

**СТАТЬИ**

УДК 621.039.58

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА PSG2/SERPENT ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМНОЖЕНИЯ УРАН-ВОДНЫХ СИСТЕМ**

Строганов А.А., к.ф.-м.н., Курындин А.В., Аникин А.Ю., Герасимов Д.К., Соколов К.Ю.

Расчет  $K_{ef}$  с использованием различных программных средств 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.

В настоящей работе проведена верификация ПС PSG2/SERPENT для расчета  $K_{ef}$  уран-водных систем в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Верификация выполнена на основе сопоставления с экспериментом на критическом стенде реактора ВВЭР, проведенном в научно-исследовательском центре «Курчатовский институт». Полученные результаты демонстрируют высокую точность ПС PSG2/SERPENT и возможность его применения для расчета  $K_{ef}$  уран-водных систем.

**Ключевые слова:** верификация, PSG2/SERPENT, ВВЭР.

**VERIFICATION OF CRITICALITY CALCULATIONS OF URANIUM-WATER SYSTEMS USING PSG2/SERPENT CODE**

Stroganov A.A., Ph.D., Kuryndin A.V., Anikin A.Y., Gerasimov D.K., Sokolov K.Y.

Criticality calculations using different software codes 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.

This paper represents results of PSG2/SERPENT verification for criticality calculations of uranium-water systems. Verification is based on comparison of  $K_{ef}$  values, calculated by PSG2/SERPENT, with experimental data measured on the VVER critical facility by NRC «KI». Results demonstrate the possibility of using PSG2/SERPENT for calculating of  $K_{ef}$  of uranium-water systems with high accuracy.

**Key words:** verification, PSG2/SERPENT, VVER.

Данная работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» [1]. При выполнении данной НИР авторами в качестве основного инструментария для расчета критичности систем и процесса изменения нуклидного состава топлива в процессе облучения в реакторе был выбран программный комплекс PSG2/SERPENT [2].

PSG2/SERPENT [2] представляет собой программное средство (ПС), реализующее метод Монте-Карло и позволяющее проводить расчеты изменения нуклидного состава ЯТ в процессе облучения в реакторе, а также эффективного коэффициента размножения нейтронов ( $K_{ef}$ ) сколь угодно сложных систем, используя для их описания двух- или трехмерную геометрию. Способность PSG2/SERPENT [2] моделировать сложную геоме-

трию позволяет проводить расчеты так называемых «full core» систем, то есть моделировать загрузку целого реактора с возможностью описания каждого отдельного элемента, канала или ячейки активной зоны реактора.

Ранее в [3] были представлены результаты верификации PSG2/SERPENT [2] для расчетов  $K_{ef}$  уран-водо-графитовых систем. В настоящей статье авторами представлены результаты верификационных расчетов  $K_{ef}$  уран-водных систем с использованием PSG2/SERPENT [2]. Для осуществления верификации из сборника критмассовых экспериментов ISCBER [4] были выбраны эксперименты LCT 053, LCT 070, LCT 075, LCT 094, проведенные в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» на критической сборке ВВЭР.

Помимо экспериментально измеренных значений  $K_{ef}$  в [4] приведены результаты расчета  $K_{ef}$ , полученные с помощью ПК MCU-REA [5], KENO [6], APPOLO2 [7], TBC M [8], что, в свою очередь, позволяет оценить не только применимость и погрешность кода PSG2/SERPENT [2], но и сравнить его точность с аналогичными ПК.

Критическая сборка, использовавшаяся в экспериментах LCT 053, LCT 070, LCT 075 и LCT 094, состоит из активной зоны, помещенной в цилиндрический резервуар из нержавеющей стали. Критичность системы достигалась путем заполнения резервуара замедлителем (легкой водой) до определенного уровня.

Активная зона критической сборки состоит из твэлов реактора типа ВВЭР, закрепленных по треу-

гольной решетке между верхней и нижней дистанционирующей плитой. Толщина слоя замедлителя под нижней дистанционирующей плитой составляет более 1600 мм. Нижняя и верхняя дистанционирующие плиты соединены между собой шестью стальными стержнями диаметром 20 мм. Высота топливного столба в твэле составляет  $1250 \pm 5$  мм. При этом в экспериментах варьировалось размещение и количество твэлов. В рамках экспериментов LCT 053, LCT 070, LCT 075 и LCT 094 было измерено значение  $K_{ef}$  для 43 различных конфигураций активной зоны критической сборки (пример конфигурации дан на рис. 1). Сводные данные по всем используемым в статье экспериментам приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сводные данные по экспериментам**

Номер эксперимента	Количество конфигураций	Количество твэлов	Шаг решетки, мм	Обогащение топлива, %
LCT-053	14	601 – 2683	12,7	4,4
LCT-070	12	1015 – 1201	11	4,4
LCT-075	6	1195	11	4,4
LCT-094	11	1285 – 3853	11	4,4/6,5

Построенные с использованием ПК PSG2/SERPENT [2] модели всех конфигураций экспериментов точно описывают все элементы системы. Исключением являются уплотняющая пружина и концевики твэла, которые в модели имеют более простую форму. Окружающий активную зону резервуар с водой в модели был заменен слоем воды толщиной 20 см, что не оказывает влияния на полученные значения  $K_{ef}$ . На рис. 2 представлена модель твэла, используемая в расчетах. В качестве библиотеки микроконстант использовалась библиотека ENDF/B VI.8 [9]. Статистическая погрешность ПК PSG2/SERPENT [2] при выбранных авторами параметрах расчета составляет 0,0003.

В таблицах 2 – 5 представлены значения отклонений результатов расчета от эксперименталь-

ных данных, полученные с помощью ПК PSG2/SERPENT [2], а также приведены значения отклонений результатов расчета, полученные с использованием других ПК, рассчитанные по формуле:

$$D = \left( \frac{K_{ef \text{ расч.}}}{K_{ef \text{ эксп.}}} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $K_{ef \text{ расч.}}$  – расчетное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов;

$K_{ef \text{ эксп.}}$  – экспериментальное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов.

Также в таблицах 2 – 5 приведены значения погрешности определения экспериментального значения коэффициента размножения нейтронов с доверительным интервалом  $3\sigma$ .

Таблица 2

**Значения отклонений результатов расчета от экспериментальных данных эксперимента LCT-053**

Конфигурация	PSG2/SERPENT	MCU	Погрешность эксперимента
1	-0.21%	0.18%	0.48%
2	-0.29%	-0.10%	0.48%
3	-0.14%	-0.01%	0.48%
4	-0.23%	-0.06%	0.48%
5	-0.25%	-0.01%	0.48%
6	-0.32%	-0.05%	0.48%
7	-0.12%	0.10%	0.48%
8	-0.19%	-0.08%	0.48%
9	-0.31%	0.04%	0.48%
10	-0.41%	-0.40%	0.48%
11	-0.24%	-0.02%	0.48%
12	-0.24%	0.07%	0.48%
13	-0.25%	-0.39%	0.48%
14	-0.31%	-0.10%	0.48%

Таблица 3

**Значения отклонений результатов расчета от экспериментальных данных эксперимента LCT-070**

Конфигурация	PSG2/SERPENT	MCU	Apollo2	KENO	Погрешность эксперимента
1	-0.24%	0.25%	0.73%	0.25%	0.51%
2	-0.29%	0.23%	0.76%	0.23%	0.51%
3	-0.24%	0.06%	0.79%	0.06%	0.51%
4	-0.28%	0.21%	0.84%	0.21%	0.51%
5	-0.30%	0.20%	0.94%	0.20%	0.51%
6	-0.35%	0.22%	0.96%	0.22%	0.51%
7	-0.32%	0.19%	0.96%	0.19%	0.51%
8	-0.19%	0.19%	0.97%	0.19%	0.51%
9	-0.41%	0.13%	0.86%	0.13%	0.51%
10	-0.41%	0.16%	0.86%	0.16%	0.51%
11	-0.44%	0.04%	0.74%	0.04%	0.51%
12	-0.24%	0.06%	0.72%	0.06%	0.51%

Таблица 4

**Значения отклонений результатов расчета от экспериментальных данных эксперимента LCT-075**

Конфигурация	PSG2/SERPENT	MCU	TBC-M	KENO	Погрешность эксперимента
1	-0.25%	0.14%	0.23%	0.33%	0.51%
2	-0.26%	0.01%	0.13%	0.38%	0.51%
3	-0.43%	0.10%	0.06%	0.54%	0.51%
4	-0.28%	0.14%	0.32%	0.17%	0.51%
5	-0.16%	0.20%	0.33%	0.18%	0.51%
6	-0.18%	0.11%	0.35%	0.19%	0.51%

Таблица 5

**Значения отклонений результатов расчета от экспериментальных данных эксперимента LCT-094**

Конфигурация	PSG2/SERPENT	MCU	Погрешность эксперимента
1	-0.22%	0.07%	0.42%
2	-0.15%	0.23%	0.42%
3	-0.12%	0.25%	0.42%
4	-0.33%	0.19%	0.42%
5	-0.31%	0.21%	0.42%
6	-0.14%	0.19%	0.42%
7	-0.21%	0.33%	0.42%
8	0.19%	0.26%	0.42%
9	-0.36%	0.14%	0.42%
10	-0.39%	0.18%	0.42%
11	0.15%	0.15%	0.42%

Результаты выполненных верификационных расчетов показали, что по точности расчета  $K_{ef}$  уран-водных систем с ЯТ реакторов типа ВВЭР ПК PSG2/SERPENT [2] не уступает аналогичным общепризнанным реперным программным средствам, реализующим метод Монте-Карло. Среднее отклонение полученного с использованием PSG2/SERPENT [2] значения  $K_{ef}$  от экспериментально

измеренного составляет ~0,3%, а максимальное отклонение не превышает 0,43%. При этом отклонение результатов расчета ПК PSG2/SERPENT [2] ни для одной из конфигураций не превышает погрешности определения экспериментального значения коэффициента размножения нейтронов, определенной с доверительным интервалом 3σ.

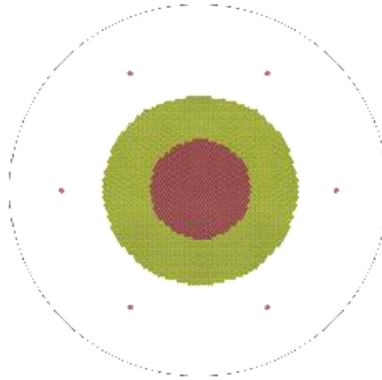


Рис. 1. Горизонтальное сечение модели эксперимента LCT-94, конфигурация 3

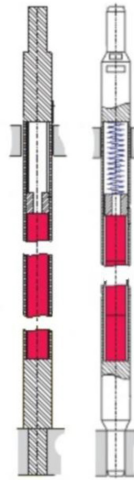


Рис. 2. Модель твэла, используемая в расчетах, в сравнении с реальным твэлом

### Список литературы

1. Приказ № 285 от 9 октября 2008 г. об утверждении положения об управлении реализацией федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы – М.: Минобрнауки России, 2008.
2. Jaakko Leppanen. PSG2/SERPENT – A Continuous Energy Monte-Karlo Reactor Physics Burnup Calculation Code – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.
3. Строганов А.А., Курындин А.В., Аникин А.Ю., Герасимов Д.К. Использование кода PSG2/SERPENT для расчета  $K_{eff}$  уран-водо-графитовых систем // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика ядерных реакторов, вып. 3. – М., 2011.
4. International handbook of evaluated criticality safety benchmark experiments: NEA/NSC/DOC(95)03/I-VII: в 8 тт. – Issy-les-Moulineaux: OECD-NEA, 2009.
5. Гомин Е.А. Статус MCU-4 // Вопросы атомной науки и техники, сер.: Физика ядерных реакторов, вып. 1.– М., 2006.
6. KENO V.a: an improved monte-carlo criticality program: ORNL/TM-2005/39, version 6, Vol. II, Sect F11 – Knoxville: ORNL, 2009.
7. Richard Sanchez. Apollo2 year 2010 // Nuclear engineering and technology. – Vol 42., No 5. – October 2010.
8. Программное средство ТВС-М (версия 1.2) / Рег. № 135. – М., 2002.
9. Victoria McLane. ENDF-201 ENDF/B-VI Summary Documentation Supplement I – Upton: National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, 1996.