

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

М. Н. Плевака, С. В. Беденко, И. М. Губайдулин, В. В. Кнышев

В работе проведены исследования, направленные на определение нейтронно-физических и радиационных характеристик перспективных ядерных топливных композиций, рассматриваются особенности обращения с модифицированным облученным ядерным топливом теплового реактора в системах сухого хранения. Показана необходимость корректировки ядерных констант, используемых в расчетах на критичность размножающих решеток и систем хранения с торием.

Ключевые слова: перспективное керамическое ядерное топливо, пороговые реакции в ядерном топливе, сухое хранение, торий.

Увеличение глубины выгорания штатного оксидного топлива UO_2 , а так же появление модифицированных топлив для действующих реакторов и реакторных установок (РУ) нового поколения потребует разработки новых подходов и процедур обращения с этим топливом, обоснования безопасности существующих сегодня транспортных средств и систем хранения [1–3].

В работе проведены исследования, направленные на определение нейтронно-физических и радиационных характеристик перспективных ядерных топливных композиций, рассматриваются особенности обращения с модифицированным облученным ядерным топливом (ОЯТ) уран-графитовых реакторов (УГР) в системах сухого хранения ОЯТ (СХОЯТ).

Аналитическая модель ядерно-физических процессов, протекающих в уран- и торий содержащих системах. Существующие сегодня модели и методики расчета полей излучения вблизи ОЯТ разработаны и аттестованы в основном для оксидного топлива $UO_2/(U, Pu)O_2$, эксплуатирующегося преимущественно в легководных реакторах [1,

2]. Это значит, что их применение для определения радиационных характеристик новых видов топлив требует обоснования, а в ряде случаев существенного дополнения и модернизации.

На первом этапе исследований авторами [3] предложена аналитическая модель ядерно-физических процессов, протекающих в топливе, которая позволила выделить основные каналы формирования нейтронов, включая нейтронные каналы вблизи порога реакции (α, n) и ранее не принимавшиеся во внимание фотоядерные резонансные процессы.

В дальнейших исследованиях, проведенных для систем $(m\%U, n\%Th)O_2$, $(m\%Pu, n\%Th)O_2$ действующих на тепловых нейтронах, проведена оценка точности существующих методов описания резонансных эффектов. Расчетные оценки [4] показали, что формализм, описывающий процессы резонансного взаимодействия нейтронов с ядрами U и Th, не всегда обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментом (исследования выполнены на уникальной научной установке “Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т”, идентификатор работ RFMEFI59114X0001, Соглашение № 14.591.21.0001 от 15.08.2014 г.).

Таким образом, для надежной оценки безопасности систем с торием имеет первостепенное значение точность оценок сечений взаимодействия нейтронов с ядрами топливных композиций. В настоящее время имеется множество экспериментальных и расчетных ядерных данных. Несмотря на это, во многих базах ядерных данных, в том числе и верифицированных, практически отсутствует информация о пороговых нейтронных реакциях на ядрах ^{232}Th , а имеющиеся значения выходов и сечений отличаются на порядки. Например, в библиотеке ENDF/B-VIII.0, рекомендуемой большинством расчетчиков, данные, необходимые для расчета нейтронных реакций на ядрах ^{232}Th , вообще отсутствуют.

Таким образом, касательно пороговых реакций на ядрах ^{232}Th в области тепловых энергий и первых резонансов сложно говорить о достоверности имеющихся данных.

Очевидно, что множественность источников информации, их неполнота и несогласованность окажет влияние на результаты критических расчетов размножающих решеток и систем хранения с торием, прежде всего из-за того, что при расчете эффективного коэффициента размножения (k_{eff}) требуемые функционалы содержат в себе зависимости $\sigma_i(E, r, \Omega)$.

Таким образом, существует необходимость в корректировке и подготовке ядерных данных, используемых в расчетах параметров резонансного поглощения в размножающих системах с ^{232}Th .

Механизм взаимодействия нейтрона в области разрешенных и неразрешенных резонансов, эффекты резонансного взаимодействия относятся к классу волновых процессов и могут рассматриваться как произведение эффективного “размера” нейтрона $\pi(\lambda_n/2\pi)^2$ на проницаемость фазовой поверхности, сформированной внутриядерным потенциалом $V_c(r)$ ядер U или Th:

$$\sigma_c = \pi(\lambda_n/2\pi)^2 \cdot p, \quad (1)$$

где проницаемость $p = |J_1|/|J_2| = 4k_1 \cdot k_2/(k_1 + k_2)^2$ может быть найдена из уравнения Шредингера; $|J_1|$, $|J_2|$ – векторы плотности вероятностей прошедшей и падающей волн, а k_1 и k_2 – соответствующие им волновые числа нейтрона.

На этапе расчетных оценок нами использована модель Ферми-газа, в рамках которой потенциал $V_c(r)$ должен быть представлен в виде:

$$V_c(r) = V_r(r) + iV_m(r), \quad (2)$$

где действительная часть выражения (2) отвечает за упругие каналы ядерных взаимодействий, мнимая часть за неупругие взаимодействия.

Одним из таких потенциалов является псевдопотенциал Ферми:

$$V_c(r) = \frac{2\pi\hbar^2}{\mu} \cdot b \cdot \delta(r) = U \cdot \delta(r), \quad (3)$$

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

Параметр b в (3) подбирался таким образом, чтобы расчетное значение глубины потенциальной ямы U соответствовало данным работы [5].

С учетом соотношения (1), найденных при решении уравнения Шредингера волновых чисел k_1 и k_2 , проведена расчетная оценка значений сечений для ^{238}U и ^{232}Th в интервале энергий от 10^{-3} до 24 эВ. Найденные значения сечений сравнивались с данными, приведенными в базах: ENDF/B-VII, JENDL-4.0, JEFF-3.1, TENDL-2013. Результаты сравнений приведены на рис. 1.

Таким образом, 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 нейтронных пороговых реакций σ_f в решетках с ^{232}Th .

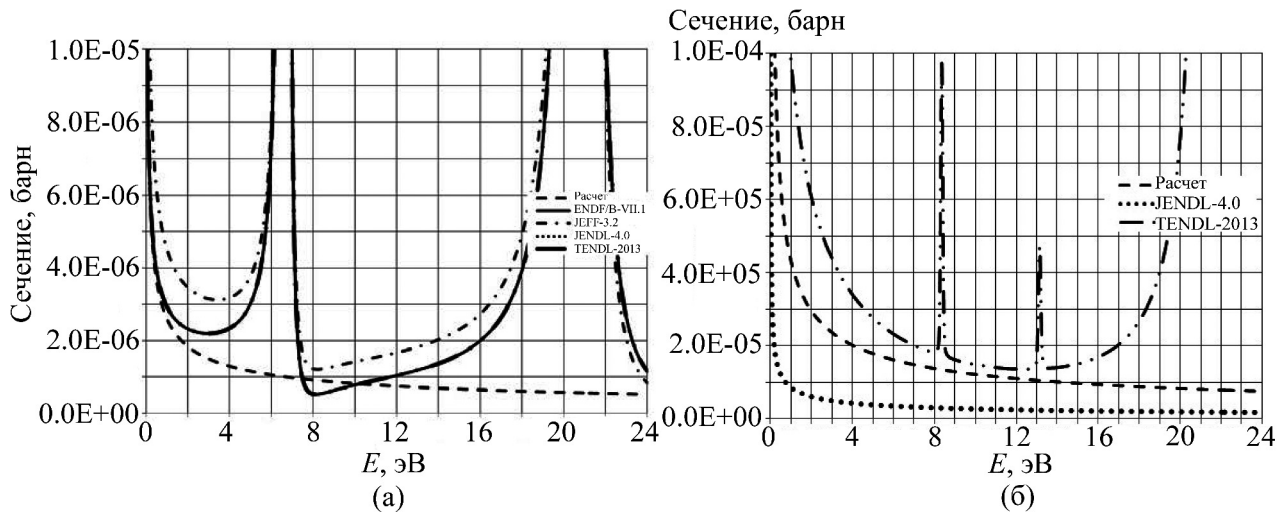


Рис. 1: Результаты сравнений расчетных значений сечений ^{238}U и ^{232}Th с верифицированными ядерными данными (JENDL-4.0, TENDL-2013): (а) зависимость сечения деления σ_f ядра ^{238}U в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ; (б) зависимость σ_f ядра ^{232}Th в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ.

Неопределенность в сечениях деления (σ_f) и радиационного захвата (σ_γ) для ^{238}U в области энергий до 2.9 эВ и 1.75 эВ, соответственно, не превышает 30%. Для ^{232}Th сечения σ_γ с точностью в 30% могут быть найдены в интервале энергий от 10^{-3} до 0.8 эВ.

Отметим, что значения сечений σ_f в области энергий до 4 эВ, приведенные в TENDL, для ^{232}Th существенно разнятся в сравнения с JENDL-4.0 (см. рис. 1), а наличие первых двух разрешенных резонансов в области энергий от 6 до 14 эВ представляется сомнительным [4].

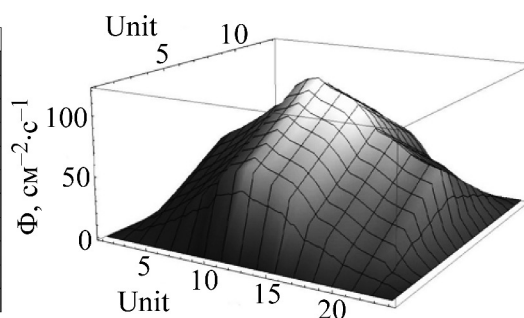
В дальнейших исследованиях с использованием файлов библиотек верифицированных данных (ENDF/B-VII.0 и JENDL-4.0) и аналитически найденных значений сечений в групповом приближении подготовлены ядерные константы, используемые программой Scale4.4.a для расчета k_{eff} и потоков $\Phi(\Delta E_i, r_i)$, [1/см²/с] в системах СХОЯТ (сухое хранение отработанного ядерного топлива). При подготовке ядерных констант использована процедура авторов [7]. Отметим, что макроконстанты для части спектра от 18 эВ до 100 кэВ определены без корректировки нейтронных данных.

Для проведения нейтронно-физических исследований в Scale4.4a создана расчетная модель, соответствующая реальной конструкции СХОЯТ ФГУП “Горно-химический комбинат”, модель и алгоритм расчета приведены в работе [8].

Результаты нейтронно-физических исследований системы сухого хранения. Анализ возможных нейтронно-физических состояний СХОЯТ с различной глубиной выгорания показал, что учет глубины выгорания ОЯТ приводит к уменьшению k_{eff} СХОЯТ на 27% и с точки зрения ядерной безопасности эта система является глубоко подкритической даже для нештатных ситуаций. Однако уровни излучения по нейтронам превышают предельно допустимые значения (НРБ-99/2009) для ОЯТ с уровнем выгорания начиная от 20 ГВт·сут/т.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
9	40	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	5
8	41	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	5
7	42	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5
6	43	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	5
5	44	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	5
4	45	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	5
3	46	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
2	47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
1	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69

(а)



(б)

Рис. 2: Результаты расчетов k_{eff} и $\Phi(\Delta E_i, r_i)$ СХОЯТ с модифицированным топливом УГР: (а) Массив размером 22×11 . UNIT 1, 2, 3 – гнезда с пенами, выгорание 20, 25, 30 ГВт·сут/т соответственно; 5, 39 – 69 – пустые гнезда; (б) Значения потоков быстрых нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве, выдержка ОЯТ 10 лет.

Таким образом, необходима оптимизация схем размещения пеналов с различной глубиной выгорания топлива с целью уменьшения дозовой нагрузки на персонал. Оптимизация параметров систем и схем обращения в процессе сухого хранения ОЯТ осуществлена за счет чередующегося размещения его слоев с различной глубиной выгорания и обогащения.

На рис. 2 приведена одна из схем загрузки СХОЯТ, позволяющая снизить уровни нейтронного излучения в критических точках хранилища до предельно допустимых значений (НРБ-99/2009). Эффективный коэффициент размножения моделируемой системы равен $k_{\text{eff}} = 0.2148 \pm 0.0003$.

Закключение. Проведенные в работе теоретические исследования и численные эксперименты позволят повысить экологическую, ядерную и радиационную безопасность систем сухого хранения и транспортировки керамического облученного ядерного топлива реакторных установок нового поколения.

Кроме того, исследования, выполненные в работе, позволят разработать технические и регулирующие решения при обращении с перспективным облученным ядерным топливом.

Расчетные исследования выполнены 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.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Опаловский, Г. В. Тихомиров, *Научная сессия МИФИ-2002, Москва, 2002* (МИФИ, Москва, 2002).
- [2] С. В. Беденко, Ф. В. Гнетков, С. Д. Кадочников, *Известия вузов. Ядерная энергетика*, № 1, 6, (2010).
- [3] И. В. Шаманин, В. И. Буланенко, С. В. Беденко, *Известия вузов. Ядерная энергетика*, № 2, 97, (2010).
- [4] И. В. Шаманин, А. А. Ухов, Г. И. Рюттен, *Известия вузов. Ядерная энергетика*, № 1, 53, (2000).
- [5] P. E. Hodgson, *The Optical Model of Elastic Scattering* (Oxford, Clarendon press, 1963).
- [6] И. В. Шаманин, *Альтернативная энергетика и экология*, № 11 (43), 71 (2006).
- [7] Г. А. Гончаров, В. П. Горелов, В. Н. Иванникова и др., *Вопросы атомной науки и техники. Математическое моделирование физических процессов*. №1, 38 (1991).
- [8] I. V. Shamanin, S. V. Bedenko, M. N. Plevaka, et al., *Advanced Materials Research* **1084**, 285, (2015).

По материалам IV Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 мая 2015 г.