

Пороговые ядерно-физические процессы, протекающие в решетках и системах с торием

Кнышев В.В., Беденко С.В.
vvk28@tpu.ru

*Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, Беденко С.В.,
доцент кафедры физико-энергетических установок*

Для надежной оценки эффективности (с точки зрения ядерной безопасности и радиологического воздействия) уран-ториевого ЯТЦ, имеет первостепенное значение точность оценок сечений взаимодействия нейтронов с ядрами топливных композиций. В настоящее время имеется множество разноплановых экспериментальных и расчетных ядерных данных, довольно полно они представлены в следующих библиотеках оцененных ядерных данных – ENDF (США), JEFF (Европа), JENDL (Япония), TENDL (РФ), РОСФОНД (РФ) и др. [15–13].

Одним из наиболее ценных источников информации является международная библиотека ENDSF (Evaluated Nuclear Structure Data File), в которой приводятся данные не только рекомендованные, но и исходные экспериментальные [9]. Отметим, что библиотеки этих ядерных данных, используются для проведения нейтронно-физических расчетов в таких прецизионных программах как Scale (Origen-Arp) [1,2], MCNP [14] и MCU [4].

Несмотря на это во всех существующих базах ядерных данных, в том числе и оцененных, практически, отсутствует информация о пороговых нейтронных реакциях на ядрах ^{232}Th , а имеющиеся значения выходов и сечений отличаются на порядки. Достаточно привести базу ядерных данных JENDL-4.0, в которой при подготовке нейтронных данных для области тепловых и эпитепловых энергий сечения деления ^{232}Th оценщиками, по всей видимости, подготавливались исходя из простых физических соображений, дающих зависимость типа $\sim 1/v$ [9,11].

В библиотеке ядерных данных ENDF/B-VIII.0, рекомендуемой большинством расчетчиков, данные необходимые для расчета пороговых нейтронных реакций на ядрах ^{232}Th вообще отсутствуют. Связано это, скорее всего, с наличием появляющейся сегодня недостоверной экспериментальной информации о тонкой структуре ядер ^{232}Th . Таким образом, касательно пороговых реакций на ядрах ^{232}Th в области тепловых энергий и разрешенных резонансов сложно говорить о практической достоверности имеющихся данных.

Что касается сечений радиационного захвата, то текущее положение вещей наглядно демонстрируют исследования, проведенные в Японии (Киотский университет, 2004 г.) [15]. В работе проведено сравнение значений сечений радиационного захвата на ядрах ^{232}Th , полученных посредством кода системы SRAC из файлов библиотек оцененных ядерных данных (JENDL-3.3, JENDL-4.0, ENDF/B-VIII, JEFF 3.1.1). Полученные результаты говорят о том, что существует значительное расхождение (до $\sim 40\%$) между библиотеками.

Очевидно, что множественность источников информации, их неполнота и рассогласование окажет влияние на результаты критических расчетов решеток и

систем с торием, прежде всего из-за того, что при расчете k_{eff} (эффективный коэффициент размножения), требуемые функционалы содержат в себе зависимости $\sigma_i(E, r, \Omega)$.

В исследованиях, проведенных для мультиплицирующих торийсодержащих системах $\{(m\%U, n\%Th)O_2, (m\%Pu, n\%Th)O_2\}$ действующих на тепловых нейтронах нами проведена оценка точности существующих методов описания резонансных эффектов. Расчетные оценки показали, что формализм, описывающий процессы взаимодействия нейтронов с ядрами, включая поглощение и рассеяние, не всегда обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментом (Германия, Институт ISR-2 Исследовательского центра Forschungszentrum Julich, 1999 г.) [22].

Таким образом, существует необходимость в корректировке и подготовке ядерных данных, используемых в расчетах параметров резонансного поглощения в решетках и системах содержащих торий.

Отметим, что основная цель настоящей работы вновь обратить внимание на проблемы, связанные с вовлечением тория в ЯТЦ при реализации новой технологической платформы ядерной энергетики РФ.

Аналитическая модель ядерно-физических процессов, протекающих в торий содержащих системах. Механизм взаимодействия нейтрона в области разрешенных и неразрешенных резонансов, эффекты резонансного поглощения и рассеяния, относятся к классу волновых процессов и в квантово-механической интерпретации могут рассматриваться как произведение эффективного «размера» нейтрона $\pi(\lambda_n/2\pi)^2$ на проницаемость фазовой поверхности $p = 4k_1k_2/(k_1 + k_2)^2$, сформированного внутриядерным потенциалом $V_c(r)$ тяжелых ядер:

$$\sigma_c = \pi \left(\frac{\lambda_n}{2\pi} \right)^2 \cdot p, \quad (1)$$

где проницаемость p может быть найдена из уравнения Шрёдингера:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(r, t) = E_n \psi(r, t). \quad (2)$$

В случае взаимодействия низкоэнергичных нейтронов, решением уравнения (2) является функция:

$$\psi(r, t) = \psi(r) \cdot T(t),$$

где $\psi(r) = \sum C_i \psi_i$ – суперпозиция линейных комбинаций нейтронно-волновых функций ψ_i ; $T(t) = e^{-iEt}$ – оператор, описывающие эволюцию квантовой системы массой μ (нейтрон-ядро $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$) во времени; E – полная энергия системы.

Для определения нейтронных сечений в волновом приближении решение уравнения (2) необходимо искать, исключив временную часть решения $\psi(r, t)$, то есть в виде:

$$\psi(r) = \psi(r, \theta, \varphi) = X(r) \cdot Y(\theta, \varphi).$$

На этапе расчетной оценки использована модель Ферми-газа, в рамках которой, с учетом неупругих взаимодействий, потенциал $V_c(r)$ должен быть представлен в виде:

$$V_c(r) = V_r(r) + iV_m(r), \quad (5)$$

где действительная часть выражения (5) отвечает за упругие каналы ядерных взаимодействий, мнимая часть за неупругие взаимодействия.

Одним из таких потенциалов, отвечающий требованию уравнения (5), является псевдопотенциал Ферми:

$$V_c(r) = \frac{2\pi\hbar^2}{\mu} \cdot b \cdot \delta(r) = U \cdot \delta(r), \quad (6)$$

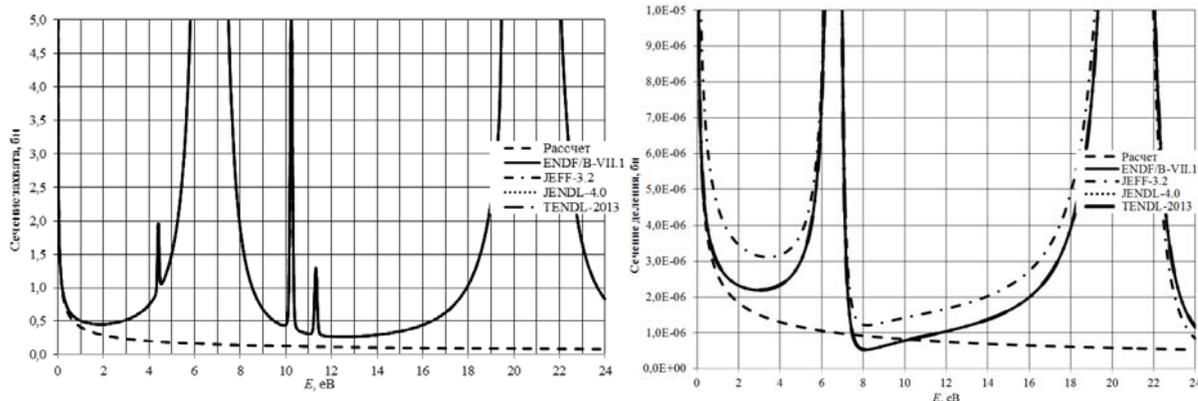
где $\delta(r)$ – Дельта-функция Дирака; b – длина рассеяния, параметр $b = x + iy$, в общем случае, является комплексной величиной, определяемый экспериментальным или расчетным способом.

С учетом соотношения (1), найденных волновых чисел k_1 и k_2 , проведена расчетная оценка значений сечений радиационного захвата σ_γ и сечений деления σ_f (пороговые нейтронные реакции) для ^{238}U и ^{232}Th в интервале энергий от 10^{-3} до 24 эВ. Найденные, таким образом, значения сечений сравнивались с данными приведенными в библиотеках оцененных ядерных данных (ENDF/B, JEFF-3.2, JENDL-4.0, TENDL-2013), результаты таких сравнений приведены на рис. 1 и 2.

В сравнительном анализе использована российская библиотека нейтронных данных TENDL (Transmutation Evaluated Neutron Data Library). В работах [12,13] были представлены результаты первого этапа по формированию этой библиотеки. Отметим, что значения сечений пороговых нейтронные реакции в области энергий до 4 эВ приведенных в TENDL для тория существенно разнятся в сравнения с JENDL (см. Рис. 2), а наличие первых двух разрешенных резонансов в области энергий от 4 до 18 эВ представляется сомнительным. Вообще, структура резонансной области поглощения ядер ^{232}Th достаточно детально исследована в работах [16,17] и работах других исследователей [15], более того экспериментальные и численные исследования, проведенные с уран-ториевым топливом, показали что наилучшее согласование с экспериментом было достигнуто при использовании в расчетах константного обеспечения ENDF/B-VI.8 [15]. По этой причине база нейтронных данных TENDL1038 в дальнейшем анализе не использована.

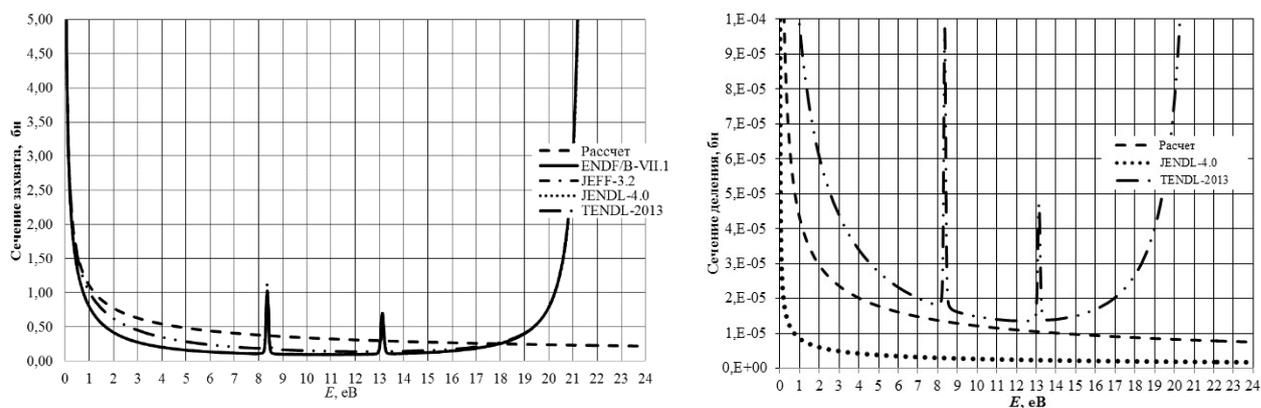
С учетом изложенного выше, выбранная нами модель ядра и форма потенциала в интервале энергий от 10^{-3} до 18 эВ с удовлетворительной для практики точностью позволяет производить расчет микроскопических сечений $\sigma(E, r, \Omega)$ нейтронных реакций в решетках с ^{232}Th (см. Рис. 2).

Неопределенность в сечениях деления и радиационного захвата для ^{238}U в области энергий до 2,9 эВ и 1,75 эВ, соответственно, не превышает 30%. Для ^{232}Th сечения радиационного захвата с точностью в 30% могут быть найдены в интервале энергий от 10^{-3} до 0,8 эВ.



Зависимость сечения σ_γ ядра ^{238}U в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ Зависимость сечения σ_f ядра ^{238}U в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ

Рисунок 1. Результаты сравнений расчетных значений сечений ^{238}U оцененными ядерными данными (ENDF/B, JEFF-3.2, JENDL-4.0, TENDL-2013)

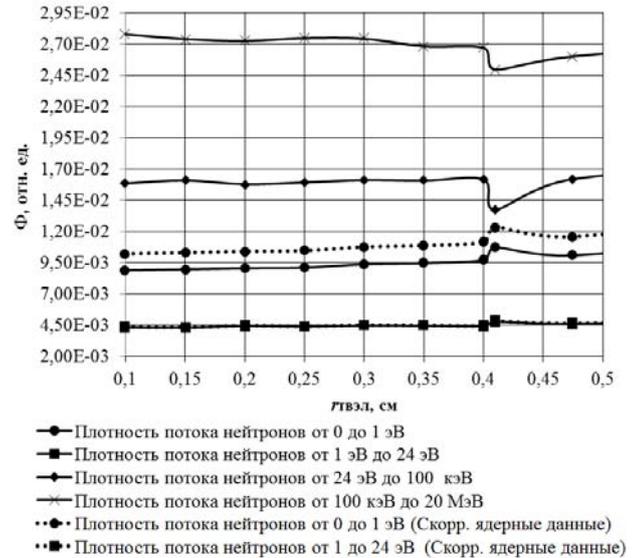
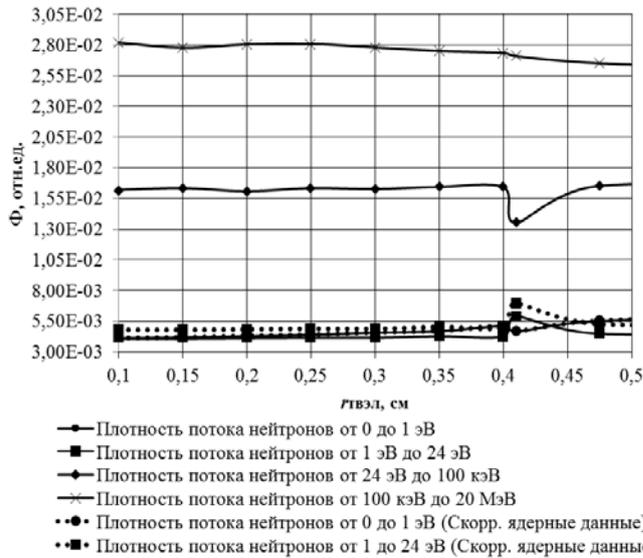


Зависимость σ_γ ядра ^{232}Th в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ

Зависимость сечения σ_f ядра ^{232}Th в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ

Рисунок 2. Результаты сравнений расчетных значений сечений ^{232}Th с оцененными ядерными данными (JENDL-4.0, TENDL-2013)

В дальнейших расчетах с помощью кода программы MCU5 с использованием файлов библиотек оцененных данных (ENDF/B и JENDL-4.0) и аналитически найденных значений сечений подготовлены ядерные константы, используемые для расчета потока $\varphi(\Delta E_i, r_i)$. При подготовке ядерных констант использована технология, разработанная в ИБРАЭ РАН [18]. Такой подход позволил не только провести корректировку ядерных констант в области энергий до 18 эВ, но и учесть тонкую структуру резонансной области поглощения нейтронов ядрами ^{232}Th и ^{238}U . Результаты расчетных исследований для мультиплицирующих решеток с торием приведены в графическом виде на рис. 3.



а) пространственно-энергетическое распределение потока нейтронов в графитовой решетке с торием – (5%Pu, 95%Th)O₂

б) пространственно-энергетическое распределение потока нейтронов в графитовой решетке с торием – (5%U, 95%Th)O₂

Рисунок. 3 – Пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов в ТВЭЛ полячейки УГР

Таким образом, сочетание предложенного в работе аналитического подхода по определению сечений нейтронных пороговых реакций, статистических алгоритмов, основанных на методе Монте-Карло (MCU, Scale) [1, 4] и технологии разработанной в ИБРАЭ РАН [25], позволяет получать нужные нам функционалы для области энергий от 10⁻³ до 20 МэВ при условии, если макроконстанты для области спектра от 18 эВ до 100 кэВ будут определены с использованием расчетного кода программы MCU5 без корректировки нейтронных данных.

Дальнейшие нейтронно-физические исследования систем хранения, содержащих торий будут проведены нами также с учетом аналитически скорректированных ядерных констант, расчет k_{eff} и $\phi(\Delta E_i, r_i)$ будет произведен в многогрупповом приближении с использованием подгрупповых параметров при расчете групповых коэффициентов в разложенном уравнении Больцмана, с использованием методик и техник расчетов авторов [1,4,13].

Заключение. В работе приведены результаты исследований и численных экспериментов, направленных на определение ядерно-физических и радиационных характеристик решеток и систем хранения с торием. Показана необходимость в корректировке ядерных констант, используемых в расчетах на критичность.

Исследование выполнено на базе УНУ ИРТ-Т при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (RFMEFI59114X0001).

Исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации. Конкурс на право получения стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам. Грант № СП-295.2015.2 Тема: «Исследования по определению функциональных зависимостей между режимами и параметрами эксплуатации РУ нового поколения, свойствами свежего и ОЯТ в усовершенствованном ЯТЦ».

Список литературы:

1. Gauld I.C., Hermann O. W., Westfall R. M. Origen-S: SCALE system module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and associated radiation source terms. – ORNL/TM. – 2005/39. – Vol. II.– 2009.
2. Шаманин И.В., Беденко С.В., Павлюк А.О. Использование программы ORIGEN-ARP при расчете изотопного состава отработанного топлива реактора ВВЭР-1000 // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 25–28.
3. Мжачих С.В., Алексеев А.В., Гребенников А.Н. и др. Расчет изотопного состава реакторных установок при моделировании процессов выгорания и остаточного энерговыделения ядерного топлива в программном комплексе CONCORD. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов – 2014. – Т. 1. С. 49–64.
4. Проект MCU. Моделирование процесса переноса частиц методом Монте-Карло. URL: <http://mcuproject.ru/rinfo.html>.
5. Okumara K., Mori T. Validation of a continuous-energy Monte-Carlo burn-up code MVP-BURN and its application to analysis of post irradiation experiment // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2000. – V. 24. – № 2. – P. 71–77.
6. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Gubaydulin I.M. Optimum Ratio of Coverings Thickness to the Diameter of the Fuel Core of the Dispersive Nuclear Fuel // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 880. – P. 219–228.
7. Shamanin I.V., Bedenko S. V., Gubaydulin I. M., Novikova N. G. Materials of New Generation in Nuclear Power Industry // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 1040. – p. 74 – 79.
8. Shamanin I. V., Bedenko S. V., Gubaydulin I. M., Novikova N. G., Plevaka M. N. Conceptual Approach to Handling Irradiated Nuclear Fuel in Storage Systems // Advanced Materials Research. – 2015 – Vol. 1084. – P. 285 – 288.
9. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. URL: <http://www.nndc.bnl.gov>.
10. Experimental Nuclear Reaction Data. URL: <http://www-nds.iaea.org>.
11. Japanese Evaluated Nuclear Data Library. URL: <http://www.ndc.jaea.go.jp>.
12. Абрамович С.Н., Горелов В.П., Горшихин А.А. и др. База данных для численного моделирования накопления осколков в топливе энергетических реакторов// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1996. – №3. – с.40–61.
13. Гончаров Г.А., Горелов В.П., Иванникова В.Н. и др. Алгоритмы расчета групповых констант энергоуглового распределения рассеянных нейтронов в среде из неподвижных ядер// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1991. – №1. – с.38–43.
14. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Vol. 1–3, X-5 Monte Carlo Team. Report LA-UR-03-1987, 2003.
15. Shiroya S., Kudo K. Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium/Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly // PHYSOR 2004 - The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments. - Illinois: American Nuclear Society, 2004.
16. Шаманин И. В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ^{238}U и ^{232}Th // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 47–53.

17. Шаманин И. В., Годовых А.В. Структура резонансной области поглощения ядер ^{238}U и ^{232}Th и зависимости ее параметров от температуры // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 5. – С. 49 – 56.
18. Блохин Д.А., Митенкова Е.Ф., Блохин А.И. Подготовка полных библиотек ядерных данных в поточечном представлении на основе файлов оцененных данных ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0. Препринт / Ин-т проблем безопасного развития атом. энергетики РАН, № ИВРАЕ-2011-08. – М.: ИБРАЭ РАН, 2011. – 58 с.
19. Внуков В.С. Глубина выгорания как параметр ядерной безопасности хранилищ и транспортных упаковочных комплектов с отработавшим ядерным топливом. – Атомная техника за рубежом. – 1990. – № 12. – С. 9–11.
20. Опаловский В.А., Тихомиров Г.В. Расчетные исследования параметров ОЯТ в целях безопасного обращения, учета и контроля. Научная сессия МИФИ-2002 // Сборник научных трудов. Том. 8. – Москва. – МИФИ. – 2002.
21. Kryuchkov E.F., Opalovsky V.A., Tikhomirov G.V. «Comparative Analysis of Radiation Characteristics from various types of Spent Nuclear Fuel» // Proceeding of the SNA-2003. – Paris. – France – 2003.
22. Shamanin I.V., Ukhov A.A., Rutten H.-J., Haas K.A., Sherer W. The Use of (Th, U, Pu)O₂ Fuel in a Water Water Energy Reactor: Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P. (97) Computer Code // Forschungszentrum Julich. FZJ –ISR – IB – 1/1999. – 40 p

Изменение свойств бериллия под действием нейтронного излучения в отражателе исследовательских реакторов

Николаев Ю.Ю.
potron38@yandex.ru

Научный руководитель: Старший преподаватель каф. ФЭУ, кандидат физико-математических наук. А.Г. Наймушин, ТПУ ФТИ

В процессе эксплуатации ядерно-энергетических установок под воздействием интенсивного нейтронного излучения изменяются структура и физико-механические свойства конструкционных материалов, что приводит к потере рабочих характеристик. Благодаря хорошим ядерно-физическим свойствам бериллий привлекает большое внимание исследователей и конструкторов при разработке и создании образцов атомной техники. Несмотря на свои особенности бериллий имеет ряд существенных недостатков которые не позволяют массово использовать бериллий.

Сочетание малой атомной массы, малого сечения захвата тепловых нейтронов (0,009 барн) делает бериллий одним из лучших материалов для изготовления замедлителей и отражателей нейтронов в атомных реакторах. В пороговой реакции $^9\text{Be}(n,2n)2\alpha$ возникает гелий, поэтому при интенсивном облучении быстрыми нейтронами внутри бериллия накапливается газ, под давлением которого бериллий набухает. Для формирования представления о возможности использования бериллия в качестве конструкционного материала, были рассмотрены все возможные реакции,