

БИБЛИОТЕКА ПРОТОННЫХ АКТИВАЦИОННЫХ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ HERAD-2008

Ю.А. Коровин*, А.А. Наталенко, Г.Б. Пильнов*, А.Ю. Конобеев**,
А.Ю. Станковский***, А.В. Тихоненко***

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*

***Association FZK-Euratom, Forschungszentrum Karlsruhe,*

****Advanced Nuclear Systems Institute, SCK · CEN,*



В научно-исследовательской лаборатории «ПУСК» ИАТЭ создана библиотека протонных активационных ядерных данных в энергетическом диапазоне налетающего протона от 150 МэВ до 1 ГэВ, охватывающая широкий спектр ядер (всего 682 различных нуклида) с зарядовыми числами от 1 до 84. Файлы ядерных данных были рассчитаны с помощью моделей ядерных реакций, включенных в современные программные комплексы MCNPX 2.6c и CASCADE/INPE. Для выбора расчетных моделей были использованы различные статистические корреляции с экспериментальными данными из библиотеки EXFOR. Все файлы записаны в формате ENDF-6. Созданный набор файлов получил название HERAD-2008 (High-Energy Proton Activation Data).

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития различных направлений науки и техники во многом зависят от достоверности знаний о свойствах веществ и материалов. В связи с этим проблема получения достоверных данных имеет первостепенное значение. Эта проблема очень важна для ядерной науки и техники в связи с предъявлением высоких требований к используемым веществам и материалам. Ведь от точности и достоверности знаний о них существенно зависят технико-экономические показатели и безопасность ядерной энергетики, а также эффективность использования достижений ядерной науки в иных отраслях производства.

В эпоху ядерного ренессанса устойчивое развитие отрасли во многом зависит от решения проблемы обращения с долгоживущими радиоактивными нуклидами, произведенными в результате деятельности предприятий атомной энергетики, представляющими опасность для окружающей среды и не пригодными для дальнейшего использования. В качестве стратегии обращения с радиоактивными отходами сегодня предлагается процесс их трансмутации, т.е. преобразования в стабильные или короткоживущие изотопы, не представляющие опасности. Для трансмутации требуется использование дорогостоящих специализированных энергетических установок, разработка и конструирование которых продолжает-

ся на протяжении последних 20-ти лет. Одним из вариантов такой установки, получившей на сегодняшний день наибольшую проработку, является электроядерная установка (ЭЛЯУ). ЭЛЯУ представляет собой подкритический размножающий бланкет, нейтронопроизводящую мишень, облучаемую протонным пучком, и ускоритель протонов. Несколько лет назад в США и Японии появились первые исследовательские прототипы ЭЛЯУ.

Для расчета интегральных характеристик ЭЛЯУ, таких как эффективный коэффициент размножения нейтронов и эффекты реактивности, в большинстве случаев достаточно ядерных данных в области энергий до 20 МэВ. Но для моделирования переноса нейтронов и протонов и расчетов выхода частиц, накопления продуктов глубокого расщепления, энерговыделений, радиационных повреждений материалов и многих других подобных задач, в которых приходится рассматривать отдельные элементы установок, необходимы достоверные оцененные ядерные данные в более широком энергетическом диапазоне – от нескольких килоэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт. Таким образом, библиотека HEPAD-2008 может найти широкое применение в области фундаментальных и прикладных исследований по физике и кинетике подкритических систем, основанных на синтезе реакций расщепления и деления (Accelerator-Driven Systems) и технологий выжигания долгоживущих отходов (Accelerator-Driven Transmutation Technologies).

АКТИВАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И СТРУКТУРА ФАЙЛОВ HEPAD-2008

Накопленные экспериментальные данные в области активации материалов содержатся в библиотеке EXFOR[1]. Активационные эксперименты дороги и трудоемки. Поэтому в целях обеспечения активационных исследований ядерными данными необходимо широкое использование программ для расчета сечений ядерных реакций. Большинство экспериментов выполняется на мишенях с природным изотопным составом данного элемента и определяется только кумулятивный выход остаточных ядер. Надежные теоретические вычисления необходимы для получения независимых выходов для отдельных изотопов.

В мире существует ряд библиотек и отдельных файлов активационных данных, содержащих результаты для широкого диапазона нуклидов и реакций. Крупные библиотеки оцененных протонных активационных данных, содержащие результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, приведены в табл. 1. Первая библиотека – это объединенный европейский активационный файл, включающий в себя ряд других библиотек [2]. PADF-2007 – это протонная активационная библиотека, разработанная Центром ядерной безопасности в Карлсруэ (Германия) [3]. JENDL/HE-2007 представляет собой часть японской библиотеки ядерных данных JENDL [4]. JEFF-3.1 – это международная библиотека оцененных ядерных данных, создаваемая под эгидой Агентства по ядерной энергии (NEA) [5]. Как видно из табл. 1, HEPAD-2008 представляет собой новую библиотеку, не имеющую аналогов не только в России, но и в мире. Конкуренцию ей может составить только библиотека JENDL/HE-2007, но детальный анализ ядерных данных, содержащихся в ней, выявил ряд нуклидов, для которых данные могут быть переоценены и уточнены, что и было проделано в ходе создания библиотеки HEPAD-2008.

Библиотека HEPAD-2008 включает в себя набор отдельных файлов для 682 нуклидов. Каждый файл содержит данные по сечениям протонных реакций с ядрами мишеней в энергетическом диапазоне от 150 МэВ до 1 ГэВ. Активационные данные представлены с шагом 5 МэВ в энергетическом диапазоне от 150 до 250 МэВ, 25 и 50 МэВ в энергетических диапазонах от 250 до 600 МэВ и от 600 МэВ до 1 ГэВ

Таблица 1

Библиотеки оцененных протонных активационных данных

Название библиотеки	Общее количество файлов/ Диапазон зарядового числа ядер	Энергетический диапазон первичного протона
The European Activation File, EAF-2007	816 / 1–100	До 60 МэВ
Proton Activation Data File, PADF-2007	2355/ 12–88	До 150 МэВ
JENDL High Energy File 2007, JENDL/HE-2007	106 / 1–95	До 3 ГэВ
Joint Evaluated Fission and Fusion File, JEFF-3.1	26 / 20–83	До 200 МэВ
High-Energy Proton Activation Data, HEPAD-2008	682 / 1–84	До 1 ГэВ

соответственно. Все файлы записаны в формате ENDF-6 с использованием секций MF=3, MT=5 и MF=6, MT=5. В секции MF=3, MT=5 представлены суммы неупругих сечений реакций в зависимости от энергии налетающего нейтрона; в секции MF=6, MT=5 – коэффициенты выходов остаточных ядер в зависимости от энергии налетающего нейтрона.

О РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЯХ ДЛЯ HEPAD-2008

В настоящее время в качестве расчетных инструментов моделирования ядерных реакций используются программы, реализующие как различные полуклассические подходы, так и модели квантово-молекулярной динамики (QMD). Границы применения той или иной полуклассической модели в конечном итоге определяются энергией налетающей частицы или ядра. Для описания высокоэнергетических взаимодействий (от 150 МэВ и выше) используются статистические модели; широкое распространение получила модель внутриядерного каскада (МВК). Нужно отметить, что понятие «выше» весьма условно, т. к. данные модели дают разумные результаты лишь в областях энергий до 3–5 ГэВ, где еще возможно пренебречь процессами многочастичного взаимодействия. В диапазоне от нескольких десятков мегаэлектронвольт до 150–250 МэВ используются различные предравновесные экситонные модели. В области более низких энергий используются феноменологическая модель испарения, предложенная Вайскопфом, и модель Хаузера-Фешбаха. Наряду с испарением в области низких энергий описывается конкурирующий процесс деления тяжелых ядер. На рисунке 1 схематично изображен подход к описанию высокоэнергетических процессов, реализуемый в современных расчетных программах. Важнейшим обстоятельством, влияющим на результа-

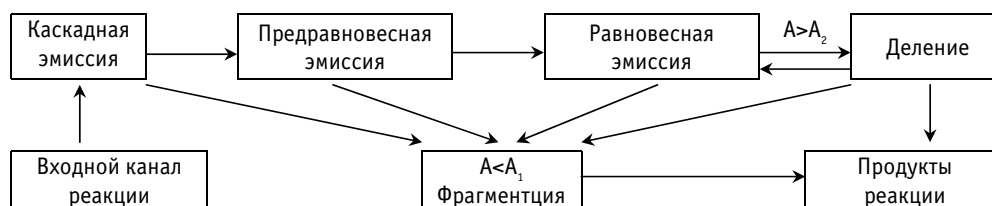


Рис. 1. Схематичное изображение ядерной реакции

ты моделирования ядерной реакции, помимо параметров каждой из модели, являются критерии для перехода между моделями.

Если в процессе реакции образуется осколок с массовым числом, меньшим A_1 , его дальнейшее поведение описывается в рамках модели фрагментации. Аналогично, поведение осколка с массовым числом, большим A_2 , описывается с помощью модели деления. Дальнейшее поведение осколков деления описывается в рамках испарительной модели. Для расчетов протонных активационных файлов на основе существующих программ были выбраны MCNPX 2.6c [6] и CASCADE/INPE [7]. Для описания ядер-ядерных взаимодействий в программу MCNPX 2.6c включены различные указанные выше модели, есть возможность использовать их комбинации.

В таблице 2 подробно представлены физические модели, реализуемые в вышеупомянутых программах и примененные для расчетов HEPAD-2008.

Среди MBK наиболее сложными, учитывающими ряд квантовых эффектов и дающими наилучшие результаты моделирования конкретных ядер в выбираемом диапазоне энергий, являются модели INCL4 и JINR/Dubna. Улучшение этих моделей и модели ISABEL продолжается и в настоящее время. Учет образования кластеров с массовыми числами $A \leq 4$ на каскадной стадии в моделях INCL4 и CEM03.01 является весомой положительной особенностью этих моделей. В области предравновесных процессов отметим, что в модели многочастичной предравновесной эмиссии (MEM) рассматриваются и внутриядерные переходы с уменьшением числа экситонов в конфигурационном пространстве.

При расчете сечений ядерных реакций для легких ядер использовалась только программа MCNPX. Более того, большинство комбинаций каскадно-предравновесно-испарительных моделей также не пригодно для ядер с массовым числом $A < 4$. Единственная модель, позволяющая производить расчет для ядер с массовым числом $A < 4$ в составе MCNPX 2.6c, – это CEM03.01, которая и использовалась для расчета активационных файлов в соответствующем массовом диапазоне. Однако для модели фрагментации в рамках CEM03.01, необходима дальнейшая доработка [23].

Таблица 2

Физические модели, реализуемые в программах MCNPX 2.6c и CASCADE/INPE

Расчетная модель	Программа	Модели для различных стадий ядерной реакции				
		Внутриядер- ный каскад	Предравноес- ная стадия	Равновесная стадия	Деление	Фрагментация
Bertini/Dresner	MCNPX 26C	Bertini [9, 10]	MPM [15]	Dresner [17]	RAL [20]	Fermi Breakup Модель [21]
Bertini/ABLA	MCNPX 26C			ABLA [18]		
ISABEL/Dresner	MCNPX 26C	ISABEL [11,12]		Dresner	RAL	
ISABEL/ABLA	MCNPX 26C			ABLA		
INCL4/Dresner	MCNPX 26C	INCL4 [13]		Dresner	RAL	
INCL4/ABLA	MCNPX 26C			ABLA		
CEM03.01 [8]	MCNPX 26C	JINR/Dubna [14] (с изменениями)	MEM [16]	GEM2 [19, 20]		Fermi Breakup модель (с изменениями) [22]
CASCADE	CASCADE/ INPE	JINR/Dubna	–	JINR/Dubna (Weisskopf model)	JINR/ Dubna	Не рассматри- вается

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ EXFOR

При расчете сечений недостаточно руководствоваться лишь аналитическими и экспертными оценками. Для выбора той или иной модели был проведен статистический анализ существующих экспериментальных данных и результатов расчета по восьми моделям, указанных в табл. 2 (Bertini/Dresner, Bertini/ABLA, ISABEL/Dresner, ISABEL/ABLA, INCL4/Dresner, INCL4/ABLA, CEM03.01 и CASCADE).

При проведении анализа авторами были выбраны все подходящие экспериментальные данные из библиотеки EXFOR – около 4000 протонных экспериментальных точек (измерений) для более, чем 1000 реакций на различных ядрах с зарядовым числом $Z = 6-84$ в энергетическом диапазоне $E = 150-1000$ МэВ. Рассматривались следующие реакции с независимыми выходами изотопов: (p, n) , (p, α) , (p, t) , (p, d) , $(p, {}^3\text{He})$ и другие, обозначенные как (p, x) . Наряду с независимыми выходами изотопов в рассмотрение были включены

- реакции образования ядер в основных состояниях, если метастабильное ядро переходит в основное состояние с вероятностью более 90% (вероятности переходов взяты из библиотеки FENDL-2/D);
- реакции для натуральных смесей, когда имеющаяся информация позволяет говорить о реакции на отдельном изотопе;
- суммы выходов ядер в основном или метастабильном состоянии, а также в основном, первом и втором метастабильном состояниях в том случае, если информации для этого достаточно, и сумма не приведена авторами эксперимента.

Распределения выбранных экспериментально измеренных значений в зависимости от энергии налетающего протона и массового числа ядра-мишени приведены на рис. 2. При этом наиболее информативным энергетическим диапазоном является $E=150-450$ МэВ (60% от общего числа выбранных экспериментальных данных), а также отдельные энергетические точки – 500, 600, 660, 800 МэВ и 1 ГэВ. Для изотопов ${}^{27}\text{Al}$ и ${}^{209}\text{Pb}$ в библиотеке EXFOR представлено наибольшее количество экспериментальных значений.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТ ФАЙЛОВ NERAD-2008

Из всех рассмотренных статистических методов (метода наименьших квадратов, корреляционного, факторного и регрессионного анализов), в конечном итоге, предпочтение было отдано факторному анализу. Для оценки близости рассчитанных и экспериментальных данных весь диапазон экспериментальных точек был разбит на примерно равные поддиапазоны по массовому числу ядра-

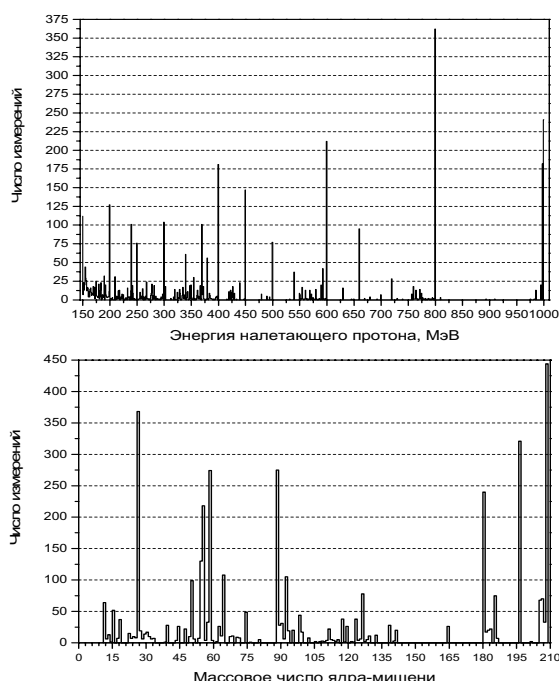


Рис. 2. Распределения экспериментальных измерений в зависимости от энергии налетающего протона и массового числа ядра-мишени

мишени. Каждый поддиапазон включал в себя порядка 400 экспериментальных точек, для которых были вычислены значения сечений выхода остаточных ядер для реакций типа (p,x) по всем восьми расчетным моделям. Данная процедура позволила перейти к частотному описанию моделей и частично нивелировать отсутствие экспериментальных данных для ряда нуклидов.

В рамках факторного подхода в качестве оценочного параметра принята линейная комбинация факторов согласия, рассчитываемых по формулам

$$F = 10^{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lg \sigma_i^{exp} - \lg \sigma_i^{calc})^2}},$$

где N – общее число экспериментальных точек; σ_i^{exp} – экспериментальное значение сечения, σ_i^{calc} – вычисленное значение сечения;

$$H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_i^{exp} - \sigma_i^{calc}}{\Delta \sigma_i^{exp}} \right)^2},$$

где $\Delta \sigma_i^{exp}$ – погрешность экспериментального значения сечения [24].

В данном случае фактор F позволяет оценить взаимосвязь между рассчитанными и экспериментальными данными, а фактор H – учесть погрешность экспериментальных данных. Оба эти фактора широко используются в подобных сравнениях. Линейная комбинация факторов согласия вычислялась в виде суммы факторов F и H с весом, равным суммарному значению каждого фактора для всех моделей в выбранном диапазоне массовых чисел ядра-мишени.

В качестве отбраковочных использовались следующие критерии:

- исключалась из рассмотрения экспериментальная точка, для которой отношение экспериментальных и теоретических сечений выхода остаточного ядра выпадает из диапазона 0.01–100;
- исключалась из рассмотрения экспериментальная точка в случае, если хотя бы одно значение сечения по одной из рассматриваемых моделей было равно нулю;
- при расчете фактора согласия H исключалась из рассмотрения экспериментальная точка, если экспериментальная погрешность сечения не была указана авторами эксперимента или равнялась нулю.

Результаты вычислений приведены в табл. 3. Ввиду ограничения использования большинства выбранных моделей для расчета активационных сечений в области легких ядер ^1H – ^4He факторный анализ не проводился.

На основе результатов, приведенных в табл. 3, для каждого поддиапазона массовых чисел изотопов были отобраны оптимальные расчетные модели, которые наиболее точно согласуются с существующими на сегодняшний день активационными экспериментальными данными. В таблице 4 представлены выбранные модели для каждого поддиапазона. На основе выбранных моделей производился расчет активационных данных для создания библиотеки HEPAD-2008.

В диапазоне массовых чисел 56–59 для расчетов была выбрана модель Bertini/Dresner. Это позволило сэкономить общее время вычислений и, как видно из таблицы 3, практически не повлияло на результат, в рассматриваемом поддиапазоне массовых чисел MBK INCL4 и Bertini дают весьма близкие результаты. В отношении времени вычислений речь идет о десятикратном выигрыше при расчете одного файла.

На основе выходных файлов MCNPX 2.6c и CASCADE/INPE, производилась компиляция активационных файлов в формате ENDF-6. В качестве отборочного критерия для включения протонных данных в файлы была выбрана относительная

Таблица 3

Значения линейной комбинации нормированных факторов согласия H и F в зависимости от поддиапазона массового числа ядер-мишени

Поддиапазон А ядра-мишени	Bertini/ ABLA	Bertini/ Dresner	CEM03.01	INCL4/ ABLA	INCL4/ Dresner	ISABEL/ ABLA	ISABEL/ Dresner	CASCADE
12-19	0.3069	0.2931	0.1818	0.3660	0.3509	0.2583	0.2431	-
23-27	0.2730	0.1765	0.2784	0.3050	0.1657	0.3168	0.2232	0.2613
28-55	0.2820	0.2962	0.2123	0.2353	0.2379	0.2728	0.2898	0.1736
56-59	0.2442	0.2170	0.2354	0.2846	0.2160	0.2799	0.2436	0.2793
60-89	0.3001	0.3157	0.1814	0.2814	0.2933	0.2461	0.2413	0.1406
90-124	0.3523	0.2132	0.3371	0.2448	0.1747	0.2738	0.2175	0.1865
125-181	0.2634	0.2800	0.2312	0.2642	0.2738	0.2415	0.2362	0.2096
182-197	0.3092	0.3078	0.1373	0.3055	0.3189	0.2275	0.2515	0.1424
206-209	0.2849	0.3176	0.1597	0.2525	0.2952	0.2224	0.2700	0.1978

Таблица 4

Расчетные модели для создания библиотеки NEPAD-2008

Поддиапазон	Рекомендованная модель для расчета
1-H-1 - 10-Ne-22	CEM03.01
11-Na-23 - 13-Al-27	INCL4/Dresner
12-Mg-28 - 27-Co-55	CASCADE
29-Cu-56 - 28-Ni-59	Bertini/Dresner
26-Fe-60 - 40-Zr-89	CASCADE
38-Sr-90 - 54-Xe-124	INCL4/ Dresner
50-Sn-125 - 75-Re-181	CASCADE
72-Hf-182 - 84-Po-210	CEM03.01

ошибка, рассчитанная как отношение оценки дисперсии и среднего значения вероятности образования данного остаточного ядра в результате розыгрыша N Монте-Карло историй [25]:

$$R = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} - \frac{1}{N} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{n} - \frac{1}{N} \right]^{1/2},$$

где i – номер разыгрываемой Монте-Карло истории; N – общее число историй; x_i – вероятность образования данного остаточного ядра в результате розыгрыша i -ой истории (может принимать значения 0 или 1); n – число Монте-Карло историй, в результате которых образовалось данное остаточное ядро.

В файл записывались ядерные данные для выбранного канала реакции, если значение относительной ошибки не превышало 20%.

В завершение работы было произведено сравнение данных файлов HEPAD-2008 и экспериментальных данных EXFOR. В ряде случаев были обнаружены значительные расхождения, которые частично были устранены там, где полнота экспериментальных данных позволила это сделать. На рисунке 3 приведены несколько примеров соответствия экспериментальных данных и данных из файлов HEPAD-2008.

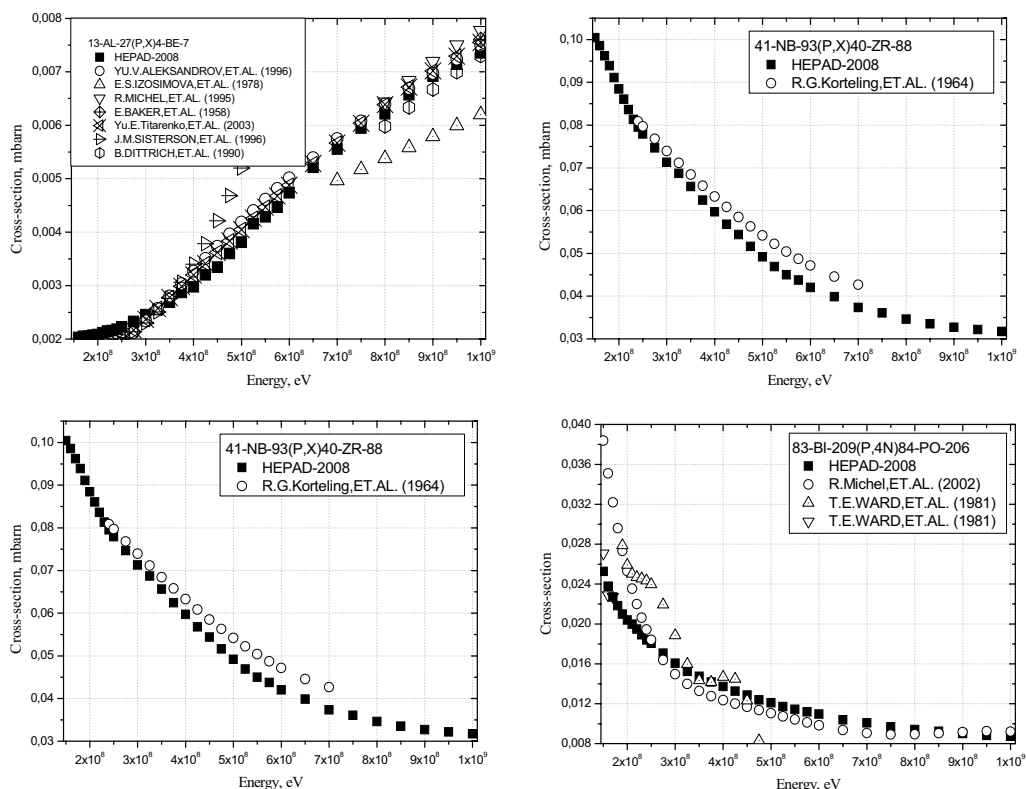


Рис. 3. Сечения выхода изотопов. Сравнение данных EXFOR и HEPAD-2008

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана библиотека протонных активационных ядерных данных HEPAD-2008. Расчет значительной части файлов производился с использованием JINR/Dubna каскадно-испарительной модели, модифицированной в программах CEM03.01 и CASCADE/INPE. Оставшаяся часть сечений была рассчитана по программе MCNPX 2.6c с использованием испарительной и делительной моделей Dresner и RAL в комбинации с MBK INCL4. Такой выбор моделей был продиктован результатами сравнения экспериментальных активационных данных из библиотеки EXFOR с результатами расчетов. На заключительном этапе данные части файлов HEPAD-2008 были уточнены на основе экспериментальных данных.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. McLane V. EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format // BNL-NCS-63380-2000/05-Rev., 2000.

2. The European Activation File: EAF-2007, <http://www.nea.fr/dbforms/data/eva/evatapes/eaf2007/>
3. Konobeyev A.Yu., Broeders C.H.M., Fischer U., Mercatali L., Schmuck I. and Simakov S.P. The Proton Activation Data File PADF-2007, DOI: 10.1051/ndata:07352.
4. JENDL-3.3, <http://www.nea.fr/dbforms/data/eva/evatapes/jendl33/>
5. JEFF-3.1, <http://www.nea.fr/html/dbdata/JEFF/>
6. Hendricks J.S. MCNPX, VERSION 26C, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-06-7991, 2006.
7. Barashenkov V.S., Korovin Yu.A., Konobeyev A.Yu., Sosnin V.N. // Atomnaya Energiya. – 1999. – 87. – 283-286.
8. Mashnik S.G., Gudima K.K., Sierk A.J., Baznat M.I., Mokhov N.V. CEM03.01 User Manual, LANL Report LA-UR-05-7321, Los Alamos, 2005.
9. Bertini H.W. Low-Energy Intranuclear Cascade Calculation // Phys. Rev. – 1963. – 131. – 1801.
10. Bertini H.W. Intranuclear-Cascade Calculation of the Secondary Nucleon Spectra from Nucleon-Nucleus Interactions in the Energy Range 340 to 2900 MeV and Comparison with Experiments // Phys. Rev. – 1969. – 188. – 1711.
11. Yariv Y., Fraenkel Z. Intranuclear Cascade Calculation of High-Energies Heavy-Ion Interactions // Phys. Rev. – 1979. – C 20. – 2227.
12. Yariv Y., Fraenkel Z. Intranuclear Cascade Calculation of High-Energies Heavy-Ion Collisions: Effects of Interactions Between Cascade Particles // Phys. Rev. – 1981. – C 24. – 488.
13. Boudard A., Cugnon J., Volant C. Intranuclear Cascade Model for a Comprehensive Description of Spallation Reaction data // Phys. Rev. – 2002. – C 66. – 044615.
14. Barashenkov V.S., Toneev V.D. Interactions of high energy particles and atomic nuclei with nuclei, Atomizdat, 1972 (in Russian).
15. Prael R.E. et al. Adaptation of the Multistage Preequilibrium Model for the Monte Carlo Method (I). // LA-UR-88-3238. – 1988.
16. Gudima K.K., Ososkov G.A., and Toneev V.D. Model for Pre-Equilibrium Decay of Excited Nuclei // Sov. J. Nucl. Phys. – 1975. – 21. – 138.
17. Dresner L. EVAP, A Fortran Program for Calculation the Evaporation of Various Particles from Excited Compound Nuclei // ORNL-TM-196. – 1962.
18. Junghans A.R. et al. Projectile-Fragment Yields as a Probe for the Collective Enhancement in the Nuclear Level Density // Nuclear Physics A. – 1998. – 629. – P.635-655.
19. Furihata S. Statistical Analysis of Light Fragment Production from Medium Energy Proton-Induced Reactions // Nucl. Instr. Meth. – 2000. – B 171.
20. Atchison F. Spallation and Fission in Heavy Metal Nuclei under Medium Energy Proton Bombardment in Targets for Neutron Beam Spallation Sources // Jul-Conf-34. – Kernforschungsanlage Julich GmbH. – 1980.
21. Brenner D.J., Prael R.E., Dicello J.F. and Zaider M. Improved Calculations of Energy Deposition from Fast Neutrons // Proceedings, Fourth Symposium on Neutron Dosimetry, EUR-7448, Munich-Neuherberg. – 1981.
22. Amelin N. Physics and Algorithms of the Hadronic Monte-Carlo Event Generators. Notes for a Developer, CERN/IT/ASD Report CERN/IT/99/6, Geneva, Switzerland and JINR/LHE, Dubna, Russia; Geant4 Users Documents, Physics Reference Manual, 1998.
23. Mashnik S.G., Gudima K.K., Prael R.E., Sierk A., Baznat M.I. and Mokhov N.V. CEM03.03 and LAQGSM03.03 Event Generators for the MCNP6, MCNPX, and MARS15 Transport Codes, LANL Report LA-UR-08-2931, 2008.
24. International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields // NSCDOC (97). – 1 January 1997.
25. Booth T.E. et al. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 // Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987. – 2003. – P.2-109.

Поступила в редакцию 27.04.2009

Neutron therapy for cancer treating are formed the specific requests to neutron beam parameters. At present time, multipurpose testing nuclear reactors which adjusted for medical purpose are used for neutron therapy. Favorable for neutron capture therapy energy interval depends on depth of tumor position and locates from 0,5eV to 20–40KeV. The materials which can be used as a moderator or filter under forming the need spectral structure of neutron beams for BNCT are given in present paper.

УДК 621.039.51

High Energy Proton Activation Data Library (HEPAD-2008) \ Yu.A. Korovin, A.A. Natalenko, G.B. Pilnov, A.Yu. Konobeyev, A.Yu. Stankovskiy, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 4 tables, 3 illustrations. – References, 25 titles.

A proton activation data library for 682 nuclides from 1H to 210Po in the power range from 150 MeV up to 1 GeV was developed at the INPE «PUSK» research laboratory. To calculate proton activation data the MCNPX 2.6c and CASCADE/INPE codes were chosen. The different intranuclear cascade, preequilibrium and equilibrium nuclear reaction models and they combinations are being used. The choice of the optimum models of calculation was carried out on the basis of statistical correlation for calculated and experimental proton data taken from the EXFOR international library of experimental nuclear data. All the data are presented in the ENDF-6 format files. The library was called HEPAD-2008 (High-Energy Proton Activation Data).

УДК 621.039.54

Generalizing Operational-Constructive Criterion for Water-Water Reactors \ V.I. Korolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 1 illustration. – References, 1 title.

The operational-constructive dimensionless criterion which allows connecting a number of the important characteristics for operation with the basic constructive sizes ТВЭЛ is developed. The given criterion can be used at designing of new active zones of the various sizes and characteristics with similar properties.

УДК 621.039.51

Choice of the Fuel Composition for the Special Medical Reactor \ A.V. Levchenko, V.A. Barshevtsev, Y.A. Kazansky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 14 titles.

Calculation substantiation of the fuel composition choice for the special medical reactor was considered. Two kinds of fuel – based upon americium and uranium (as more common one) were compared both in zirconium hydride matrix and as uranium dioxide. The general characteristics were contrasted and it was concluded that uranium dioxide fuel has an advantage.

УДК 621.039.543.4

Possibility Research of Profiling of Energy-Release by Radial Transposition of Fuel in the CANDU Type Reactors \ Min Min Soe, V.I. Naumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Possibility research of profiling of energy-release by radial transposition of fuel by the scheme of «out-in-out» in the boundary of active zone of CANDU type reactors when utilizing slightly enriched uranium as a fuel was carried out. Quantitative estimations of effectiveness of transposition at the example model of CANDU type reactor with the parameters, similar to the PHWR-750 project in the range of initial enrichment of fuel is from 0.71 to 3% were outlined.

УДК 621.039.517

Analysis of Decay Heat at BN-600 Assemblies \ S.V. Zabrodskeya, A.L. Kochetkov, A.V. Moiseev, M.Yu. Semenov, Yu.S. Khomyakov, E.F. Seleznev, V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum, V.F. Rosliakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 12 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 11 titles.

The method of decay heat calculation used by CARE_03 code and module OST of complex GEFEST is described. The verification of method is carried out in comparison with ORIGEN code calculations of decay heat. The calculations validation on decay heat measurements is fulfilled on calorimetric equipment of Beloyrskaya Power Plant pool. The coincidence of calculation data of both codes CARE and ORIGEN are shown (< 5%). The discrepancy of decay heat calculation data with measurement data is indicated for spent subassemblies under the long cooling times with the low decay heat – 100-150 Wt. The calculate and