

**РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ
КОМПОЗИЦИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Кнышев В.В., Беденко С.В., Шаманин И.В.

Научные руководители: Беденко С.В., к.ф.-м.н., доцент; Шаманин И.В., д-р физ.-мат. наук, профессор
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: vvk28@tpu.ru

**CALCULATED RESEARCH STORAGE SYSTEMS OF IRRADIATED FUEL COMPOSITIONS OF
THE NEW GENERATION**

Knyshev V.V., Bedenko S.V., Shamanin I.V.

Scientific Supervision: Bedenko S.V., Candidate of Science, Associate Professor of the Department of Physical
and Power Plants.
Shamanin I.V., Doctor of Science, Head of the Department of Applied Physics Engineering.
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: vvk28@tpu.ru

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

In this work conceptual approaches and features of exploitation of technical systems of “dry” storage of fuel irradiated in thermal reactors are considered. The results of numerical studies are aimed at determining the neutron-physical and radiation characteristics of spent ceramic nuclear fuel. The studies will allow developing technical and regulatory solutions when handling with perspective spent fuel of new generation reactor facilities.

Состояние исследований

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

В работе проведены исследования, направленные на определение нейтронно-физических и радиационных характеристик перспективных 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 [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 показали [4], что формализм, описывающий процессы резонансного взаимодействия нейтронов с ядрами U и Th, не всегда обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментом (исследования выполнены на базе УНУ реактора ИРТ-Т, уникальный id 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. Во многих 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.

Очевидно, что множественность источников информации, их неполнота и несогласованность окажет влияние на результаты критических расчетов решеток и систем с торием, прежде всего из-за того, что при расчете 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 решетках 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 $p = 4k_1k_2/(k_1 + k_2)^2$, сформированного внутриядерным потенциалом $V_c(r)$ ядер U или Th:

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

где проницаемость p может быть найдена из уравнения Шредингера.

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 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 библиотеках: ENDF/B-VII, JENDL-4.0, JEFF-3.1, TENDL-2013.

Результаты сравнений приведены на рис. 1.

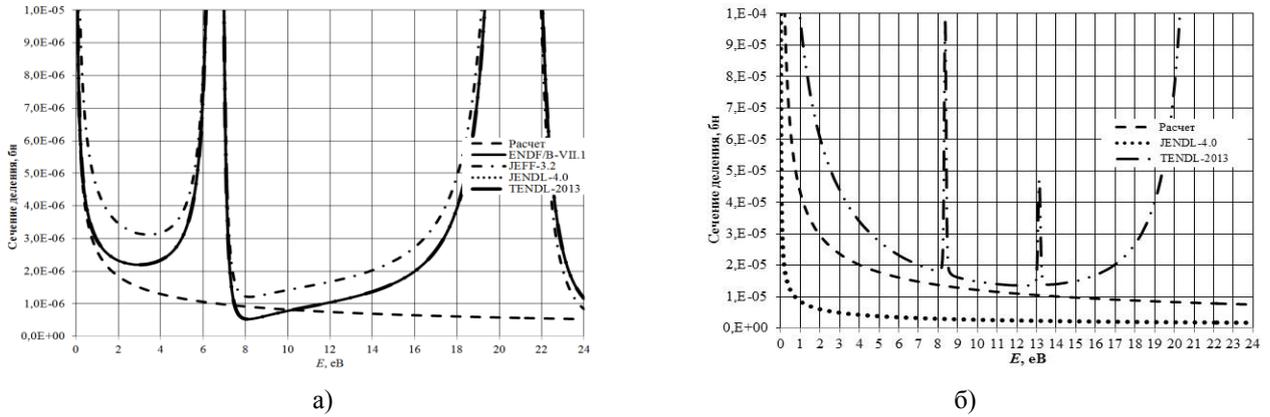


Рис. 1. Результаты сравнений расчетных значений сечений ^{238}U и ^{232}Th с оцененными ядерными данными (JENDL-4.0, TENDL-2013):

а) зависимость σ_f ядра ^{238}U в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ;

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

Для ^{232}Th сечения σ_f 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 4эВ, приведенные в TENDL, для ^{232}Th существенно разнятся в сравнения с JENDL-4.0 (см. Рис.1) [4].

В дальнейших исследованиях с использованием файлов библиотек оцененных 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 $\Phi(\Delta E_i, r_i)$, $1/\text{см}^2/\text{с}$ в СХОЯТ. При подготовке ядерных констант использована процедура авторов [7].

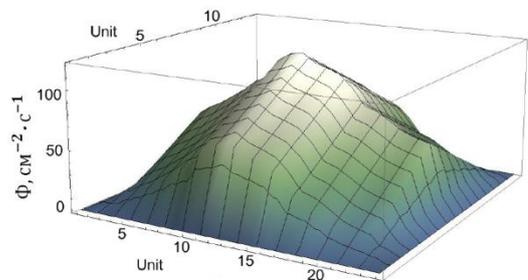
Для проведения нейтронно-физических исследований в Scale4.4a создана расчетная модель, соответствующая реальной конструкции СХОЯТ ФГУП ГХК модель и алгоритм расчета приведены в работе [8].

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) при выгорании 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	
10	39	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	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	5	
8	41	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	5	
7	42	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	5	
6	43	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	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	5	
4	45	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5	
3	46	1	1	1	1	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	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 с различной глубиной выгорания 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 $k_{eff}=0,2148\pm 0,0003$.

Заключение

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опаловский В.А., Тихомиров Г.В. Расчетные исследования параметров ОЯТ в целях безопасного обращения, учета и контроля. Научная сессия МИФИ-2002 // Сборник научных трудов. Т. 8. – М.: МИФИ, 2002. – С. 98–100.
2. Беденко С.В., Гнетков Ф.В., Кадочников С.Д. Дозовые характеристики полей нейтронов керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 6–12.
3. Шаманин И.В., Буланенко В.И., Беденко С.В. Поле нейтронного излучения облученного керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 97–103.
4. Шаманин И.В., Ухов А.А., Рюттен Г.И., Хаас К., Шерер В. Результаты моделирования параметров топливного цикла для водо-водяного энергетического реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 4. – С. 53–64.
5. Hodgson P.E. The Optical Model of Elastic Scattering. – Oxford: Clarendon press, 1963. – 230 p.
6. Шаманин И.В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ^{238}U и ^{232}Th // Альтернативная энергетика и экология, №11(43), 2006.
7. Гончаров Г.А., Горелов В.П., Иванникова В.Н. и др. Алгоритмы расчета групповых констант энергоуглового распределения рассеянных нейтронов в среде из неподвижных ядер// ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1991. – №1. – С. 38–43.
8. Shamanin I., Bedenko S., Gubaydulin I., Novikova N., Plevaka M. Conceptual Approach to Handling Irradiated Nuclear Fuel in Storage Systems // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1084. – p. 285–288.