ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2019, том 8, № 3, с. 199–205

____ ТЕХНИЧЕСКАЯ _____ ФИЗИКА

УДК 621.039

СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ (Gd И Eu) НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВС РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

© 2019 г. М. А. Абу Сондос^{1,*}, В. М. Демин¹, В. И. Савандер¹

 1 Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409, Москва, Россия

**e-mail: MAbusondos@mephi.ru* Поступила в редакцию 24.01.2019 г. После доработки 12.04.2019 г. Принята к публикации 26.04.2019 г.

Рассматривается задача об использовании выгорающих поглотителей (ВП) в реакторах типа ВВЭР для снижения объема жидкостного регулирования избыточного запаса реактивности при выгорании топлива. Использование выгорающих поглотителей (ВП) таких, как Gd_2O_3 и Eu_2O_3 в ядерном топливе оказывает положительное влияние на ядерный топливный цикл легководных реакторов PWR (ВВЭР-1000) и BWR (РБМК). Их использование приводит к увеличению продолжительности кампании и некоторым другим положительным свойствам, описанным ниже. Но, с другой стороны, присутствие выгорающих поглотителей в топливе приводит к ухудшению равномерности поля энерговыделения и ряду других негативных свойств. Проводятся изложенные в литературе исследования для снижения этих отрицательных результатов [3–7]. Одним из предлагаемых технических решений является изменение структуры размещения гадолиния в твэлах [5]. В настоящей работе проведено исследование влияния размещения выгорающих поглотителей (Gd_2O_3 и Eu_2O_3) на изменение нейтронно-физических характеристик ядерного топлива реакторов BBЭР-1000; бесконечного коэффициента размножения нейтронов (K_{∞}), коэффициента неравномерности распределения энерговыделения и накопления изотопов в зависимости от глубины выгорания.

Ключевые слова: ТВЭГ, Serpent, ТВС, ВВЭР-1000, выгорающий поглотитель, Eu₂O₃, Gd₂O₃, коэффициент неравномерности распределения энерговыделения **DOI:** 10.1134/S2304487X19030027

введение

Основными источниками энергии для АЭС, которые эксплуатируются и сооружаются в настоящее время, являются водо-водяные легководные реакторы (например, ВВЭР-1000). Подобные установки планируется использовать и в дальнейшем при строительстве АЭС в разных странах вне зависимости от специфики национальных планов развития ядерной энергетики.

Одной из главных целей научно-технических разработок, касающихся топливного цикла энергетических реакторов, является увеличение глубины выгорания топлива. Обычно оно достигается путем повышения начального обогащения и использования выгорающих поглотителей. Выгорающий поглотитель при этом снижает размножающие свойства активной зоны реактора в начале кампании, что может быть скомпенсировано системой СУЗ.

Выгорающие поглотители представляют собой материалы с высоким сечением поглощения нейтронов, которые преобразуются в материалы с относительно низким сечением поглощения в результате радиационного захвата. Отрицательная реактивность выгорающего поглотителя уменьшается за время кампании. В идеальном случае она должна уменьшаться с той же скоростью, что и истощение избыточной положительной реактивности топлива. Из-за более равномерного распределения ВП по высоте зоны его влияние на неравномерность энерговыделения менее разрушительно, чем действие контрольных стержней (СУЗ).

В качестве выгорающего поглотителя в реакторных установках типа ВВЭР (PWR) и BWR применяется гадолиний Gd_2O_3 или европий Eu_2O_3 . Вклад основных изотопов в состав природного гадолиния или европия и их сечения поглощения тепловых нейтронов при энергии 0.0253 эВ приведены в табл. 1.

Выгорающий поглотитель используют для следующих основных целей:

1) Компенсации избыточной положительной реактивности в начале кампании.

Таблица 1. Вклад основных изотопов в природный состав ВП и их сечения поглощения тепловых нейтронов [1]

Изотопы	Массовая доля, %	σ, б
¹⁵⁵ Gd	14.8	61100
¹⁵⁷ Gd	15.7	259000
¹⁵¹ Eu	47.8	9100
¹⁵³ Eu	52.2	312

Таблица 2. Распределение ВП в рассмотренных вариантах расчетов

Вариант	Количество и состав топлива твэлов					
\mathbf{B}_1	312-4.4% (²³⁵ U)					
B_2	270–4.4% (235 U) и 42–4.4% (235 U) с 1.5% Gd ₂ O ₃					
B_3	270–4.4% ($^{235}{\rm U}$) и 42–4.4% ($^{235}{\rm U}$) с 1.5% ${\rm Eu_2O_3}$					
B_4	270 — 4.4% ($^{235}{\rm U}$) и 42 —4.4% ($^{235}{\rm U}$) с 0.75% ${\rm Gd_2O_3}$ и 0.75% ${\rm Eu_2O_3}$					
B_5	270– 4.4% (²³⁵ U) и 42–4.4% (²³⁵ U) с 1.5% Gd ₂ O ₃ в центральном отверстии твэлов					
B ₆	270– 4.4% (²³⁵ U) и 42–4.4% (²³⁵ U) с 1.5% Еи ₂ O ₃ между оболочками и топливными таблетками					
B_7	270– 4.4% (²³⁵ U) и 42–4.4% (²³⁵ U) с 0.75% Gd ₂ O ₃ в центральном отверстии твэлов и 0.75% Eu ₂ O ₃ между оболочками и топлив- ными таблетками					

Таблица 3. Основные геометрические параметры ТВС-А.

Параметр	TBC-A
Длина топливного элемента, мм	3530
Macca UO ₂ , кг	497.98
Плотность топлива (г/см ³)	10.4
Плотность воды (г/см ³)	0.72
Количество твэлов в одной ТВС	312
Обогащение (мас. %)	4.4%
Внутренний/Наружный диаметр топливной	1.4/7.57
таблетки, мм	
Внутренний/Наружный диаметр оболочки, мм	7.73/9.1
Материал оболочки, сплав	Э110
Центральная трубка	1
Внутренний/Наружный диаметр, мм	11.0/13.0
Материал, сплав	Э635
Направляющая трубка (18 шт.)	I
Внутренний/Наружный диаметр, мм	10.9/12.6
Материал, сплав	Э635

2) Увеличения продолжительности кампании.

3) Выравнивания энерговыделения в активной зоне и оптимизации выгорания топлива.

4) Уменьшения концентрации бора в теплоносителе в начале кампании, что существенно для обеспечения безопасности работы реактора [2].

Обычно гадолиний и европий размещают в твэлах (твэгах и твэях), полностью заполненных таблетками из однородной смеси топлива и выгорающего поглотителя природного изотопного состава. Топливные таблетки, содержащие однородную смесь Gd_2O_3 или Eu_2O_3 и UO_2 (твердый раствор Gd_2O_3 или Eu_2O_3 в UO_2) просты в изготовлении и позволяют адекватно контролировать реактивность. Дальнейшее развитие технологий водо-водяных реакторов требует оптимизации размещения выгорающего поглотителя в активной зоне.

Переход от чисто уранового топлива к топливу с выгорающими поглотителями увеличивает по абсолютному значению отрицательный температурный коэффициент реактивности. Гомогенное распределение выгорающего поглотителя в топливе приводит к следующему:

1) Ухудшению (снижению) теплопроводности (особенно для гадолиния).

 Снижению температуры плавления топлива (особенно для европия).

3) Ухудшению самозащищенности реактора.

4) Быстрому выгоранию сильнопоглощающих изотопов гадолиния (155 Gd, 157 Gd), определяющих свойства nat Gd как выгорающего поглотителя.

5) Ухудшению равномерности распределения энерговыделения.

По этим причинам авторы работ [3, 4] анализируют возможность использования гранулированного Gd_2O_3 в UO_2 -матрице, что практически не ухудшает теплопроводность UO_2 -топлива и позволяет снизить скорость выгорания гадолиния, т.е. увеличить продолжительность кампании. В работе [5] рассматривается возможность размещения проволоки из Gd_2O_3 в центральном отверстии твэлов. А в работе [6] сравнивается коэффициент размножения ячейки $K_{\rm яч}$ как функции глубины выгорания для нескольких выгорающих поглотителей. В работе [7] сравнили влияние Gd_2O_3 и Eu_2O_3 на характеристики ядерного топлива легководного реактора PWR американского производства.

В настоящей работе проведено исследование нескольких вариантов топлива (B_1-B_7), представленных в табл. 2. Расчеты проводились при стандартных параметрах ТВС (TBC-A) (439GT) и твэлов ВВЭР-1000, представленных в табл. 3 и на рис. 1–3.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнение влияния Gd и Eu на нейтроннофизические характеристики TBC реакторов ВВЭР-1000 при различных вариантах размещения выгорающих поглотителей в тепловыделяющих элементах в независимом или смешанном виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все расчеты были выполнены методом Монте-Карло с использованием версии 2.1.29 кода Serpent 2 [8] для сборки ТВС-А типа 439GT [9]. Основное внимание уделено анализу зависимости от глубины выгорания коэффициента размножения нейтронов K_{∞} , концентрации различных изотопов в составе топлива, в частности ²³⁹Pu и ²⁴¹Pu, и распределения поля энерговыделения.

Примем среднюю линейную мощность энерговыделения в твэле равной 166 Вт/см [10]. Использовали статистику расчетов — 2000000. Характеристики рассчитывались для 74 шагов выгорания в диапазоне от свежего топлива до конечной глубины выгорания в 60 МВт сут/кгU. Ядерные данные были получены из библиотеки ядерных констант ENDFB7 [11].

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

На рис. 4 представлены коэффициенты размножения нейтронов K_{∞} в зависимости от глубины выгорания.

Коэффициент размножения K_{∞} в топливе сборки ВВЭР-1000 с 1.5% Gd (B_2) повышается до выгорания 5.34 (МВт сут/кгU) и уменьшается с выгоранием далее почти неотличимо от варианта B_1 . Соответствующие изменения K_{∞} связаны с изменением концентраций изотопов ВП, которые предоставлены на рис. 5а. Очевидно, что изотопы Gd выгорают быстро и не оказывают длительного влияния. Однако, если поместить Gd в центральное отверстие твэл (вариант B_5), выгорание замедлится и его влияние будет заметно более продолжительное время. Это обусловлено уменьшением потока тепловых нейтронов в новом месте расположения выгорающего поглотителя.

Коэффициент размножения K_{∞} в топливе сборки ВВЭР-1000 с 1.5% Eu (B₃), почти постоянен до выгорания 10.34 (МВт сут/кгU), и уменышается с выгоранием после этого, всегда оставаясь меньше, чем в случае просто уран-оксидного топлива. Изменения K_{∞} связаны с изменением концентраций изотопов ВП, которые представлены на рис. 56. Коэффициент размножения K_{∞} в топливе сборки ВВЭР-1000 с 0.75% Gd и 0.75% Eu (B₄) находится между значениями вариантов рас-



Рис. 1. Геометрия сборки ТВС-А (В₁).



Рис. 2. Геометрия сборок ТВС-А (В2-В7).



Рис. 3. Геометри твэл в ТВС-А.



Рис. 4. Коэффициент размножения нейтронов K_{∞} в зависимости от глубины выгорания.

чета B_2 и B_3 и эти изменения K_∞ связаны с изменением концентраций изотопов ВП, которые представлены на рис. 5в. Использование в ядерном топливе совместно двух выгорающих погло-



Рис. 5а. Масса ¹⁵⁵Gd и ¹⁵⁷Gd в зависимости от глубины выгорания в вариантах B_2 и B_5 . 56. Масса ¹⁵¹Еи и $^{153}\rm{Eu}$ в зависимости от глубины выгорания в вариантах B_3 и $B_6.$ **5в.** Масса $^{155}\rm{Gd}$, $^{157}\rm{Gd}$ и $^{151}\rm{Eu}$ в зависимости от глубины выгорания в вариантах В4 и В7.

тителей (Gd и Eu) лучше стабилизирует поведение коэффициента размножения в зависимости от глубины выгорания и на более длительное время, чем при любом использовании одного Gd. К тому же, это меньше снижает теплопроводность, чем при использовании одного Gd. и меньше снижает температуру плавления топлива, чем при использовании одного Еи.

Радиальный коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по ТВС в зави-



Рис. 6. Масса ²³⁹Ри в зависимости от глубины выгорания

симости от глубины выгорания представлен в табл. 4.

Следует отметить существенное возрастание коэффициента неравномерности энерговыделения по ТВС в случае применения ВП, особенно в начале каждой кампании. Естественно, что для гадолиния степень депрессии потока нейтронов в твэлах, расположенных вблизи твэгов, больше, чем для твэлов вблизи твэев. Поэтому и коэффициент неравномерности для вариантов с европием ниже, чем с гадолинием. Однако по мере выгорания поглотителя коэффициент неравномерности снижается, приближаясь к значению для эталонного варианта. Кроме того, для вариантов с гетерогенным распределением ВП по твэлу степень неравномерности энерговыделения снижается.

НАКОПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫГОРАНИЯ

Наличие ВП в топливе смещает нейтронный спектр в область эпитепловых нейтронов. И чем боль-

Таблица 4. Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения

Глубина выгорания (MBт сут/кгU)	B_1	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	\mathbf{B}_{6}	B ₇
0.0	1.07	1.25	1.20	1.25	1.10	1.18	1.16
9.84	1.07	1.08	1.15	1.10	1.09	1.14	1.10
20	1.07	1.07	1.11	1.09	1.07	1.11	1.08
30	1.06	1.06	1.11	1.08	1.07	1.10	1.09
40	1.06	1.07	1.09	1.09	1.06	1.09	1.08
50	1.06	1.07	1.07	1.07	1.06	1.08	1.07
60	1.06	1.06	1.08	1.07	1.06	1.07	1.07

2019



Рис. 7. Масса ²⁴¹Ри в зависимости от глубины выгорания.

ше эффективность ВП, тем больше это смещение. Гадолиний полностью выгорает до 14 МВт сут/кгU, поэтому нейтронный спектр смещается в область быстрых нейтронов только в этом промежутке времени. А при использовании европия, во-первых: эффективность ВП больше, что приводит к большему смещению нейтронного спектра в область быстрых нейтронов; во вторых, влияние ВП продолжается до конца кампании. Это приводит к большему накоплению ²³⁹Pu и ²⁴¹Pu, что показано на рис. 6 и 7.

выводы

Использование ВП в ядерном топливе приводит как к положительным, так и к отрицательным эффектам. Эти эффекты зависят от вида используемого выгорающего поглотителя, концентрации ВП в топливе и количества ячеек, содержащих ВП. В настоящей работе проведено сравнение влияния выгорающих поглотителей для вариантов их использования, представленных в табл. 2.

Применение Gd в качестве выгорающего поглотителя уменьшает коэффициент размножения нейтронов K_{∞} только в начальный период кампании, а использование Eu уменьшает K_{∞} практически на все время кампании, но топливо при этом переходит в подкритическое состояние при меньшем выгорании (т.е. на более ранней стадии). К тому же радиоактивность топлива при использовании Eu выше, чем при применении Gd, что может потребовать более длительного охлаждения ОЯТ в бассейне выдержки.

Совместное использование Gd и Eu в качестве выгорающих поглотителей с разными вариантами их размещения в твэл стабилизирует поведение коэффициента размножения K_{∞} в надкритическом положении (B_4 и B_7), и еще лучший ре-



Рис. 8. Геометрия сборок ТВС-А с 72 твэгами.



Рис. 9. Коэффициент размножения нейтронов K_{∞} в зависимости от глубины выгорания.

зультат достигается, когда Gd помещается в центральное отверстие твэл (B₇).

Сравнение проведенных вариантов расчета показывает, что наилучшими характеристиками и условиями обеспечения безопасности работы реактора обладают варианты B_4 и B_7 совместного использования выгорающих поглотителей, причем размещение Gd в центральное отверстие твэл дает дополнительные преимущества. Величина K_{∞} остается в критическом состоянии до выгорании 27 MBt сут/кгU, что потребует меньшего количества бора при эксплутации реактора во время кампании и сокращения экономических расходов. Использование Gd в центральном отверстии твэл стабилизирует изменение коэффициента размножения нейтронов в начале кампании.

Устойчивость K_{∞} (рис. 4) обеспечивает дополнительные пределы ядерной безопасности во время работы, особенно в начале кампании. Первая кампания топлива в реакторе не требует тогда изменения концентрации борной кислоты, регулирования критичности состояния с помощью вставки или извлечения СУЗ, а это уменьшает экономические издержки.

Наилучшего варианта удается достигнуть при использовании 72 топливных элементов с ВП в TBC: с 0.15% содержанием Eu в топливе каждого из 72 твэгов и с 1.5% содержанием Gd в центральном отверстии этих твэгов, как показано на рис. 8.

В результате получается большая стабильность в значениях K_{∞} на начальной стадии кампании вплоть до выгорания в 16 МВт сут/кгU, как показано на рис. 9. Величина K_{∞} остается в критическом состоянии вплоть до глубины выгорания в 37 МВт сут/кгU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Жахонг Ли, Дзюнъити Хори, Кен Накадзима, Тадафуми Сано, Самуол Ли Нейтронозахватной крест измерений раздел 151, 153 ЕС через пару С6D6 детекторы [Текст]. Стр. 1046–1057. Получено 14 октября 2016, принято 23 мая 2017, опубликовано онлайн: 17 июля 2017. – URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00223131.2017.1344575 (дата обрашения: 10.11.2018).
- Выгорающие Поглотители Выгорающие Яды. Адрес: ттпс://ВСП.ядерной энергии.сеть/атомная электростанция/ядерного топлива/горючие материалы горючие-яды/. (Дата обращения 21.01.2018).
- Стогов Ю.В. Перспективные технологии использования оксидного уран-гадолиниевого топлива в легководных реакторах [Текст] / Ю.В. Стогов [и др.] // Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. Москва : МИФИ, 2006. С. 45–47.

- Балистайри Д. Исследование UO2/Gd2O3 топливной смеси [Текст] / Д. Балистайри // МАГАТЭ-ТесDoc-1036. Вена (Австрия). 1998. С. 63–72.
- 5. Ермолин В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов [Текст] / В.С. Ермолин, В.С. Окунев // Физикотехнические проблемы ядерной энергетики. Научная сессия МИФИ-2008. С. 101–102.
- Бергельсон Б.Р. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями [Текст] / Б.Р. Бергельсон [и др.] // Атомная энергия. Т. 109. Вып. 4. Октябрь 2010. С. 240–245.
- Абдельгафар Галахом А. Исследование возможности использования сплава европия и Пирекса в качестве сжигаемого поглотителя в PWR [Текст] / А. Абдельгафар Галахом // Анналы ядерной энергии. Том 110. Декабрь 2017. С. 1127–1133.
- Липаннен Дж. SERPENT код расчета выгорания физики реактора Монте-Карло с непрерывной энергией [Текст] / Центр технических исследований VTT Финляндии. 18.06.2015.
- 9. Ондрей Новак, Ондрей Chvala, Николай П. и др. "ВВЭР 1000 Хмельницкий бенчмарк-анализ, рассчитанный Serpent2". Анналы ядерной энергетики 110 (2017) 948—957.
- Ядерное топливо для реакторов BBЭP, URL: http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/resources/9a8c448042df8fd7a492b7b2cb3f9f43/Nuclear-Fuel_RUS_2017.pdf. (Дата обращения 21.01.2018).
- 11. Чедвик М.Б. ENDF/B-VII.1 ядерные данные для науки и техники: сечения, ковариации, выходы продуктов деления и данные распада [Текст] / М.Б. Чедвик [и др.] // Листы данных. 112. 2011. С. 2887–2996. https://doi.org/10.1016/Дж.НСР.2011.11.002

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2019, vol. 8, no. 3, pp. 199–205

Comparison of the Effect of Burnable Absorbers (Gd and Eu) on the Neutron-Physical Characteristics of VVER-1000 Fuel Assemblies

M. A. Abu Sondos^{*a*,#}, V. M. Demin^{*a*}, and V. I. Savander^{*a*}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia [#]e-mail: MAbusondos@mephi.ru

Received January 24, 2019; revised April 12, 2019; accepted April 26, 2019

Abstract—The problem of using burnable absorbers in VVER reactors to reduce the volume of liquid regulation of excess fuel burnup reactivity has been considered. The use of burnable absorbers such as Gd_2O_3 and Eu_2O_3 in nuclear fuel has a positive effect on the nuclear fuel cycle of light-water reactors PWR (VVER-1000) and BWR (RBMK) and leads to an increase in the duration of the campaign and some other positive properties. However, the presence of burnable absorbers in fuel simultaneously deteriorates the uniformity of the energy field and a number of other negative properties. Previous studies of the possibility of reducing these negative results have been presented. One of the proposed technical solutions is to change the structure of gadolinium placement in fuel rods. In this work, the influence of the placement of burnable absorbers (Gd_2O_3 and Eu_2O_3) on the neutron-physical characteristics of nuclear fuel of VVER-1000 reactors has been studied. These characteristics are the infinite neutron multiplication factor, the coefficient of uneven distribution of energy release, and the accumulation of isotopes depending on the burnup.

Keywords: TVEG, Serpent, FA, VVER-1000, burnable absorbers, Eu₂O₃, Gd₂O₃, coefficient of uneven distribution of energy

DOI: 10.1134/S2304487X19030027

REFERENCES

- 1. Jaehong Lee Jun-ichi Hori, Ken Nakajima, Tadafumi Sano & Samyol Lee. Neutron capture cross section measurements of 151, 153 Eu using a pair of C6D6 detectors. P. 1046–1057 | Received 14 Oct 2016, Accepted 23 May 2017, Published online: 17 Jul 2017.
- Burnable Absorbers Burnable Poisons. URL: ttps:// www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/. (Accessed 21.01.2018).
- Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivnye tekhnologii ispol'zovaniya oksidnogo urangadolinievogo topliva v legkovodnykh reaktorax [Promising Technologies for the Use of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel in Light-Water Reactors]. Materialy' XIV seminara po problemam fiziki reaktorov [Proceedings of the XIV Seminar on Reactor Physics]. Moscow: MEPhI. 2006. P. 45–47 (in Russian).
- Balestieri D. Issledovanie UO2/Gd2O3 toplivnoj smesi. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. P. 63–72.
- Ermolin V.S., Okunev V.S. O razmeshchenii gadoliniya v central`nom otverstii tvelov vodo-vodyany`kh reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Opening of Water–Water Reactor Fuel Rods]. Fiziko-tekhnicheskie problemy yadernoj energeti [Physical and Technical Problems of Nuclear Power Engineering]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of ME-PhI]. 2008. P. 101–102 (in Russian).

- Bergelson B., Belonog V., Gerasimov A. et al. Glubina vygoraniya yadernogo topliva VVER s raznymi poglotitelyami [Depth of Burn-Up of WWER Nuclear Fuel with Different Absorbers]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. V. 109. Vol. 4. October 2010. P. 240–245 (in Russian).
- Abdelghafar Galahom A. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya splava evropiya i Pireksa v kachestve szhigaemogo poglotitelya v PWR [Study of Possibility of Europium and Pyrex Alloy Using as Burnable Absorber in PWR]. Annaly yadernoj energii [Annals of Nuclear Energy]. V. 110. December 2017. P. 1127–1133 (in Russian).
- Leppänen J. SERPENT a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
- 9. Ondrej Novak, Ondrej Chvala, Nicholas Р. и др. "VVER 1000 Khmelnitskiy benchmark analysis calculated by Serpent2". Annals of Nuclear Energy 110 (2017). P. 948–957.
- 10. Nuclear fuel for VVER reactors. URL: http://www.tvel.ru/was/otklucheny/podklyuchenie/tel/tvelsite/resursov/9a8c448042df8fd7a492b7b2cb3f9f43/NuclearFuel_RUS_2017.pdf. (Accessed 21.01.2018).
- Chadwick M.B., et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011). P. 2887–2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.