

ВЕРИФИКАЦИЯ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ ОСНОВНЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БИБЛИОТЕКИ РОСФОНД НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

В.Н. Кощеев, Г.Н. Мантуров, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля
ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В настоящее время существенно обновились практически все существующие в мире библиотеки оцененных нейтронных данных: в США – ENDF/B-VII, в Европе – JEFF-3.1, в Японии – JENDL-4, в Китае – CENDL-4, в России – РОСФОНД. Эти библиотеки интенсивно тестируются на предмет их предпочтительного использования в прикладных задачах. Как правило, тестирование библиотек нейтронных данных проводится в расчетах критичности отобранных особым образом бенчмарк-моделей из международного справочника ICSBER Handbook. Имеются и другие источники информации для тестирования нейтронных данных. К ним относятся одnogрупповые сечения, полученные путем взвешивания на стандартных спектрах деления, и сечения увода нейтронов под порог реакции, используемой в качестве детектора: деление на ^{238}U и ^{237}Np или (n,p)-реакция на ^{27}Al .

В статье представлены результаты тестирования данных для основных топливных реакторных материалов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu наряду с традиционными расчетами критичности отобранных бенчмарк-моделей. На первом этапе нейтронные данные для материалов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu (резонансные интегралы, одnogрупповые сечения, сечения увода под порог) для четырех современных библиотек ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0 и РОСФОНД сравнивались с экспериментальными данными. На втором этапе верификации нейтронные данные проверялись в расчетах критичности отобранных наборов бенчмарк-экспериментов из справочника ICSBER Handbook. Критериями отбора бенчмарк-экспериментов служили простота бенчмарк-модели, представительность по величине водород-топливного отношения, полнота описания. Были отобраны бенчмарк-эксперименты для области спектра как быстрых, так и тепловых нейтронов. В списке бенчмарк-моделей содержится 62 конфигурации с высокообогащенным и 49 моделей с низкообогащенным урановым топливом и 102 модели с плутониевым топливом.

Результаты верификационных расчетов показали хорошую согласованность принятых оценок сечений для ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu из библиотеки РОСФОНД-2010 с результатами широкого спектра экспериментов. Процедура последовательного тестирования нейтронных данных на результатах интегральных микроэкспериментов и дальнейшая верификация этих данных в расчетах критичности отобранных бенчмарк-конфигураций из международного справочника ICSBER Handbook позволяют оценить качество нейтронных данных для их последующего использования в научно-поисковых и проектных расчетах ЯЭУ. В дальнейшем для верификации предполагается расширить список экспериментов и привлечь эксперименты из международного справочника реакторных экспериментов IRPhEP и в том числе эксперименты, выполненные в ФЭИ на быстром физическом стенде БФС.

Ключевые слова: файлы нейтронных данных, РОСФОНД, верификация, бенчмарк-эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени обновились практически все существующие библиотеки оцененных нейтронных данных в США (ENDF/B-VII), Европе (JEFF-3.1), Японии (JENDL-4), Китае (CENDL-4) и России (РОСФОНД). В 2010 г. была зарегистрирована российская библиотека оцененных нейтронных данных, известная как РОСФОНД-2010 [1] (далее РФ-2010). В это же время была представлена версия европейской библиотеки JEFF-3.1.1 [2]. В апреле 2011 г. появилась версия японской библиотеки JENDL-4.0 [3]. В декабре 2011 г. была распространена новая версия американской библиотеки ENDF/B-VII.1 [4].

Эти библиотеки интенсивно тестируются на предмет их предпочтительного использования в прикладных задачах.

Как правило, тестирование библиотек нейтронных данных широко проводится на результатах расчетов критичности для отобранных особым образом бенчмарк-моделей из международного справочника ICSBEP Handbook. Имеются и другие источники информации для тестирования нейтронных данных. К ним относятся однокрупные сечения, полученные на стандартных спектрах деления и сечения увода нейтронов под порог сечения реакции, используемой в качестве детектора (деление на ^{238}U , деление на ^{237}Np или реакция (п,р) на ^{27}Al).

В работе представлены результаты тестирования реакторных материалов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu наряду с традиционными расчетами критичности отобранных бенчмарк-моделей.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ БЕНЧМАРКИ

В качестве опорных значений для тестирования тепловых сечений и резонансных интегралов (спектр $\sim 1/E$) были использованы результаты работы S.F. Mughabghab (5-th Ed.) [5].

Экспериментальные данные по однокрупным сечениям на стандартных спектрах деления ^{235}U , ^{252}Cf были взяты из [6, 7]. Экспериментальные сечения увода нейтронов под порог деления ^{238}U и ^{237}Np были взяты из работ [8, 9]. Модели и величины критичности для отобранных бенчмарк-моделей были взяты из международного справочника оцененных критических экспериментов ICSBEP Handbook [10]. Критериями для отбора бенчмарк-моделей послужили следующие параметры: простота бенчмарк-модели, представительность по величине водород-топливного отношения, полнота описания и др. [11–13].

В список бенчмарк-моделей попали 62 модели с высокообогащенным топливом, 49 моделей с низкообогащенным урановым топливом, 102 модели с плутониевым топливом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ

Результаты верификации однокрупных сечений, усредненных на стандартных спектрах, и сечений увода под порог реакций различных детекторов приведены в табл. 1–4. В процессе верификации использовались 30-групповые сечения для ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , соответствующие принятой в международном справочнике ICSBEP Handbook разбивке, которые были получены из файлов с помощью программы NJOY [14].

В таблицах 1, 2 для ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu приводятся отношения соответствующих однокрупных сечений к опорным значениям, в качестве которых использованы экспериментальные данные, если они имеются, либо значения из библиотеки РФ-2010. Значения опорных сечений приводятся в единицах «барн». Для величины Nu-bar (полное число нейтронов деления) приводится абсолютное значение. Ячейки, выделенные серым фоном, содержат отличия, равные или более одного процента. В качестве экспериментальных данных в таблицах приводятся $1/E$ – резонансный интеграл из работы [5]; LMFBR – спектр нейтронов типичного быстрого реактора на плутониевом топливе; U-235, Cf-252 – оцененное сечение захвата ^{235}U , ^{238}U или ^{239}Pu на соответствующем спектре деления (^{235}U или ^{252}Cf) из [6, 7]; данные по сечению увода под порог для соответствующей реакции из [8, 9]. Погрешности опорных значений приведены в абсолютных значениях.

Таблица 1
Сравнение нейтронных сечений, усредненных на стандартных спектрах, для современных библиотек нейтронных данных

	²³⁵ U					²³⁸ U					²³⁹ Pu				
	захват	упругое	неупругое	деление	pi-bar	захват	упругое	неупругое	деление	pi-bar	захват	упругое	неупругое	деление	pi-bar
EXP (1/E)	146±6			275±5		277±3			1.63±0.16^{*)}		180±20			303±10	
PФ-2010	0.964	145.1	0.137	1.001	2.435	0.994	316.8	0.232	1.460	2.347	1.056	154.2	0.801	1.024	2.865
ENDF/B-VII.1	0.964	1.001	1.000	1.000	1.000	0.994	1.000	0.904	1.460	1.062	1.056	0.994	1.277	1.025	1.001
JEFF-3.1.1	0.964	1.000	1.000	1.001	1.000	0.993	1.004	0.778	0.753	1.026	1.056	1.000	1.000	1.026	0.999
JENDL-4.0	0.953	1.006	1.128	1.000	1.000	0.994	1.000	0.761	1.460	0.992	1.046	1.015	1.182	1.023	1.001
(LMFBR)															
PФ-2010	0.612	8.487	0.732	2.037	2.457	0.3744	10.53	0.911	4.28[*]	2.775	0.593	9.200	0.614	1.861	2.938
ENDF/B-VII.1	1.000	1.001	1.008	0.994	1.001	1.000	0.996	1.052	1.000	0.993	0.984	0.957	1.341	1.006	1.001
JEFF-3.1.1	1.003	1.002	0.999	0.997	1.000	1.001	1.018	0.952	0.998	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
JENDL-4.0	0.956	0.998	0.998	0.984	1.000	0.999	0.997	0.990	0.999	0.994	0.979	0.960	1.249	1.009	1.003
EXP (U-235)				1.219±0.014					0.310±0.004					1.835±0.030	
PФ-2010	0.0945	4.384	1.937	1.006	2.661	0.0698	4.882	2.563	0.985	2.825	0.0543	4.622	1.342	0.976	3.179
ENDF/B-VII.1	1.001	0.991	1.023	1.003	1.002	1.000	0.993	1.013	0.985	0.992	0.755	0.945	1.185	0.975	1.001
JEFF-3.1.1	1.000	1.009	0.999	0.998	1.000	0.988	1.010	1.028	0.980	1.000	1.000	1.000	1.000	0.976	1.000
JENDL-4.0	0.945	1.024	0.960	0.998	1.003	1.011	0.999	1.000	0.981	0.994	0.987	0.960	1.174	0.979	0.997
EXP (Cf-252)				1.238±0.009					0.333±0.004					1.835±0.018	
PФ-2010	0.0932	4.379	1.936	0.994	2.677	0.0687	4.868	2.535	0.947	2.854	0.0541	4.611	1.343	0.978	3.195
ENDF/B-VII.1	1.000	0.990	1.024	0.991	1.001	1.000	0.993	1.013	0.947	0.992	0.759	0.946	1.182	0.977	1.001
JEFF-3.1.1	1.000	1.009	0.999	0.986	1.000	0.988	1.009	1.030	0.941	1.000	1.000	1.000	1.000	0.978	1.000
JENDL-4.0	0.944	1.024	0.961	0.986	1.003	1.010	0.998	1.001	0.942	0.994	0.986	0.960	1.171	0.981	0.997

^{*)} мбарн

Нейтронные данные ^{235}U для библиотеки JENDL-4.0 отличаются от данных остальной совокупности библиотек во всей энергетической области, в то время как данные других библиотек для ^{235}U согласуются между собой.

Нейтронные сечения захвата и упругого рассеяния ^{238}U для всех библиотек согласуются между собой в пределах 1%. Сечения неупругого рассеяния различаются во всей области энергий, особенно в области порога реакции. Сечения деления (там, где имеется экспериментальное значение) различаются между собой значительно в областях низких (подпороговое деление) и высоких энергий. В области энергий, важной для реакторных приложений, значения сечения деления согласуются между собой, а число вторичных нейтронов для библиотек JENDL-4.0 и ENDF/B-VII.1 ниже ($\sim 0.7\%$), чем в РФ-2010 и JEFF-3.1.1.

Нейтронные данные ^{239}Pu для библиотек JENDL-4.0 и ENDF/B-VII.1 отличаются от данных библиотек РФ-2010 и JEFF-3.1.1 во всей энергетической области. Оцененные нейтронные данные отличаются от экспериментальных значений, если таковые имеются.

Таблица 2

Сравнение сечений увода под порог реакций различных детекторов для современных библиотек нейтронных данных

Детектор	^{235}U			^{238}U			^{239}Pu		
	(n,f) ^{237}Np	(n,f) ^{238}U	(n,p) ^{27}Al	(n,f) ^{237}Np	(n,f) ^{238}U	(n,p) ^{27}Al	(n,f) ^{237}Np	(n,f) ^{238}U	(n,p) ^{27}Al
EXP		1.34\pm0.10			2.16\pm0.04			1.07\pm0.15	
РФ-2010	0.847	1.151	1.76	1.164	1.007	2.36	0.453	0.819	1.017
ENDF/B-VII.1	1.009	1.180	1.058	1.002	1.007	1.000	1.196	0.944	1.087
JEFF-3.1.1	0.989	1.139	0.992	1.017	1.058	1.108	1.000	0.819	1.000
JENDL-4.0	0.975	1.169	1.045	0.963	0.994	1.072	1.245	1.001	1.122

Из таблицы 2 следует, что неупругие процессы для ^{235}U представлены в библиотеках различным образом. Увод под порог деления ^{238}U (как наиболее важная величина) на ^{235}U представляется завышенным. Для ^{238}U увод под порог своего деления переоценен для библиотеки JEFF-3.1.1. Для ^{239}Pu увод под порог деления ^{238}U недооценен для библиотек РФ-2010 ($\sim 20\%$), ENDF/B-VII.1 (6%), JEFF-3.1.1 ($\sim 20\%$).

Отметим, что различия в сечениях увода под порог реакций других детекторов не так важны для реакторных приложений, но они указывают на имеющиеся несоответствия оцененных данных по неупругому рассеянию нейтронов в современных библиотеках экспериментальным значениям.

Далее проводился этап верификации нейтронных данных на отобранных бенчмарк-моделях из международного справочника ICSBEP Handbook. Расчеты проводились по программе MCNP5 [15]. Исходные данные для построения моделей были взяты из работы [10].

На рисунках 1–3 представлено сравнение рассчитанных и экспериментальных значений критичности в виде отношения C/E для отобранных бенчмарк-моделей с высокообогащенным и низкообогащенным урановым топливом: на рис. 1а, б – для быстрых систем (HEU и LEU), на рис. 2, 3 – для тепловых систем (HST и LST соответственно).

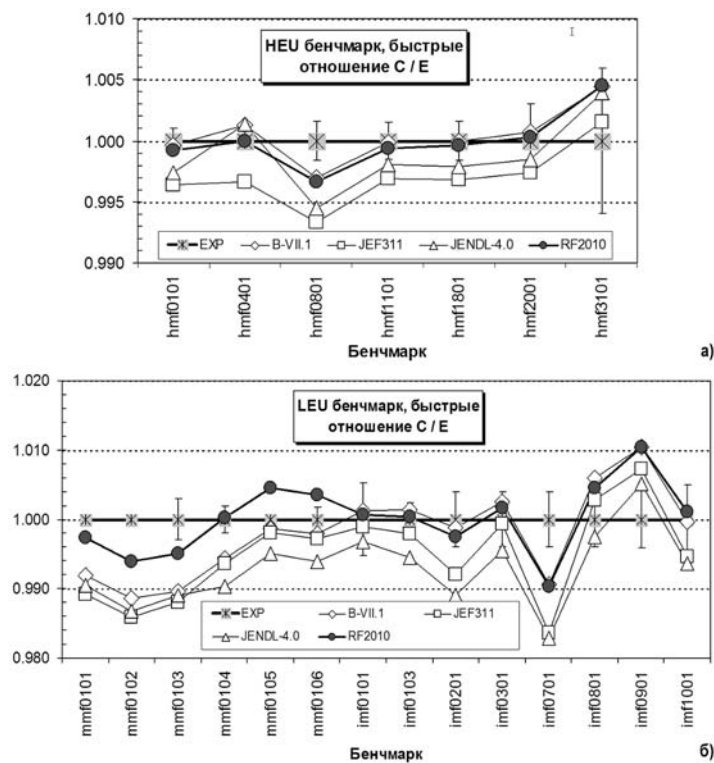


Рис. 1. Сравнение (C/E) расчетов урановых (а) быстрых высокообогащенных HEU и (б) низкообогащенных LEU бенчмарк-систем для различных библиотек нейтронных данных

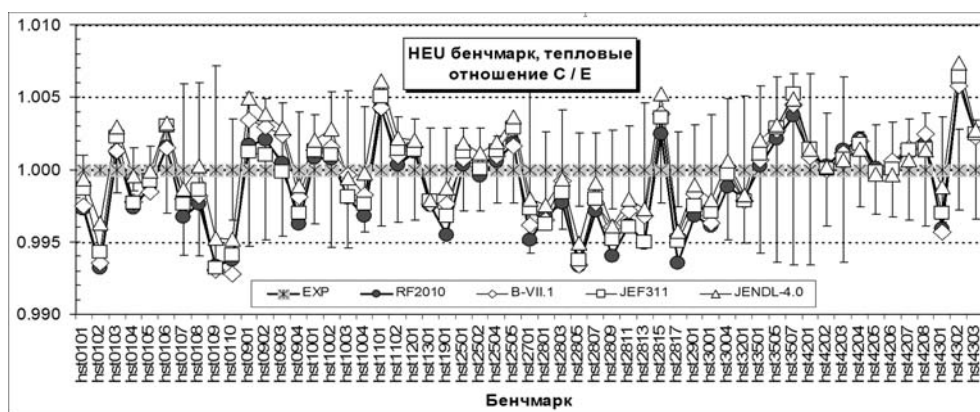


Рис. 2. Сравнение (C/E) расчетов тепловых высокообогащенных урановых (HEU) бенчмарк-моделей для различных библиотек нейтронных данных

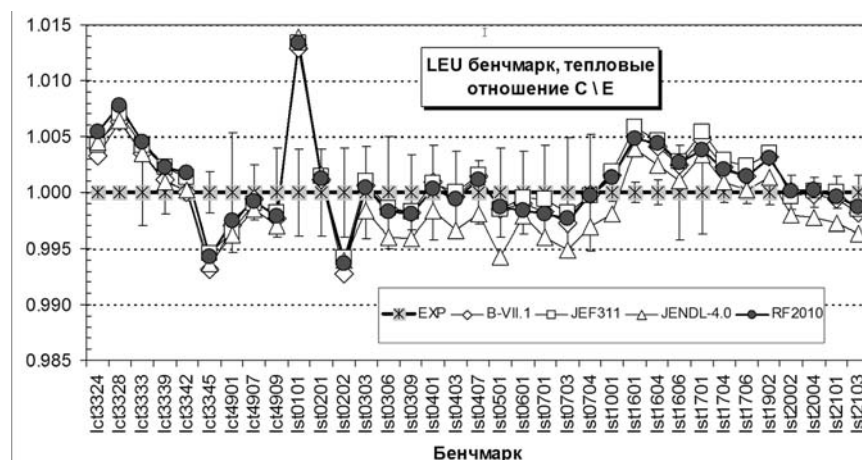


Рис. 3. Сравнение (C/E) расчетов тепловых низкообогащенных урановых (LST) бенчмарк-моделей для различных библиотек нейтронных данных

На рисунках 4 и 5 приводятся аналогичные данные для плутониевых бенчмарк-моделей PMF и PST.

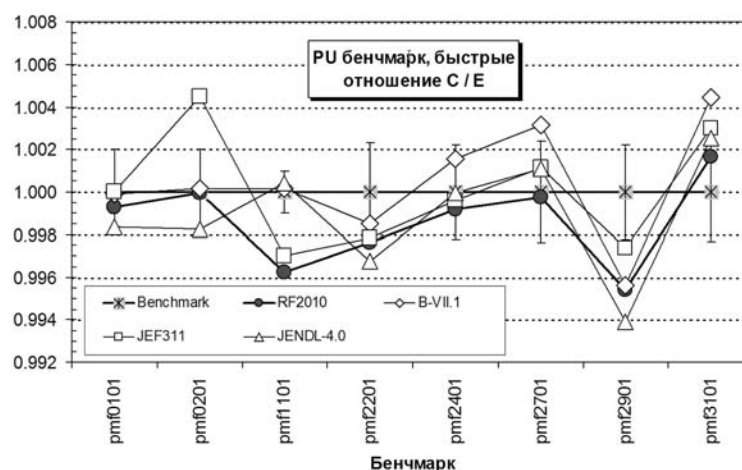


Рис. 4. Сравнение (C/E) расчетов быстрых плутониевых бенчмарк-моделей (PMF) для различных библиотек нейтронных данных

Процедура последовательного тестирования нейтронных данных на результатах интегральных микроэкспериментов и дальнейшая верификация этих данных в расчетах критичности отобранных бенчмарк-конфигураций из международного справочника ICSBEP позволяет оценить качество нейтронных данных для их последующего использования в научно-поисковых и проектных расчетах ЯЭУ.

В таблице 3 приведены сводные результаты выполненного тестирования, из которых видно, что критичность бенчмарк-моделей различных типов описывается в пределах усредненных по набору погрешностей с использованием всех библиотек нейтронных данных. Однако урановые бенчмарки (как быстрые, так и тепловые) лучше описываются с помощью нейтронных данных из РОСФОНД-2010. В то же время, критичность плутониевых наборов бенчмарк-моделей лучше других описывают нейтронные данные из JEFF-3.1.2.

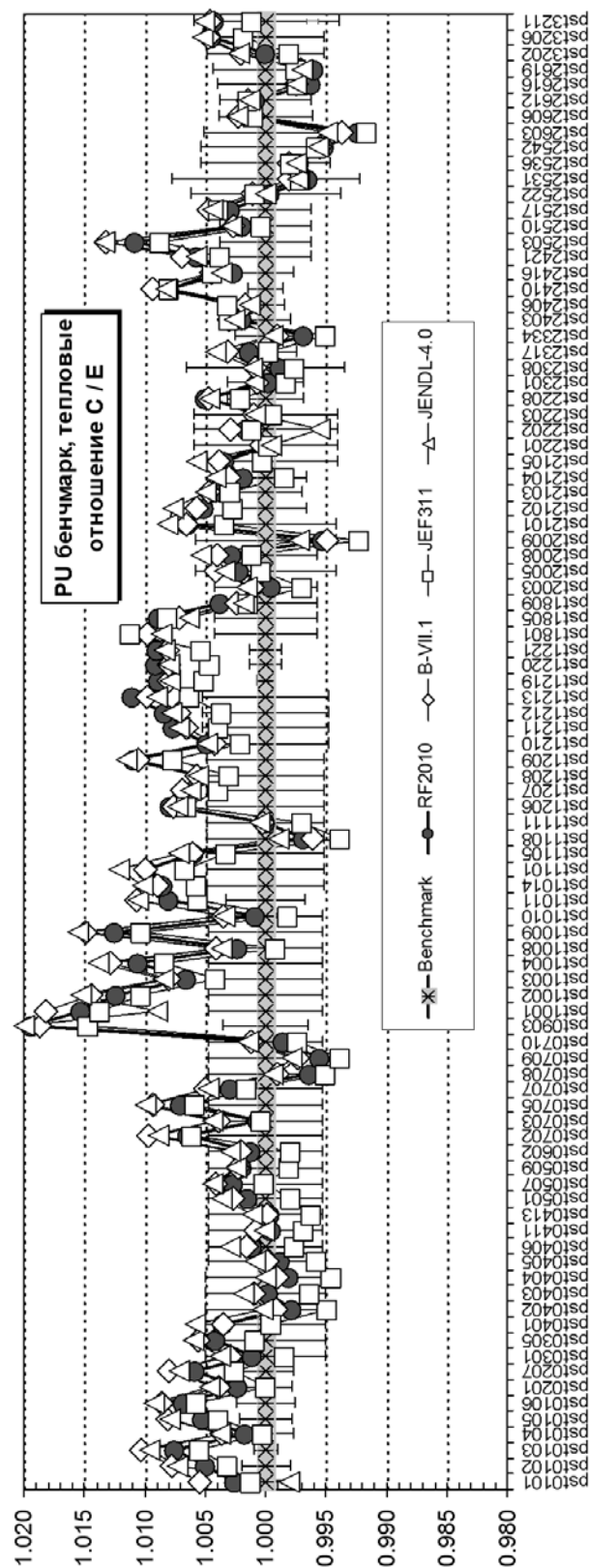


Рис. 5. Сравнение (C/E) расчетов тепловых плутониевых бенчмарк-моделей (PST) для различных библиотек нейтронных данных

Таблица 3

Усредненные величины неопределенности наборов бенчмарк-моделей и величины (С/Е-1) для тестируемых библиотек (в рсм)

Тип бенчмарка	Число бенчмарков в наборе	Среднеквадратичное расхождение	РФ-2010	ENDF/B-VII.1	JEFF-3.1.1	JENDL-4.0
HEU fast	7	21	-1	4	-30	-12
HEU thermal	55	39	-11	-6	-6	4
LEU fast	14	35	1	-20	-51	-71
LEU thermal	35	26	9	6	11	-7
PU fast	8	21	-14	4	0	-11
PU thermal	94	44	34	44	15	45

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для основных реакторных делящихся материалов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu из национальной библиотеки файлов нейтронных данных РОСФОНД-2010 выполнены верификационные расчеты и проведено сравнение с экспериментальными данными по следующим характеристикам: сечение увода под порог реакций (n,f) ^{238}U , (n,f) ^{237}Np , и (n,p) ^{27}Al ; одногрупповые сечения на быстрых спектрах нейтронов (LMFBR и спектрах нейтронов деления ^{235}U и ^{252}Cf); критичность быстрых и тепловых бенчмарк-систем из международного справочника по критической безопасности ICSBER Handbook.

Результаты верификационных расчетов показали хорошую согласованность принятых оценок сечений для ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu из библиотеки РОСФОНД-2010 с результатами широкого спектра экспериментов.

В дальнейшем для верификации следует расширить список интегральных экспериментов и привлечь бенчмарк-эксперименты из международного справочника реакторных экспериментов IRPhEP, в частности, выполненные в ФЭИ на быстром физическом стенде БФС.

Выражаем благодарность Е.В. Рожихину и Ю.Е. Головки за помощь в отборе наиболее информативных экспериментов из международного справочника критической безопасности ICSBER и составлении для них расчетных заданий.

Литература

1. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1, 2. – С. 3
2. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 22, NEA No. 6807, OECD 2009.
3. Shibata K. *et al.* JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering. J. Nucl. Sci. Technol. 48, pp. 1–30, 2011.
4. Chadwick M.B. *et al.* ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nuclear Data Sheets, v.112, 12, 2011.
5. Mughaabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances: Thermal Cross Sections and Resonance Parameters. Elsevier Publisher, Amsterdam, 2006.
6. Mannhart W. Progress Report on Nuclear Data Research in the Federal Republic of Germany. NEA/NSC/DOC(99)10, INDC(Ger)-045, 1999.

7. Горбачева Л.В., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Оценка результатов измерений средних сечений деления ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu на спектрах нейтронов деления ^{235}U и ^{252}Cf . // Атомная энергия. – 1980. – Т. 49. – Вып. 4. – С. 256.
8. Бондаренко И.И., Ковалев В.П. Физические измерения на нейтронах деления с конверторами. / IAEA Seminar Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vienna 1961, v. 2, p. 159.
9. Дулин В.А. и др. Определение сечения увода под порог деления ^{238}U из экспериментов по пропусканию. // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59(2). – С. 116.
10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2009 Edition).
11. Головки Ю.Е., Иванова Т.Т., Николаев М.Н., Рожихин Е.В., Цибуля А.М. Согласованный набор критических экспериментов для верификации нейтронных констант урана-235. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2. – С. 110–125.
12. Головки Ю.Е., Рожихин Е.В., Цибуля А.М., Кошечев В.Н. Выбор согласованного набора критических экспериментов из ICSBER Handbook и оценка точности расчетного предсказания критичности. / Доклад на Международной конференции по ядерной безопасности (ICNC'07). Санкт-Петербург, 2007.
13. Головки Ю.Е., Рожихин Е.В., Цибуля А.М., Кошечев В.Н. Оценка точности расчетного предсказания критичности на основе экспериментов из справочника ICSBER Handbook. / Доклад на международной конференции по физике реакторов (PHYSOR'08), Швейцария, 2008.
14. McFarlane 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.
15. Forrest B.B., Booth T.E. et al. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Overview and Theory. Volume I. LA-UR-03-1987, LANL, (2003).

Поступила в редакцию 03.09.2013 г.

Авторы

Кошечев Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат физ.-мат. наук.

E-mail: bnab@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, начальник лаборатории ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат физ.-мат. наук.

E-mail: bnab@ippe.ru

Николаев Марк Николаевич, главный научный сотрудник отдела ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор физ.-мат. наук, профессор.

E-mail: mnikolaev@ippe.ru

Цибуля Анатолий Макарович, советник директора ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат физ.-мат. наук.

E-mail: tsib@ippe.ru

УДК 621.039.51.17

VERIFICATION OF NEUTRON DATA FOR MAIN REACTOR MATERIALS FROM ROSFOND NEUTRON DATA LIBRARY ON INTEGRAL EXPERIMENTS

Koscheev V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

Recently almost all the available in the world evaluated neutron data libraries, as ENDF/B-VII in the USA, JEFF-3.1 in EU, JENDL-4 in Japan, CENDL-4 in China and RUSFOND in Russia have been essentially updated. These libraries are currently being strongly tested for its preferable use in applications. As a rule, testing of neutron data libraries is widely performed through calculations of criticality for specially selected benchmark models from ICSBEP Handbook. Other sources of information for neutron data testing are also available. They are: one-group cross-sections obtained by weighting with standard fission spectra, and cross-sections for neutron removal to the sub-threshold region for a reaction used as a detector: fission into ^{238}U and ^{237}Np or (n, p) reaction to ^{27}Al . The results of neutron data testing for the main fuel reactor materials ^{238}U , ^{237}U , ^{239}Pu along with traditional criticality calculations of selected benchmark models are presented in the paper.

At the first stage the neutron data for ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu (resonance integrals, one-group cross-sections, cross-sections for neutron removal to the sub-threshold region) from four modern data libraries ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0 and RUSFOND were compared with experimental data. At the second stage of verification the neutron data were verified in criticality calculations of selected sets of benchmark experiments from ICSBEP Handbook. The benchmark experiments selection criteria were: benchmark model simplicity, hydrogen to fuel ratio representativeness, description completeness. Benchmark models were selected both for fast and thermal neutron spectra regions. The list of benchmark models includes 62 configurations with high enriched uranium and 49 models with low enriched uranium fuel, and 102 models with plutonium fuel as well.

The performed verification demonstrates good concordance of the accepted evaluations for ^{235}U , ^{238}U and ^{239}Pu in RUSFOND-2010 data library with results of wide range experiments. The procedure of successive neutron data testing through integral micro-experiments and further verification of data in criticality calculations of selected benchmark configurations from ICSBEP Handbook allows to estimate the quality of neutron data for its further use in scientific and design calculations of nuclear energy installations.

It is proposed to extend the list of experiments and attract benchmark experiments from international IRPhE Handbook of reactor physics experiments, including experiments performed in IPPE on fast physical stand BFS for further RUSFOND data verification.

Key words: evaluation nuclear data files, ROSFOND, verification, benchmark-models.

REFERENCES

1. Zabrodskaya S.V., Ignatyuk A.V., Koscheev V.N. e.a. ROSFOND – Rossijskaya nacional'naya biblioteka ocenennyh nejtronnyh dannyh [ROSFOND – The National Library of evaluated neutron data]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Yadernye konstanty*. 2007, iss. 1-2, pp. 3
2. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 22, NEA No. 6807, OECD 2009.
3. Shibata K. e.a. JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2011, vol. 48, pp. 1–30.
4. Chadwick M.B. e.a. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. *Nuclear Data Sheets*. 2011, vol. 112, 12.
5. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances: Thermal Cross Sections and Resonance Parameters.

Elsevier Publisher, Amsterdam, 2006.

6. Mannhart W. Progress Report on Nuclear Data Research in the Federal Republic of Germany. NEA/NSC/DOC(99)10, INDC(Ger)-045, 1999.

7. Gorbacheva L.V., Manturov G.N., Tsibulya A.M. Ocenka rezul'tatov izmerenij srednih sechenij deleniya ^{235}U , ^{238}U i ^{239}Pu na spektrah nejtronov deleniya ^{235}U i ^{252}Cf [Estimation of measurement results for ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu fission cross-sections using ^{235}U & ^{252}Cf fission neutron spectra]. *Atomnaya energiya*. 1980, vol. 49, iss. 4, pp. 256-259.

8. Bondarenko I.I., Kovalyov V.P. Fizicheskie izmereniya na nejtronah deleniya s konvertorami [Physical measurements of fission neutrons with converters]. IAEA Seminar Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vienna 1961, v. 2, p. 159.

9. Dulin V.A. e.a. Opredelenie secheniya uvoda pod porog deleniya ^{238}U iz eksperimentov po propuskaniyu. [Determination of removal cross-section under ^{238}U fission threshold from transmission experiments]. *Atomnaya energiya*, 1985, vol. 59, iss. 2, pp. 116-119.

10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2009 Edition).

11. Golovko Yu.E., Ivanova T.T., Nikolaev M.N., Rozhihin E.V., Cibulya A.M. Soglasovannyj nabor kriticheskikh eksperimentov dlya verifikatsii nejtronnykh konstant urana-235 [A consistent set of critical experiments to verify neutron constants for ^{235}U]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Yadernye konstanty*. 2007, iss. 1-2, pp. 110-125.

12. Golovko Yu.E., Rozhihin E.V., Tsibulya A.M., Koscheev V.N. Vybory soglasovannogo nabora kriticheskikh eksperimentov iz ICSBEP Handbook i ocenka tochnosti raschetnogo predskazaniya kritichnosti. Doklad na Mezhdunarodnoj konferencii po yadernoj bezopasnosti (ICNC'07). [Selection of a consistent set of critical experiments from the ICSBEP Handbook and verification of criticality prediction calculations. Proceedings of the International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC'07)]. Sankt-Petersburg, 2007.

13. Golovko Yu.E., Rozhihin E.V., Cibulya A.M., Koscheev V.N. Ocenka tochnosti raschetnogo predskazaniya kritichnosti na osnove eksperimentov iz spravochnika ICSBEP Handbook. / Doklad na Mezhdunarodnoj konferencii po fizike reaktorov (PHYSOR'08), Shvejcariya [Verification of criticality prediction calculations based on experiments from the ICSBEP Handbook. Proceedings of the International Conference on Physics of Reactors (PHYSOR'08), Switzerland]. 2008.

14. McFarlane R.E. e.a. NJOY97.0 Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Sections from ENDF/B Data. RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, PSR-368.

15. Forrest B.B., Booth T.E. e.a. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Overview and Theory. Vol. I. LA-UR-03-1987, LANL, (2003).

Authors

Koscheev Vladimir Nikolaevich, Leading Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Phys.-Math.).
E-mail: bnab@ippe.ru

Manturov Gennadij Nikolaevich, Head of Laboratory, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Phys.-Math.).
E-mail: bnab@ippe.ru

Nikolaev Mark Nikolaevich, Principal Scientist of Department, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor.
E-mail: mnikolaev@ippe.ru

Tsibulya Anatolij Makarovich, Director Advisor, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Phys.-Math.).
E-mail: tsib@ippe.ru