных средств (ПС) является неотъемлемой частью анализа безопасности любых систем, содержащих ядерные делящиеся материалы. Однако любое ПС характеризуется областью применения и погрешностью, которые обычно определяются путем сопоставления результатов, полученных с помощью данного ПС, с экспериментальными значениями. Этот метод считается общепринятым и называется верификацией ПС.

В настоящей работе проведена верификация ПС PSG2/SERPENT для расчета K_{ef} уран-водо-графитовых систем на основе сопоставления с экспериментом на критическом стенде реактора РБМК, проведенном в РНЦ КИ. Полученные результаты демонстрируют высокую точность ПС PSG2/SERPENT и возможность его применения для расчета K_{ef} уран-водо-графитовых систем.

Ключевые слова: верификация, PSG2/SERPENT, РБМК-1000.

CRITICALITY CALCULATIONS OF URANIUM-WATER-GRAPHITE SYSTEMS USING PSG2/SERPENT CODE / A. A. STROGANOV, A. V. KURYNDIN, A. Y. ANIKIN, D. K. GERASIMOV // Criticality calculations using different software codes (SC) are an integral part of safety analysis of any systems containing nuclear fissile materials. However, any SC is characterized by range of application and accuracy. These characteristics usually are estimated by comparison of results calculated by SC with experimentally measured values. Such investigation is called verification.

This paper represents results the verification of PSG2/SERPENT for using in criticality calculations of uranium-water-graphite systems based on comparison of K_{ef} values, calculated by PSG2/SERPENT with experimental data measured on the RBMK critical stand by RRC KI. The results demonstrate a high accuracy of PSG2/SERPENT and possibility of using it for criticality calculations of uranium-water-graphite systems.

Key words: verification, PSG2/SERPENT, RBMK-1000.

Введение

Расчет K_{ef} с использованием различных программных средств (ПС) является неотъемлемой частью анализа безопасности любых систем, содержащих ядерные делящиеся материалы. Однако любое ПС характеризуется областью применения и погрешностью, обусловленной используемыми численными методами решения уравнений переноса нейтронов, нейтронно-физическими константами, а также принятыми расчетными упрощениями и допущениями. Общепринятым во всем мире способом определения погрешности (а также границ применимости) ПС является его верификация путем сопоставления полученных с его использованием значений с экспериментально изме-

ренными. В течение долгого времени поиск подходящего для верификации эксперимента отнимал много времени и сил.

Ситуация кардинально изменилась, когда в 1992 г. для поиска, оценки, верификации и документирования всех экспериментов, пригодных для проведения верификации нейтронно-физических кодов и ядерных данных, департаментом энергетики США (DOE) был начат проект по созданию базы данных ядерных экспериментов «Criticality Safety Benchmark Evaluation Project» (CSBEP) [1]. В 1995 г. проект приобрел международный статус и название было изменено на «International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project» (ICSBEP). На данный момент база данных «International Handbook of Evaluated

Criticality Safety Benchmark Experiments» [2] насчитывает более 3300 различных экспериментов.

В настоящей работе проведена верификация ПК PSG2/SERPENT [3] для расчета K_{ef} уран-водо-гра-фитовых систем на основе сопоставления с экспериментом [4]. В рамках данного эксперимента были исследованы 28 различных конфигураций критической сборки на основе топлива РБМК, в том числе включающих бор- и торий-содержащие поглотители.

PSG2/SERPENT [3] представляет собой программное средство, реализующее метод Монте-Карло и позволяющее проводить расчеты изменения нуклидного состава ОЯТ, а также K_{ef} сколь угодно сложных систем, используя для их описания двух- или трехмерную геометрию. Способность PSG2/SERPENT моделировать сложную геометрию позволяет проводить расчеты так называемых «full-core» систем, т. е. моделировать загрузку целого реактора с возможностью описания каждого отдельного элемента, канала или ячейки активной зоны реактора. В качестве примера на рис. 1 приведено сечение фрагмента трехмерной математической модели ТВС РБМК-1000, используемой в расчетах.

Как уже отмечалось выше, для проведения верификации был выбран эксперимент на критической сборке РБМК [4]. Помимо экспериментально измеренных значений K_{ef} описание эксперимента [4] содержит результаты расчета K_{ef} , полученные с помощью кодов MCNP [6] и MCU [7], что, в свою очередь, позволяет оценить не только применимость и погрешность кода PSG2/SERPENT [3], но и сравнить его точность с аналогичными ПК. Стоит отметить, что ранее верификация ПК PSG2/SERPENT производилась лишь в виде расчетного эксперимента на двухмерных моделях решеток ТВС легководных реакторов типа LWR и ВВЭР-440 [5].

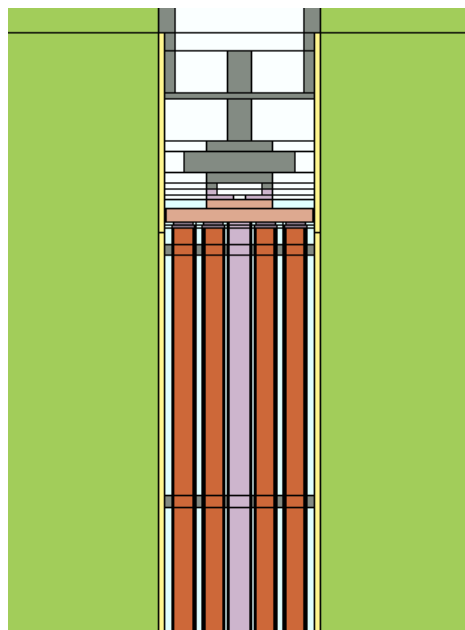


Рис. 1. ТВС РБМК-1000

Критическая сборка эксперимента [4] представляет собой графитовую кладку, содержащую 324 (18×18) канала, идентичных каналам реактора РБМК-1000, однако меньших по высоте. В эксперименте использованы ТВС, состоящие из одного пучка твэлов (ТВС реактора РБМК-1000 состоит из двух пучков), с обогащением топлива от 1,8 до 2,2 %, в том числе ТВС с дополнительными дистанционирующими решетками. Все эксперименты проводились при комнатной температуре (температура воды составляла 18 °С).

В табл. 1 описаны конфигурации, содержащие дополнительные элементы критической сборки. Конфигурации, не описанные в таблице, содержат исключительно топливные каналы.

Таблица 1

Описание конфигураций, содержащих дополнительные элементы критической сборки

№	Дополнительные элементы				
	Борсодержащий поглотитель, размещенный в водном канале	Борсодержащий поглотитель, размещенный в сухом канале	Торийсодержащий поглотитель, размещенный в водном канале	Торийсодержащий поглотитель, размещенный в сухом канале	ТВС с дополнительным числом дистанционирующих решеток
11	+	-	-	-	-
12	-	+	-	-	-
13	+	-	-	-	-
14	+	-	-	-	+
15	-	+	-	-	-
16	-	+	-	-	+

№	Дополнительные элементы				
	Борсодержащий поглотитель, размещенный в водном канале	Борсодержащий поглотитель, размещенный в сухом канале	Торийсодержащий поглотитель, размещенный в водном канале	Торийсодержащий поглотитель, размещенный в сухом канале	ТВС с дополнительным числом дистанционирующих решеток
17	+	-	-	-	-
18	+	-	-	-	-
19	-	-	+	-	-
20	-	-	+	-	-
21	-	-	-	+	-
22	-	-	-	+	-
23	-	-	+	-	-
24	-	-	+	-	-
25	-	-	+	-	-
26	-	-	+	-	-
27	-	-	-	+	-
28	-	-	-	+	-

На рис. 2 в качестве примера приведены картограммы загрузки для конфигураций № 17 и 18 эксперимента [4], а также полученные для этих конфигураций изображения распределения потока нейтронов, рассчитанного с использованием ПС PSG2/SERPENT.

Созданные с помощью PSG2/SERPENT модели всех конфигураций эксперимента максимально точно описывают все элементы системы, а также учитывают примеси, содержащиеся в материалах активной зоны.

Результаты расчета значения K_{ef} с помощью PSG2/SERPENT, а также результаты, полученные с помощью MCU и MCNP4C, приведены в табл. 2. В скобках указаны отклонения расчетных значений от экспериментальных, рассчитанных по формуле

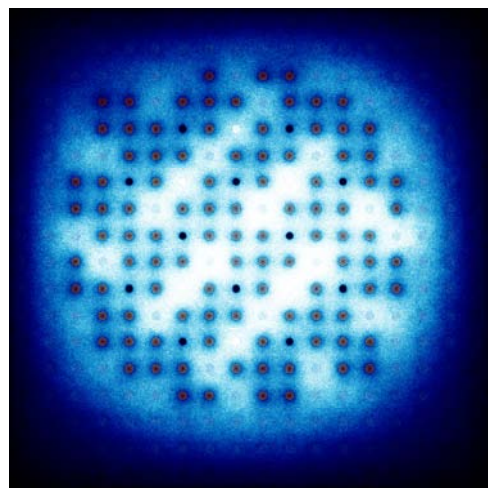
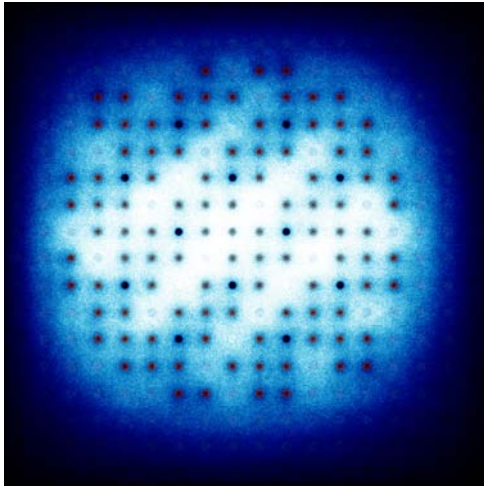
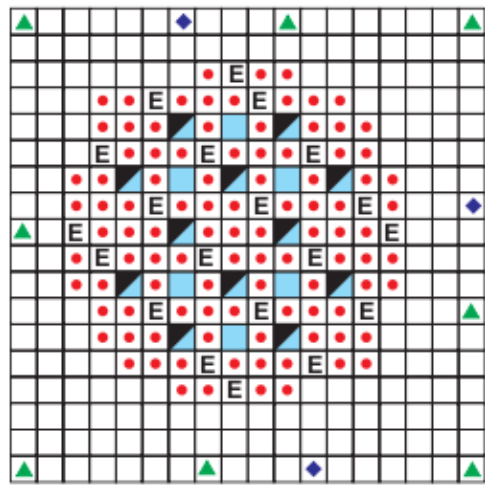
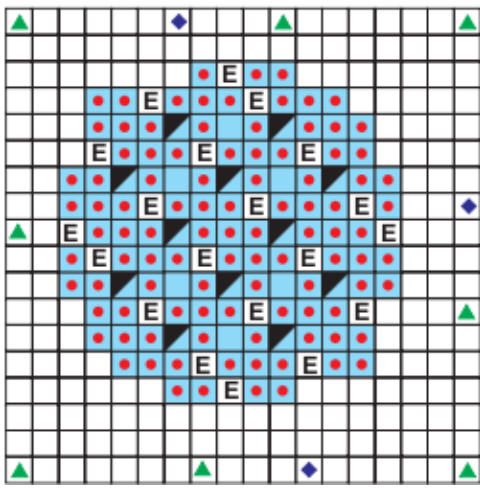
$$D = \frac{K_{ef}(i) - K_{ef}(\text{exp})}{K_{ef}(\text{exp})} 100\%, \quad (1)$$

где $K_{ef}(\text{exp})$ – экспериментальное значение коэффициента размножения нейтронов;

$K_{ef}(i)$ – расчетное значение коэффициента размножения нейтронов для i -го кода.

Полученные результаты демонстрируют, что программное средство PSG2/SERPENT позволяет проводить расчеты K_{ef} уран-водо-графитовых сборок различных конфигураций. Точность расчетов не уступает, а в некоторых случаях даже превосходит точность аналогичных ПС. Стоит также отметить, что программное средство PSG2/SERPENT не уступает и по количеству сервисного инструментария и широким возможностям параметризации расчета.

Проведенная верификация программного средства PSG2/SERPENT позволяет сделать выводы о его применимости для исследования задач ядерной безопасности активной зоны реактора РБМК в широком диапазоне изменений начальных параметров расчетов, а наличие различных типов поглотителей в составе рассмотренных конфигураций критической сборки подтверждает возможность применения программного средства PSG2/SERPENT для исследования реакторной кинетики.



а

б

Рис. 2. Картограмма загрузки и распределение потока нейтронов для конфигураций № 17 (а) и 18 (б): ● – ТВС в сухом канале; ■ – ТВС в водном канале; □ – пустой канал с облученным графитом; □ – пустой канал; ▣ – борный поглотитель в водном канале; □ – водная ячейка; ◆ – детектор СНМ-11; ▲ – детектор КНК-56

Таблица 2

Результаты расчета значений K_{ef}

№	PSG2/SERPENT 1.1.13	MCNP4C	MCU	Эксперимент
	(ENDF/B-6.8)	(ENDF/B-V)	(DLC/MCUDAT-2.1)	
1	1,0003 (0,13%)	1,0023 (0,33%)	1,0024 (0,34%)	0,9990
2	0,9975 (-0,02%)	1,0020 (0,43%)	1,0069 (0,92%)	0,9977
3	1,0023 (0,22%)	1,0031 (0,30%)	1,0049 (0,48%)	1,0001
4	1,0023 (0,06%)	1,0044 (0,27%)	1,0087 (0,70%)	1,0017
5	1,0043 (0,26%)	1,0043 (0,26%)	1,0049 (0,32%)	1,0017
6	0,9899 (-0,03%)	0,9937 (0,35%)	0,9982 (0,81%)	0,9902
7	1,0070 (0,42%)	1,0075 (0,47%)	1,0085 (0,57%)	1,0028
8	1,0045 (0,06%)	1,0106 (0,67%)	1,0149 (1,10%)	1,0039
9	1,0071 (0,28%)	1,0082 (0,39%)	1,0079 (0,36%)	1,0043
10	1,0010 (-0,04%)	1,0061 (0,47%)	1,0085 (0,71%)	1,0014
11	1,0049 (0,48%)	1,0043 (0,42%)	1,0062 (0,61%)	1,0001
12	1,0046 (0,37%)	1,0038 (0,29%)	1,0039 (0,30%)	1,0009
13	1,0034 (0,24%)	1,0038 (0,28%)	1,0036 (0,26%)	1,0010

№	PSG2/SERPENT 1.1.13	MCNP4C	MCU	Эксперимент
	(ENDF/B-6.8)	(ENDF/B-V)	(DLC/MCUDAT-2.1)	
14	0,9984 (-0,31%)	1,0036 (0,21%)	1,0083 (0,68%)	1,0015
15	1,0015 (0,03%)	1,0017 (0,05%)	1,0022 (0,10%)	1,0012
16	0,9980 (-0,27%)	0,9989 (-0,18%)	1,0037 (0,30%)	1,0007
17	1,0053 (0,38%)	1,0058 (0,43%)	1,0071 (0,56%)	1,0015
18	1,0001 (-0,08%)	1,0054 (0,45%)	1,0086 (0,77%)	1,0009
19	1,0030 (0,20%)	1,0049 (0,39%)	1,0044 (0,34%)	1,0010
20	1,0032 (0,10%)	1,0094 (0,52%)	1,0061 (0,19%)	1,0042
21	1,0034 (0,28%)	1,0043 (0,37%)	1,0044 (0,38%)	1,0006
22	1,0038 (-0,01%)	1,0084 (0,45%)	1,0051 (0,12%)	1,0039
23	1,0036 (0,16%)	1,0057 (0,37%)	1,0064 (0,44%)	1,0020
24	1,0013 (-0,15%)	1,0070 (0,42%)	1,0043 (0,15%)	1,0028
25	1,0051 (0,35%)	1,0060 (0,44%)	1,0062 (0,46%)	1,0016
26	0,9998 (0,02%)	1,0052 (0,56%)	1,0061 (0,65%)	0,9996
27	1,0056 (0,25%)	1,0061 (0,30%)	1,0050 (0,19%)	1,0031
28	1,0016 (-0,12%)	1,0063 (0,35%)	1,0083 (0,55%)	1,0028

Список литературы

1. Briggs J. B., Nouri A., Dean V. A. F. Nuclear knowledge management experience of the international criticality safety benchmark evaluation project // IAEA-CN-123/03/O/04.

2. International handbook of evaluated criticality safety benchmark experiments, NEA/NSC/DOC(95)03/I-VIII, OECD-NEA, September, 2004.

3. Leppänen J. PSG2/Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code // User's Manual. – May 19, 2010.

4. Kachanov V. M., Kuzmin A. N., Jitarev V. E. RBMK graphite reactor: uniform configurations of U(1.8, 2.0, or 2.4 %) ²³⁵U)O₂ fuel assemblies, and configurations of U(2.0 %) ²³⁵U)O₂ assemblies, empty channels, water columns, and boron and thorium absorbers, with or without water in channels // LEU-COMP-THERM-060. – NEA/NSC/DOC/(95)03/IV. – September 30, 2004.

5. Leppänen J. Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code [Uuden Monte Carlo – reaktorifysiikkakoodin kehittäminen]. Espoo 2007. VTT Publications 640.

6. MCNP4C: Monte Carlo N-Particle Transport Code System// RSICC Computer Code Collection, April, 2000. – Revised July, 2000.

7. Gomin E. A. The MCU Status // Electronic presentation. - Russian Research Centre «Kurchatov Institute» RRC KI.

Контактная информация –

Герасимов Дмитрий Константинович,
младший научный сотрудник отдела общих проблем ядерной и радиационной безопасности, ФБУ «НТЦ ЯРБ»

тел.: (499)264-71-13,
e-mail: gerasimov@secnrs.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2011.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 72–76.