

ВЕРИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ ВЕРСИИ КОНСТАНТ БНАБ И ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ CONSYST В РАСЧЕТАХ КРИТИЧНОСТИ

**Ю.Е. Головки, В.Н. Кошечев, Г.Б. Ломаков, Г.Н. Мантуров,
Е.В. Рожихин, М.Ю. Семенов, А.М Цибуля, А.А. Якунин**
ФГУП «ГНИЦ РФ-ФЭИ», 249033, Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1



Проводится верификация современной версии констант БНАБ и программы подготовки констант CONSYST в расчетах ряда упрощенных моделей ЯЭУ и критических экспериментов из международного справочника ICSBER Handbook.

Дано описание состояния современной версии библиотеки групповых констант БНАБ, полученной на основе файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД2010, предназначенной для расчетов перспективных моделей быстрых реакторов. Верификация основана на сравнении результатов расчетов многочисленных бенчмарк-моделей критических экспериментов и упрощенных моделей ЯЭУ – «кривых Прувост» – по программе ММККЕНО с результатами расчетов по программе MCNP. Выполнено сравнение с экспериментальными данными. На примере бенчмарк-экспериментов с быстрым спектром нейтронов приводятся результаты тестирования методики подготовки констант, заложенной в современной версии программного комплекса CONSYST с константами БНАБ путем сравнения с расчетами по константам БНАБ, подготовленным по программе TRANSX.

Получено ключевое заключение о том, что методическая погрешность группового приближения оценивается величиной менее чем $\pm 0.2\% \Delta k/k$.

Ключевые слова: нейтронные сечения, РОСФОНД, БНАБ-РФ, верификация, бенчмарк-модель, метод Монте-Карло, критичность.

ВВЕДЕНИЕ

Программный комплекс CONSYST [1] является основным инструментом при подготовке блокированных макросечений материалов зон для большинства как инженерных, так и прецизионных программ при проведении расчетов нейтронных или (и) фотонных полей в самых различных приближениях: диффузионном или P1; в различных вариантах транспортного приближения с усреднением полного сечения по нулевой или первой гармонике потока; с учетом анизотропии рассеяния с точностью, предусмотренной таблицами групповых констант до P5-приближения. Кроме макроконстант среды CONSYST рассчитывает и блокированные (с учетом резонансной самоэкранировки) микросечения нуклидов, входящих в состав зон рассчитываемых систем. Последнее позволяет рассчитывать такие важные функционалы нейтронных полей, как скорости нейтронных реакций, энерговыделение, СНА и др. Подготовка констант проводится в 299-групповом

© Ю.Е. Головки, В.Н. Кошечев, Г.Б. Ломаков, Г.Н. Мантуров,
Е.В. Рожихин, М.Ю. Семенов, А.М Цибуля, А.А. Якунин, 2014

приближении, а затем полученные константы могут быть свернуты в меньшее число групп с весом интегральных спектров зон, которые либо оцениваются самой программой CONSYST в приближении материального параметра, либо могут быть введены извне. В расчетах в качестве исходных данных рекомендовано использовать библиотеку микросечений БНАБ-93 [2].

В последние годы разработана, а в настоящее время проходит верификацию современная версия констант БНАБ – система БНАБ-РФ2010 (далее БНАБ-РФ), полученная путем переработки (с помощью программы NJOY [3]) национальной библиотеки файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД [4]. Новая система БНАБ-РФ существенно отличается от предыдущей версии констант БНАБ-93, что потребовало также существенной модернизации основной программы подготовки констант CONSYST.

Рассчитанные программой CONSYST константы могут быть выданы в различных форматах, заказываемых пользователем, из которых наиболее употребительными являются общеизвестные форматы APAMAКО, к которому привязано множество российских программ, а также ANISN, к которому кроме программы с тем же названием привязано множество других зарубежных программ, например, DORT и TORT [5], а также MCNP [6] и отечественный монте-карловский код MMKKENO [7].

Для верификации был отобран 201 бенчмарк-эксперимент из международного справочника по критической безопасности ICSBEP [9] и 66 конечных и бесконечных урановых и плутониевых моделей Прувоста [10]. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными. Для сравнения привлечены также результаты расчетов по MCNP с детальным ходом по библиотеке РОСФОНД. На примере урановых и плутониевых бенчмарк-экспериментов с быстрым спектром нейтронов приводятся результаты тестирования методики подготовки констант, заложенной в современной версии программного комплекса CONSYST с константами БНАБ-РФ путем сравнения с зарубежным аналогом – с расчетами по программе TRANSX [8].

ОТБОР РАСЧЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для верификации системы констант БНАБ-РФ были отобраны критические бенчмарк-эксперименты из международного справочника ICSBEP Handbook. Разнообразие моделей включало в себя разные типы спектра (тепловой и быстрый), разное топливо (урановое, плутониевое и МОКС-топливо), разное обогащение по урану-235 (высокое и низкое). В таблице 1 приведены названия серий и номера отобранных экспериментов, а также институты, в которых проводились эти эксперименты.

Рассмотрены следующие конфигурации бенчмарк-моделей из международного справочника ICSBEP Handbook:

- компактные урановые и плутониевые критические сборки с «жестким» спектром;
- гомогенные урановые и плутониевые «мягкие» растворные системы;
- гомогенные «мягкие» растворные системы с МОКС-топливом;
- гомогенные «мягкие» урановые с низким обогащением системы;
- модельные конечные и бесконечные урановые и плутониевые системы, так называемые «кривые Прувоста», теоретические зависимости величины критичности урановых и плутониевых систем – гомогенных водных растворов от водно-топливного отношения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Принят наиболее простой и понятный способ тестирования комплекса CONSYST с константами БНАБ-РФ в быстрой области энергий – проведение расчетов бенчмарк-моделей и их нейтронно-физических характеристик с подготовкой констант с помощью CONSYST и TRANSX. Далее проводится сравнение полученных результатов расчетов по программам CONSYST и TRANSX и определение методических погрешностей.

Таблица 1

Отобранные эксперименты из ICSBEP

Институт	Идентификатор серии	№ эксперимента	Институт	Идентификатор серии	№ эксперимента	
PNL, США	PST001	01 – 06	HANFORD, США	PST002	01, 07	
	PST009	03		PST003	01, 05	
	PST018	01, 05, 09		PST004	01 – 06, 11, 13	
	PST020	03, 05, 08, 09		PST005	01, 07, 09	
	PST021	01 – 05		PST006	02	
	PST024	03, 06, 10, 16, 21		PST007	02, 03, 05, 07 – 10	
	PST025	03, 10, 17, 22, 31, 36, 42		PST010	01 – 04, 08 – 11, 14	
	PST026	03, 06, 12, 16, 19		PST011	01, 05, 08, 11	
	MST002	02, 03	ВНИИЭФ, Россия	PMF022	01	
	MST004	02, 05, 07		PMF024	01	
	MST005	02, 03, 04, 07		PMF027	01	
	MST007	01		PMF029	01	
	MST010	01		PMF031	01	
	HST042	01 – 08		HMF008	01	
HST043	01, 02	HMF018		01		
LANL, США	PMF001	01	JAERI, Япония	HMF020	01	
	PMF002	01		LST004	01, 03, 07	
	PMF011	01		LST007	01, 03, 04	
	HMF001	01		LST010	01	
	HMF004	01		LST016	01, 04, 06	
	HST032	01		LST017	01, 04, 06	
LST001	01	LST019		02		
INL, США	HST001	01 – 10		LST020	02, 04	
AWRE, UK	MST003	04, 07, 09, 10		LST021	01, 03	
ORNL, США	HST009	01 – 04		ФЭИ, Россия	HST019	01
	HST010	01 – 04			HST025	01, 02, 04, 05
	HST011	01, 02	HST027		01	
	HST012	01	HST028		01, 03, 05, 07, 09, 11, 13, 15, 17	
	HST013	01	HST029		01	
LST002	01, 02	HST030	01, 04			
VALDUC, Франция	PST012	06 – 13, 19 – 21	HST035		01, 05, 07	
	PST022	01 – 03, 08	LST003		03, 06, 09	
	PST023	01, 08, 17, 34	LST005		01	
	PST032	02, 06, 11	LST006		01	
	MST006	01				

Необходимо отметить, что для программ TRANSX и CONSYST с помощью NJOY были подготовлены исходные библиотеки групповых микроконстант на основе файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД2010. Для расчетов по программе MCNP были использованы файлы библиотеки РОСФОНД2010 в формате ACE, также полученные с помощью программы NJOY.

На рисунке 1 показана схема проведения нейтронно-физических расчетов с использованием комплексов CONSYST и TRANSX.

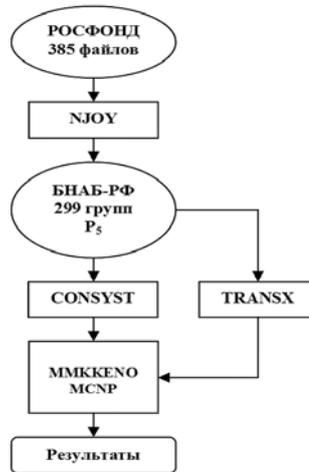


Рис. 1. Схема проведения расчетов

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для проведения верификационных расчетов и проверки констант с использованием зарубежной программы подготовки макроконстант TRANSX были отобраны урановые и плутониевые быстрые бенчмарк-эксперименты.

При сравнении расчетных результатов в качестве опорных взяты результаты из международного справочника. Полученные результаты рассматриваются относительно бенчмарк-эксперимента.

Рассчитанные значения критичности отобранных сборок с использованием программ TRANSX и CONSYST приведены на рис. 2. Как видно, максимальное отклонение в значениях критичности «жестких» сборок при использовании разных программ подготовки констант не превышает $\pm 0,1\%$.

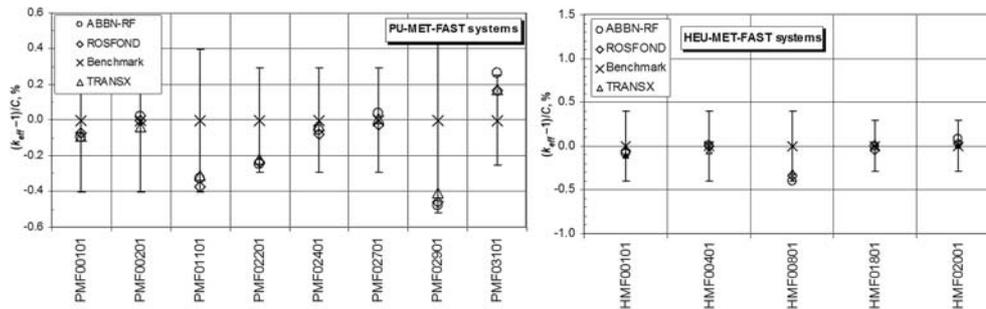


Рис. 2. Сравнение результатов расчета критичности быстрых плутониевых (слева) и урановых (справа) систем

Из международного справочника ICSBEP Handbook были отобраны тепловые модели, водные растворы нитрата урана HST и плутония PST, с отражателем и без него. На рисунке 3 приведено сравнение расчета критичности с экспериментом для этого набора моделей. Рисунок демонстрирует хорошее согласие группового расчета с детальным ходом, не превышающее $\pm 0,2\%$.

Расчеты в группах выполнены по программе ММККЕНО с подготовкой констант через CONSYST. Полученные результаты рассматривали относительно данных, полученных по программе МСНР с детальным ходом, используя библиотеку оцененных нейтронных данных РОСФОНД2010. Результаты бенчмарк-экспериментов приняты в качестве опорных данных. В расчетах методом Монте-Карло число историй равно 50 000 000.

На следующем этапе работы были отобраны системы с МОКС-топливом. Расчеты в груп-

пах и с детальным ходом проводились аналогично предыдущему этапу. На рисунке 4 приведено сравнение расчета критичности с экспериментом для этого набора моделей. Расхождения между групповым подходом и детальными расчетами не превышают $\pm 0,1\%$.

Еще один набор бенчмарк-экспериментов из ICSBEP состоял из растворных тепловых моделей с низкообогащенным ураном в качестве топлива. На рисунке 5 приведено сравнение расчета критичности с экспериментом для этого набора моделей. Расхождения между групповым подходом и детальными расчетами не превышают $\pm 0,1\%$.

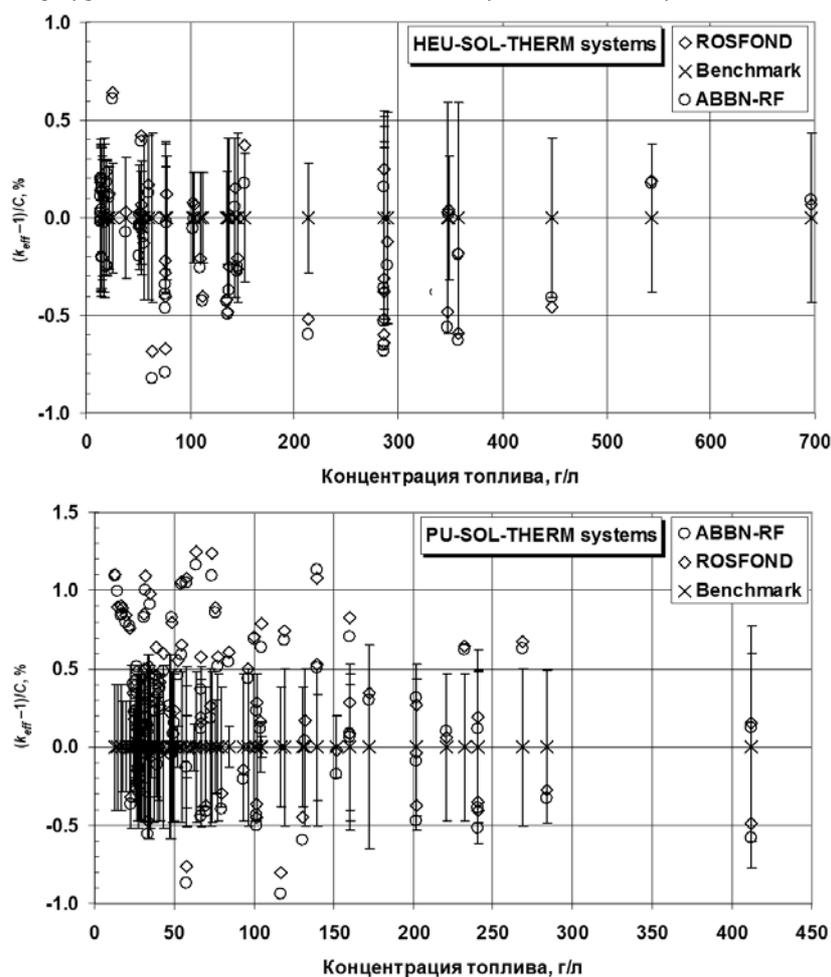


Рис. 3. Сравнение результатов расчета критичности тепловых урановых (вверху) и плутониевых (внизу) систем

На следующем этапе просчитаны простейшие модели – так называемые «кривые Прувоста» – это теоретические зависимости величины критичности урановых и плутониевых систем (гомогенных водных растворов) от водно-топливного отношения.

На рисунках 6 и 7 приведены отношения результатов расчета критичности в групповом приближении к результатам расчета детальным ходом для конечных и бесконечных урановых и плутониевых систем. Как видно, различие в эффективном коэффициенте размножения нейтронов группового и детального расчетов не превышает $\pm 0,2\%$ и в среднем составляет $\pm 0,02\%$ для всех урановых, $\pm 0,03\%$ для бесконечных и $\pm 0,04\%$ для конечных плутониевых систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены верификационные расчеты методом Монте-Карло ряда представительных быстрых и тепловых, урановых и плутониевых, экспериментальных бен-

чмарк-моделей, а также плутониевых и урановых теоретических моделей как с использованием новых данных на основе файлов РОСФОНД2010 в формате MATXS и программы подготовки констант TRANSX, так и констант БНАБ-РФ2010 и программы подготовки констант CONSYST. В качестве опорных использованы результаты расчетов по программе MCNP с детальным слежением за энергией нейтронов.

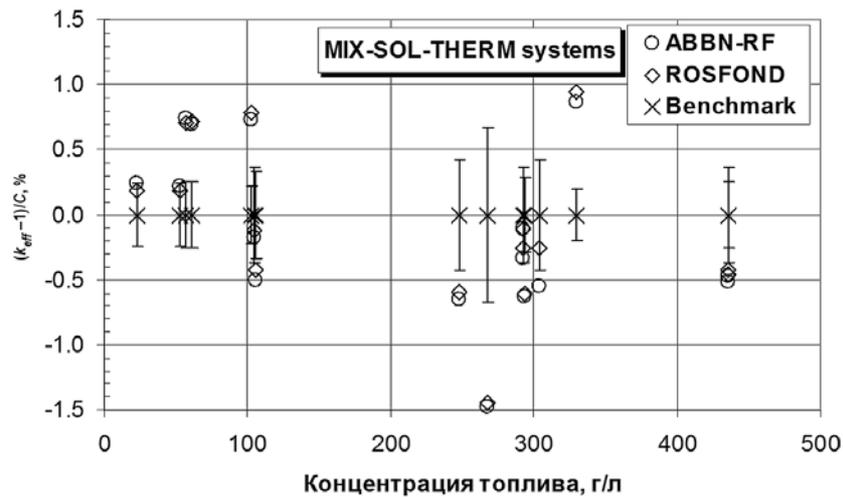


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов критичности тепловых систем с МОКС-топливом

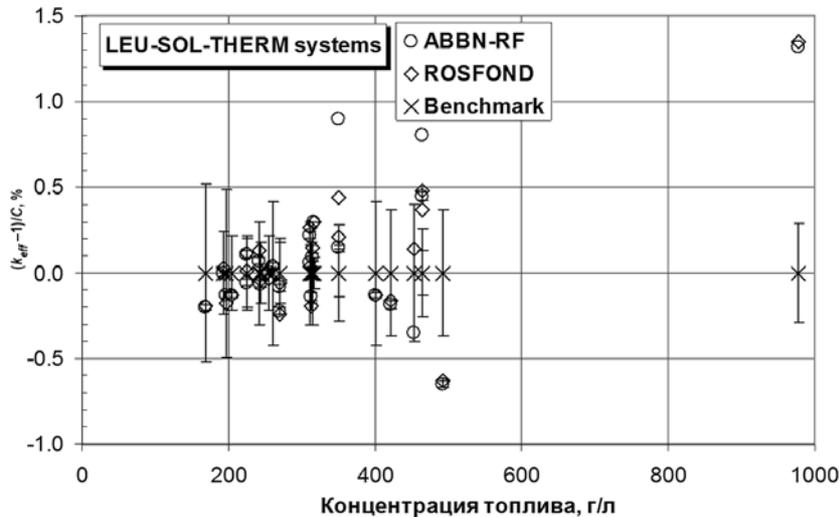


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов критичности тепловых низкообогащенных урановых систем

Сравнение результатов показало хорошее согласие расчетов, полученных в групповом приближении, с расчетами с использованием детального хода сечений.

Различие между групповым подходом и детальным ходом в критике не превышает $\pm 0,2\%$ на всем перечне бенчмарк-экспериментов, а в быстрой области, в низкообогащенных по урану моделях и в экспериментах с МОКС-топливом не превышает и $\pm 0,1\%$.



Рис. 6. Отношение расчетов критичности в групповом приближении к детальному для урановых конечных и бесконечных систем

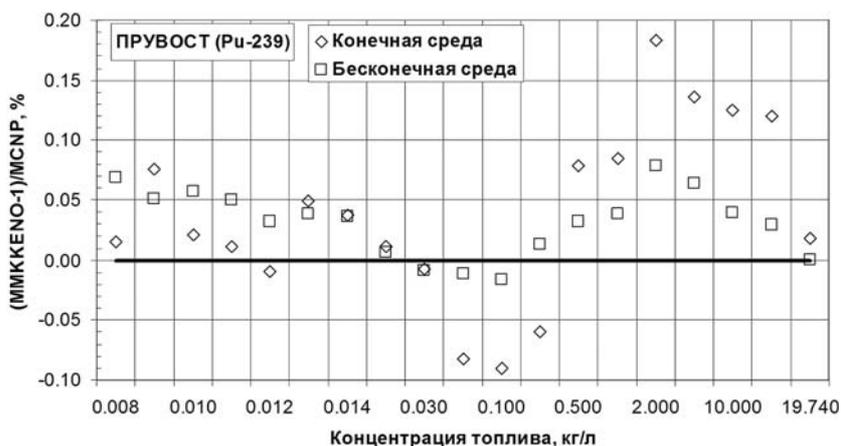


Рис. 7. Отношение расчетов критичности в групповом приближении к детальному для плутониевых конечных и бесконечных систем

Литература

1. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения: Препринт ФЭИ-2828. Обнинск. 2000.
2. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Вып. 1. 1996. – С.59.
3. MacFarlane R.E. et al. NJOY97.0 Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Sections from ENDF/B Data. RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, PSR-368.
4. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Коцеев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОС-ФОНД – российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Вып. 1–2. 2007. – С.3-21.
5. DANTSYS 3.0: One-, Two-, and Three- Dimensional, Multigroup, Discrete Ordinates Transport Code System. RSIC Computer Code Collection, CCC-547, ORNL (1993).
6. "MCNP - A General Monte Carlo Neutron-Particle Transport Code". Version 5. X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, April 2003.
7. Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST ММК-КЕНО для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в PN-приближении. Препринт ФЭИ-2887. Обнинск-2001.

8. *MacFarlane R.E.* «TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes», Los Alamos National Laboratory 1992.

9. "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments," Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2002 Edition).

10. *Pruvost Norman L., Paxton Hugh C.* Nuclear Criticality Safety Guide, LA-12808, UC-714 (1996).

Поступила в редакцию 03.09.2013 г.

Авторы

Головко Юрий Евгеньевич, научный сотрудник

E-mail: btab@ippe.ru

Кощеев Владимир Николаевич, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук

E-mail: btab@ippe.ru

Ломаков Глеб Борисович, младший научный сотрудник

E-mail: btab@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, зав. лабораторией, кандидат физ.-мат. наук

E-mail: btab@ippe.ru

Рожихин Евгений Валерьевич, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук

E-mail: btab@ippe.ru

Семенов Михаил Юрьевич, ведущий научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук

E-mail: btab@ippe.ru

Цибуля Анатолий Макарович, советник директора, кандидат физ.-мат. наук

E-mail: tsib@ippe.ru

Якунин Андрей Андреевич, младший научный сотрудник

E-mail: btab@ippe.ru

UDC 621.039.51.17

VERIFICATION OF ABBN CONSTANTS AND CONSYST CODE IN CRITICALITY CALCULATIONS

Golovko Yu. E., Koscheev V.N., Lomakov G.B., Manturov G.N., Rozhikhin E.V., Semenov M.Y., Tsiboulya A.M., Yakunin A.A.

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

ABSTRACT

The aim of current work is verification of up-to-date BNAB neutron constants library and CONSYST code for neutron constants preparation via calculations of a set of simplified calculation models of nuclear power systems and critical experiments from international handbook ICSBEP.

There is the description of up-to-date version of BNAB neutron constants library which was obtained from evaluated neutron data files RUSFOND2010 and intended for perspective fast reactor models calculations in current paper materials. The verification process is based on calculation results comparisons for numerous benchmark-models of critical experiments and simplified models of nuclear power systems – «Pruvost curves» – calculated by means of MMKKENO code with MCNP calculation results. The comparison with experimental data was made. Based on benchmark-experiments with fast neutron spectra the results of testing of neutron constants preparation method laid in up-to-date version of CONSYST code with BNAB neutron constants is given in paper. These results were obtained by means of comparison with calculation results using BNAB cross-sections prepared by TRANSX code.

Following the results of performed work a key conclusion have been made that the methodical uncertainty caused by applying the group-wise approach is estimated as less than $\pm 0.2\% \Delta k/k$.

Key words: neutron cross-sections, RUSFOND, BNAN-RF, verification, benchmark model, Monte-Carlo method, criticality.

REFERENCES

1. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *Programma podgotovki konstant CONSYST. Opisaniye primeneniya*: Preprint GNC RF-FEI-2828. [CONSYST code for neutron constants preparation. Scope statement: IPPE Preprint-2828]. Obninsk, FEI Publ., 2000. (in Russian)
2. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Sistema gruppovykh konstant BNAB-93. Chast' 1: Yadernye konstanty dlja rascheta nejtronnyh i fotonnyh polej izluchenij [BNAB-93 group data library. Part 1: Nuclear data for calculation of neutron and photon radiation fields]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Yadernye konstanty*. 1996, no. 1, p.59.
3. MacFarlane R.E. et al. NJOY97.0 Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Sections from ENDF/B Data. RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, PSR-368.
4. Zabrodskaia S.V., Ignatjuk A.V., Koscheev V.N., Manohin V.N., Nikolaev M.N., Pronjaev V.G. ROSFOND - rossijskaja nacional'naja biblioteka ocenennyh nejtronnyh dannyh [RUSFOND – Russian national evaluated neutron data library]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Yadernye konstanty*. 2007, no. 1-2, pp.3-21.
5. DANTSYS 3.0: One-, Two-, and Three- Dimensional, Multigroup, Discrete Ordinates Transport Code System. RSIC Computer Code Collection, CCC-547, ORNL (1993).
6. «MCNP – A General Monte Carlo Neutron-Particle Transport Code». Version 5. X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, April 2003.
7. Bliskavka A.A., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Programmnyj kompleks CONSYST/MMKKENO dlya rascheta yadernyh reaktorov metodom Monte-Karlo v

mnogogruppovom priblizhenii s indikatisami rassejaniya v PN-priblizhenii. Preprint GNC RF-FEI-2887. [CONSYST/MMKKENO code package for nuclear reactor calculations with Monte-Carlo in multigroup PN-approximation: IPPE Preprint-2887]. Obninsk, FEI Publ., 2001. (in Russian).

8. MacFarlane R.E. «TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes», Los Alamos National Laboratory 1992.

9. «International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments», Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2002 Edition).

10. Pruvost Norman L., Paxton Hugh C. Nuclear Criticality Safety Guide, LA-12808, UC-714 (1996).

Authors

Golovko Yury Evgen'evich, Research Officer

E-mail: bnaab@ippe.ru

Koscheev Vladimir Nikolaevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: bnaab@ippe.ru

Lomakov Gleb Borisovich, Junior Researcher

E-mail: bnaab@ippe.ru

Manturov Gennady Nikolaevich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: bnaab@ippe.ru

Rozhikhin Evgeny Valer'evich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: bnaab@ippe.ru

Semenov Mikhail Yur'evich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: bnaab@ippe.ru

Tsiboulya Anatoly Makarovich, Director Adviser, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: tsiba@ippe.ru

Yakunin Andrey Andreevich, Junior Researcher

E-mail: bnaab@ippe.ru