

БИБЛИОТЕКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПАДА РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ КОНСТАНТ БНАБ

Д.С. Барабанова*, Г.М. Жердев**

* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.*

249030 Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок 1.

** *ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского*

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1.



Представлены результаты работы по созданию библиотеки погрешностей данных о радиоактивных распадах в формате БНАБ. Сравнены разные оценки погрешностей и на примере тестовой задачи определено их влияние на результат расчета остаточного энергосодержания.

Сформированы таблицы в формате БНАБ, содержащие данные, полученные на основе библиотек формата ENDF-6. Из ENDF/B-7 обработан 3821 изотоп, из JEFF-3.11 – 3852 и из JENDL-4.0 – 1264 изотопа.

Выявлено, что различия в оценках, принятых в разных библиотеках распадаемых данных, сравнительно невелики, но иногда превышают погрешности, принятые в ENDF/B-7 и JEFF-3.11 (как правило, согласующиеся друг с другом).

Ключевые слова: погрешности, радиоактивный распад, радионуклид, библиотека данных о радиоактивных распадах, энергосодержание, БНАБ, ENDF/B-7, JEFF-3.11, JENDL-4.0, СКАЛА.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации широко распространена система констант БНАБ, созданная для проведения инженерных расчетов. Она включает в себя и характеристики распадов радионуклидов.

За рубежом эти данные хранятся, как правило, в международном формате ENDF-6 [1]. В разных странах используются различающиеся библиотеки – ENDF/B-7 в США, JEFF-3.11 в странах ЕС, JENDL-4.0 в Японии. Используемая в РФ библиотека БНАБ содержит характеристики распада радионуклидов в формате, ориентированном на применение этих данных в инженерных программах. Формат БНАБ в отличие от формата ENDF-6 существенно упрощает анализ и коррекцию данных экспертом, а стандартные процедуры доступа к БНАБ позволяют относительно просто использовать библиотеку в программах. Данные в ней тщательно проверяются на противоречивость и эпизодически дополняются из различных источников или корректируются.

Библиотека характеристик распада радионуклидов БНАБ [2] с включенными в нее данными по изотопам была скомпилирована на границе столетий. Неучтенные изотопы в сумме могут выделять до 10% остаточного энергосодержания. Это, как правило, нейтронно-дефицитные ядра.

© *Д.С. Барабанова, Г.М. Жердев, 2015*

Представлялось целесообразным расширить библиотеку и снабдить ее данными для расчета погрешностей этих характеристик.

Для этого необходимо было разработать инструмент извлечения распадных данных из библиотек в формате ENDF-6 и создания на их основе библиотек формата БНАБ вместе с данными по погрешностям характеристик распада, а также получить опыт работы с погрешностями этих данных в рамках системы СКАЛА [3, 4].

Созданный инструмент можно рассматривать в том числе и как способ использования файлов ENDF-6 в рамках системы СКАЛА/БНАБ.

ОБРАБОТКА ФАЙЛОВ ОЦЕНЕННЫХ ДАННЫХ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАСПАДА РАДИОНУКЛИДОВ

Для обработки файлов оцененных нейтронных данных была написана на языке ФОРТРАН программа DECAPRO (*Decay Processing*), которая позволила извлекать данные из файла MF = 8 библиотеки в формате ENDF-6 и на их основе формировать таблицы распадных данных в формате БНАБ. Для записи погрешностей распадных данных предложен тот же формат, что и для самих данных с отличием лишь идентификатора MT, определяющего в этом формате тип данных, содержащихся в таблицах. Для таблиц с погрешностями предложено использовать идентификатор MT со значением 81 (MT = 81).

Программа DECAPRO формирует таблицы БНАБ с MF = 90 (основные распадные данные – периоды полураспада, коэффициенты ветвления по типам распада и составляющие энерговыделения), MF = 91 (линейчатые спектры гамма-излучения), MF = 92 (линейчатые спектры электронов), MF = 93 (выходы, средние и максимальные энергии бета-излучения), MF = 94 (линейчатые спектры альфа-излучения). Переработке в формат БНАБ подвергнуты данные ENDF/B-7, JEFF-3.11 и JENDL4.0. Параллельно с распадными данными формировались и таблицы БНАБ, содержащие их погрешности (с MT = 81).

Детальное описание процедуры переработки было бы чрезмерно сложным. В частности, нелегкую задачу представляло формирование данных о вероятностях различных мод бета-распада (с испусканием вторичных нейтронов, альфа-частиц и др.), преобразование непрерывных спектров и т.д.

Для проведения экспертного анализа были получены библиотеки формата БНАБ на основе оценок ENDF/B-7, JEFF-3.11 и JENDL4.0.

Всего на основе ENDF/B-7 получены данные для 3821 изотопа (при этом 671 изотоп в первом метастабильном состоянии, 66 во втором и один в третьем). По JEFF-3.11 получены данные для 3852 изотопов (699 изотопов в первом метастабильном состоянии, 67 во втором и два в третьем). По JENDL4.0 получены данные для 1264 изотопов (230 в первом метастабильном состоянии и 20 во втором). Этих данных существенно больше, чем содержится сейчас в таблицах БНАБ, – 1565 изотопов, из них 299 в первом и 23 во втором метастабильном состоянии.

Предполагается, что пополнение библиотеки БНАБ [5] новыми данными и модификация имеющихся данных будет выполняться опытными экспертами-ядерщиками на основе сформированных таблиц данных из разных источников с учетом погрешностей этих данных.

Заметим, что оценки погрешностей распадных данных во многих (если не в большинстве) случаях превышают расхождения в оценках, принятых в разных библиотеках. Это и естественно, поскольку основаниями для оценок служат, как правило, одни и те же наборы экспериментов. Такое обстоятельство упрощает отбор данных для библиотеки БНАБ. Что касается погрешностей, то они, как правило, существенно превышают расхождения в оцененных данных.

СРАВНЕНИЕ РАСПАДНЫХ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ БИБЛИОТЕК

Из существующих оценок библиотеки ENDF/B-7 и JEFF-3.11 являются наиболее полными. Имевшаяся в нашем распоряжении библиотека JENDL-4.0 не содержала данных для актинидов. В последующих трех таблицах приводятся данные о локальном энерговыделении и об энергии, переносимой гамма-излучением для целого ряда нуклидов.

Список изотопов в таблицах взят из теста по оценке остаточного энерговыделения в топливе БНК, о котором речь пойдет ниже.

В таблицах приводятся величины (колонка «Разброс»), определяемые как

$$\sqrt{\sum_{k=1}^N (E_k - E^{cp})^2 / N},$$

где N – число источников данных; E^{cp} – среднее значение.

Таблица 1

Энергия, уносимая гамма-квантами при распаде изотопов в расчете остаточного энерговыделения

Изотоп	БНАБ	ENDF/B-7	JEFF-3.11	JENDL-4.0	Среднее	Разброс	Погрешность ENDF/B-7
Y-91	0.0036	0.0031	0.0031	0.0031	0.0032	0.00021	0.00048 (15%)
Zr95	0.7370	0.7321	0.7328	0.7321	0.7335	0.00203	0.002300 (3%)
Nb95	0.7670	0.7645	0.7645	0.7645	0.7651	0.00109	0.00006 (0.01%)
Ru03	0.4840	0.4958	0.4961	0.4960	0.4930	0.00518	0.00609 (1.2%)
Rh06	0.2090	0.2061	0.2043	0.2060	0.2063	0.00169	0.00260 (1.3%)
Cs34	1.5540	1.5544	1.5554	1.5544	1.5546	0.00053	0.00085 (0.05%)
Ba7m	0.5970	0.5972	0.5984	0.5948	0.5969	0.00130	0.00093 (0.16%)
Ba40	0.1830	0.1822	0.1802	0.1820	0.1818	0.00105	0.00123 (0.68%)
La40	2.3150	2.3083	2.3126	2.3080	2.3110	0.00294	0.00389 (0.17%)
Ce41	0.0766	0.0766	0.0765	0.0767	0.0766	0.00007	0.00047 (0.62%)
Pr44	0.0318	0.0289	0.0338	0.0289	0.0308	0.00207	0.00036 (1.2%)
Cm42	0.0014	0.0019	0.0014		0.0015	0.00025	0.00013 (7%)

Таблица 2

Энергия, уносимая электронами и бета-частицами при распаде изотопов в расчете остаточного энерговыделения

Изотоп	БНАБ	ENDF/B-7	JEFF-3.11	JENDL-4.0	Среднее	Разброс	Погрешность ENDF/B-7
Y-91	0.6020	0.6030	0.6059	0.6032	0.6035	0.00146	0.00083
Zr95	0.1150	0.1180	0.1200	0.1181	0.1178	0.00180	0.00061
Nb95	0.0434	0.0445	0.0445	0.0445	0.0442	0.00048	0.00015
Ru03	0.0700	0.0665	0.0666	0.0665	0.0674	0.00151	0.00150
Rh06	1.4090	1.4134	1.4114	1.4100	1.4110	0.00166	0.01210
Cs34	0.1630	0.1641	0.1636	0.1638	0.1636	0.00039	0.00071
Ba7m	0.0651	0.0641	0.0607	0.0636	0.0634	0.00163	0.00070
Ba40	0.3110	0.3182	0.3106	0.3200	0.3149	0.00419	0.05016
La40	0.5330	0.5355	0.5351	0.5350	0.5346	0.00097	0.01484
Ce41	0.1700	0.1703	0.1684	0.1704	0.1698	0.00080	0.00401
Pr44	1.2060	1.2085	1.2006	1.2090	1.2060	0.00332	0.00501
Cm42	0.0094	0.0087	0.0102		0.0094	0.00062	0.00008

Таблица 3

Относительные расхождения констант энерговыделения, уносимого гамма-квантами при распаде изотопов по различным оценкам, %

Изотоп	ENDF/B-7	JEFF-3.11	JENDL-4.0	Среднее	Разброс, %
Y-91	15.39	15.38	16.13	15.63	2.24
Zr95	0.31	0.31	0.31	0.31	0.07
Nb95	0.01	0.01	0.01	0.01	0.80
Ru03	1.23	1.23	1.21	1.22	0.67
Rh06	1.26	1.39	1.46	1.37	6.00
Cs34	0.05	0.03	0.06	0.05	21.85
Ba7m	0.16	0.22	0.17	0.18	15.78
Ba40	0.68	0.91	0.71	0.77	13.52
La40	0.17	0.13	1.04	0.44	94.68
Ce41	0.62	0.44	0.65	0.57	16.52
Pr44	1.23	1.84	1.38	1.48	17.35
Cm42	7.00	9.85		8.43	16.91

На рисунке 1 демонстрируется энергия, уносимая альфа-частицами при распаде для двух характерных случаев. Для урана-235 разброс (заштрихованная область) меньше приписанных в оценке ENDF/B-7 погрешностей. Это типичный случай. Пример для плутония-241 демонстрирует случай, когда разброс больше оцененных погрешностей.

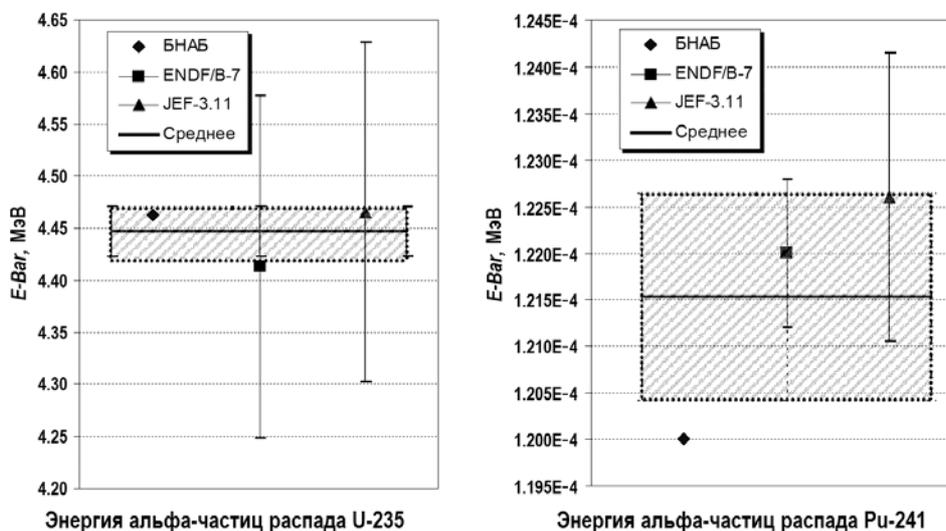


Рис. 1. Энергия, уносимая альфа-частицами при распаде актинидов по различным оценкам, и ее погрешности

Как видно из приводимых данных, различия в оценках, принятых в разных библиотеках распадных данных, сравнительно невелики, но порой превышают погрешности, следующие из оценки ENDF/B-7. Погрешности различных оценок, как правило, согласуются между собой, поэтому полученная в работе информация позволит, как представляется авторам, без большого труда пополнить библиотеку БНАБ отсутствующими данными, приняв для них средние значения из других библиотек. Что касается погрешностей, то целесообразно принять наиболее консервативную оценку (в частности, величину разброса между оценками).

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ПО ПОГРЕШНОСТЯМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

В качестве примера рассмотрено остаточное энерговыделение в топливе, выгруженном из реактора типа БНК (БН-1200) – коммерческого быстрого реактора большой мощности в установившемся режиме перегрузок на пятый год с рециклированием топлива и его выдержки 35 дней. Рассматриваются данные для изотопов, давших более одного процента в остаточное энерговыделение. Аналогичные расчеты производились в лаборатории ГНЦ РФ-ФЗИ.

В таблице 4 представлена оценка, выполненная на основе таблиц погрешностей распадных данных, сформированных в формате БНАБ на основе ENDF/B-7. Учитывались две составляющие погрешностей – «константная» (за счет неточности данных о выходах и энергиях излучений) и «полупериодная» (в том числе за счет неточности знания постоянных распада).

Погрешности константной и полупериодной составляющих считались независимыми. Относительная итоговая погрешность энерговыделения вычислялась в предположении независимости погрешностей вкладов отдельных изотопов. Буквой *Z* отмечена погрешность локального энерговыделения, обусловленного торможением заряженных частиц; *Gam* означает «переносную» часть энерговыделения, обусловленную гамма-излучением.

Таблица 4

Погрешности, вносимые в расчет энерговыделения по изотопам и компонентам, на основе данных ENDF/B-7 и по оценке экспертов ГНЦ РФ-ФЗИ, %

Изотоп	ФЗИ				ENDF/B-7			
	Константная составляющая, %		С учетом составляющей полураспада, %		Константная составляющая, %		С учетом составляющей полураспада, %	
	<i>Z</i>	<i>Gam</i>	<i>Z</i>	<i>Gam</i>	<i>Z</i>	<i>Gam</i>	<i>Z</i>	<i>Gam</i>
Y-91	0.01	1.05	0.01	1.05	0.01	0.69	0.01	0.69
Zr-95	0.17	0.09	0.17	0.09	0.06	0.03	0.06	0.03
Nb-95	0.05	0.001	0.05	0.003	0.05	0.00	0.05	0.00
Ru-103	0.22	0.24	0.22	0.24	0.18	0.10	0.18	0.10
Rh-106	0.71	0.63	0.76	0.68	0.19	0.28	0.20	0.31
Cs-134	0.05	0.02	0.05	0.02	0.01	0.001	0.01	0.001
Ba-137m	0.12	0.01	0.12	0.01	0.01	0.002	0.01	0.002
Ba-140	0.07	0.01	0.07	0.01	0.18	0.01	0.18	0.01
La-140	0.07	0.01	0.07	0.01	0.20	0.01	0.20	0.01
Ce-141	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.01	0.04	0.01
Pr-144	0.05	0.15	0.06	0.15	0.05	0.14	0.06	0.14
Cm-242	0.03	0.39	0.03	0.39	0.04	0.27	0.04	0.27
Суммарная погрешность	0.89	1.49	0.93	1.52	0.44	0.91	0.45	0.93

Как видно из приведенных данных, оценки погрешностей энерговыделения могут значительно различаться. В последней строке таблицы приводятся составляющие суммарной погрешности энерговыделения по всем рассмотренным нуклидам. Расхождения здесь, как и следовало ожидать, не столь велики. Оценки экспертов более консервативны по сравнению с оценкой ENDF/B-7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная программа перевода распадных данных из формата ENDF в формат БНАБ позволила представить в этом формате данные для всех практически значимых нуклидов. Это открыло путь к пополнению библиотеки распадных данных БНАБ недостаю-

щей сейчас информацией. Была создана библиотека данных о погрешностях характеристик распада и появилась возможность включения этих данных в эту библиотеку БНАБ. Оценены погрешности расчета энерговыделения для тестовой модели в сравнении с моделями других авторов и продемонстрирована адекватность новых данных.

Авторы выражают глубочайшую благодарность профессору М.Н. Николаеву за консультации, оказанные по тематике работы.

Литература

1. *Trkov A., Herman M., Brown D.A.* ENDF-102, ENDF-6 Formats Manual, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII // BNL90365-2009 Rev.2, Nov. 2011.
2. *Забродская С.В., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Библиотека распадных данных и выходы продуктов деления в системе константного обеспечения БНАБ-93. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. – Вып. 2. – 2000.
3. *Жердев Г.М.* SKALA – The computing system for an estimation of nuclear and radiation safety. / Proc. Int. Conf. «M&C 2005», Avignon, France, September 12-15, 2005, on CD-ROM – sect. 315.
4. *Власкин Г.Н., Жердев Г.М., Рогожкин В.Ю., Николаев М.Н. и др.* Расчет интенсивности источников радиационных излучений (программа SOURCE). // ВАИТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2002. – Вып. 4. – С. 39-60.
5. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Система групповых констант БНАБ-93 / Верификационный отчет. Москва. Межведомственная комиссия по аттестации справочных данных в различных тематических направлениях атомной науки, техники и технологии. 1995.

Поступила в редакцию 26.01.2015 г.

Авторы

Барабанова Дарья Сергеевна, студентка 6 курса
E-mail: dassha20081@rambler.ru

Жердев Геннадий Михайлович, старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук
E-mail: jerdev@ippe.ru

UDC 621.039.51.17

RADIOACTIVE DECAY DATA UNCERTAINTIES LIBRARY OF ISOTOPES FOR ABBN CONSTANT SYSTEM

Barabanova D.S.*, Zherdev G.M.**

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI». 1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249032 Russia

** FSUE «State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n.a. A.I. Leypunsky». 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

Most of evaluated data libraries ENDF/B-7 in USA, JEFF-3.11 in EU countries, JENDL-4.0 in Japan have evaluated decay data for radioactive isotopes. As usual these data are presented at international format ENDF-6. Such format isn't suitable for engineering calculation, so data are rewritten in other formats. ABBN- constant library is one of the most used.

This article contains the creation results of uncertainty data library of decay data at the ABBN-format. The analyses of different evaluations are presented, as well calculation results of these uncertainties on the test task.

As the result 3821 files were processed from ENDF/B-7, 3852 files – from JEFF-3.11, 1264 files – from JENDL-4.0. and tables with decay data at ABBN-format were formed.

The evaluations of decay data uncertainties were made. It was found that differences in evaluations are not large, though sometimes are more than uncertainties in ENDF/B-7 and JEFF-3.11. As a rule uncertainties in different libraries are agree.

The evaluation of uncertainty at energy calculation for case of test model BNK showed adequacy of new data.

Key words: uncertainties, radioactive decay, radionuclide, radioactive decay data library, energy release, ABBN, ENDF/B-7, JEFF-3.11, JENDL-4.0, SCALE.

REFERENCES

1. Trkov A., Herman M., Brown D. A., ENDF-102, ENDF-6 Formats Manual, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. BNL90365-2009 Rev. 2, Nov. 2011.
2. Zbrodskaya S.V., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Biblioteka raspadnyh dannyh i vyhody produktov deleniya v sisteme konstantnogo obespecheniya BNAB-93. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tehniki*. Ser. «Yadernye Konstanty», iss. 2, 2000 (in Russian).
3. Zherdev G.M. SKALA – The Computing System for an Estimation of Nuclear and Radiation Safety. Proc. Int. Conf. «M&C 2005», Avignon, France, September 12-15, 2005, on CD-ROM – sect. 315.
4. Vlaskin G.N., Zherdev G.M., Rogozhkin V.Yu., Nikolaev M.N. et al. Raschet intensivnosti istochnikov radiatsionnyh izluchenij (programma SOURCE). *Voprosy Atomnoj Nauki i Tehniki*. Ser. «Fizika yadernyh reaktorov». 2002, iss. 4, pp. 39-60 (in Russian).
5. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Sistema gruppovyh konstant BNAB-93. Verifikatsionnyj otchyot. Moskva, Mezhvedomstvennaya komissiya po attestatsii spravochnyh dannyh v razlichnyh tematicheskikh napravleniyah atomnoj nauki, tehniki i tehnologii. 1995 (in Russian).

Authors

Barabanova Dar'ya Sergeevna, 6 year Student
E-mail: dassha20081@rambler.ru

Zherdev Gennadij Mihajlovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)
E-mail: jerdev@ippe.ru