

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Eu_2O_3
В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ
ВВЭР-1200**

© 2019 М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассматривается задача об использовании выгорающих поглотителей (ВП) в реакторах типа ВВЭР для снижения объема жидкостного регулирования избыточного запаса реактивности при выгорании топлива. В данной работе в качестве ВП рассматривается природный европий в форме Eu_2O_3 , размещенный в интегрированном виде с урановым топливом в твэлах. Проведен анализ обеспечения ядерной и радиационной безопасности при использовании подобного топлива в реакторах ВВЭР-1200.

Ключевые слова: ТВЭГ, SERPENT, ТВС, ВВЭР-1200, выгорающий поглотитель, Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , спектр гамма-излучения.

Поступила в редакцию 24.12.2018

После доработки 29.01.2019

Принята к публикации 03.02.2019

Введение

Для снижения концентрации бора в теплоносителе часть избыточной реактивности компенсируется выгорающими поглотителями, размещаемыми в твэлах [1-5]. Наибольшее распространение в качестве выгорающего поглотителя (ВП) получили природный гадолиний [6] и природный европий [1]. Из-за большого значения сечения поглощения гадолиния, особенно нечетными изотопами, его размещают в небольшом количестве твэлов (твэгов), а путем подбора весового содержания гадолиния в твэгах добиваются того, чтобы он полностью выгорал за одну кампанию. В отличие от гадолиния европий, имеющий небольшое значение сечения поглощения, размещают в большом количестве твэлов (твэгов), и при любом весовом содержании европия в твэгах он не выгорит до конца общей кампании.

В данном сообщении рассматривается вариант размещения европия в большом числе твэгов, но с уменьшенным содержанием европия в каждом из них.

Природный европий состоит из двух изотопов, ^{151}Eu и ^{153}Eu , их микросечения захвата тепловых нейтронов ($E=0,0253$ эВ) и концентрации соответственно равны 9100 б и 47,44%; 312 б и 52,23% [7]. Изотоп ^{151}Eu выгорит за первую кампанию, а ^{153}Eu не выгорит до конца общей кампании.

Цель работы – добиться снижения максимального запаса реактивности в течение кампании, существенно не увеличивая радиоактивность ОЯТ.

В данной работе рассмотрено влияние повышения количества твэгов с использованием европия как выгорающего поглотителя на ядерную и радиационную безопасность работы реактора ВВЭР-1200 и сравнение его влияния с влиянием Gd.

Постановка задачи

Были выбраны несколько вариантов размещения твэгов в ТВС с разными количествами в них, и для каждого был проведен расчет изменения нейтронно-физических и радиационных характеристик ТВС от выгорания топлива и характеристик ОТВС в бассейне выдержки.

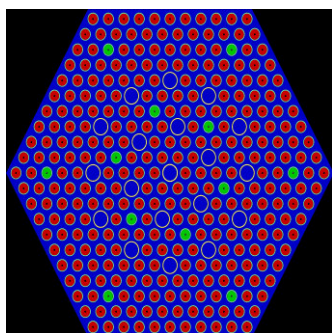
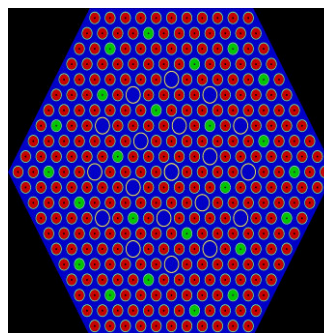
Исходные данные по загрузке европия в твэгах, количестве твэгов в ТВС и их геометрические характеристики для этих вариантов представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 1а-1г. Для всех вариантов расчеты проводились при концентрации борной кислоты, равной нулю.

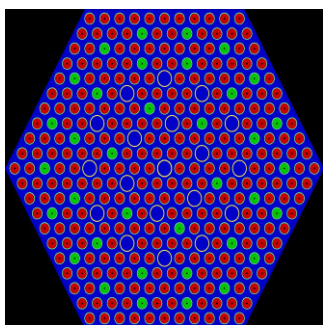
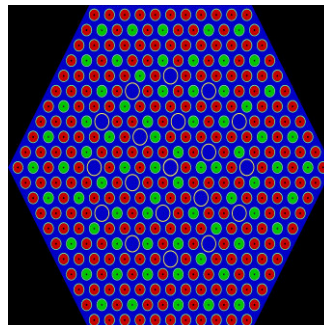
Таблица 1 – Основные геометрические параметры ТВС [Basic geometrical parameters of FA]

Параметр	ТВС
Длина топливного элемента, мм	3750
Масса UO_2 , кг	534
Плотность топлива ($г/см^3$)	10,5
Средняя температура топлива ($^{\circ}K$)	1000,0
Средняя плотность воды ($г/см^3$)	0,72
Средняя температура теплоносителя ($^{\circ}K$)	587,0
Количество тепловыделяющих элементов в одной ТВС	312
Внутренний/Наружный диаметр топливной таблетки, мм	1,4/7,57
Внутренний/Наружный диаметр оболочки, мм	7,73/9,1
Материал оболочки	сплав Э110
Центральная трубка	
Внутренний/Наружный диаметр, мм	11,0/13,0
Материал	сплав Э635
Направляющая трубка (18 шт.)	
Внутренний/Наружный диаметр, мм	10,9/12,6
Материал	сплав Э635

Таблица 2 – Количество твэгов в ТВС [Number of the fuel rods with burnable absorbers in FA]

Вариант	Количество и состав топлива твэлов
(без ВП) B_1	312 - 4,9% (^{235}U)
(12 Gd) B_2	300 - 4,95% (^{235}U) и 12 - 3,6% (^{235}U) с 5,0% Gd_2O_3
(12 Eu) B_3	300 - 4,95% (^{235}U) и 12 - 3,6% (^{235}U) с 5,0% Eu_2O_3
(24 Eu) B_4	288 - 4,9% (^{235}U) и 24 - 4,9% (^{235}U) с 2,5% Eu_2O_3
(36Eu) B_5	276 - 4,9% (^{235}U) и 36 - 4,9% (^{235}U) с 1,667% Eu_2O_3
(72Eu) B_6	240 - 4,9% (^{235}U) и 72 - 4,9% (^{235}U) с 0,834% Eu_2O_3
(72 Eu) B_7	240 - 4,9% (^{235}U) и 72 - 4,9% (^{235}U) с 0,834% Eu_2O_3 с обогащение 80% ^{151}Eu
(312 Eu) B_8	312 - 4,9% (^{235}U) и с 0,192% Eu_2O_3

Рисунок 1а – ТВС- B_2 и B_3 [FA- B_2 and B_3]Рисунок 1б – ТВС- B_4 [FA- B_4]

Рисунок 1в – FA-B₅ и B₃ [FA-B₅ and B₃]Рисунок 1г – FA-B₆ [FA-B₆]

Вариант В₁, в котором отсутствует ВП, выбран в качестве эталонного для сопоставления с остальными, поскольку в этом варианте предполагается полностью жидкостное регулирование запаса реактивности. Вариант В₂ относится к топливной загрузке реактора типа ВВЭР-1200, в котором в основном применяется гадолиний. В вариантах В₃-В₈ вместо Gd используют Eu и увеличенное, по отношению к варианту В₂, количество твэгов (12, 24, 36, 72 и 312 твэг), причем, полная загрузка гадолиния и европия во всех этих вариантов такая же, как и для варианта В₂.

Влияние ВП на ядерные и радиационные характеристики топлива связано с термином «сильная блокировка потока тепловых нейтронов», которая зависит от двух величин:

- 1) сечения поглотителя тепловых нейтронов – прямая пропорциональная зависимость;
- 2) концентрации изотопов ВП – прямая пропорциональная зависимость.

Чем сильнее блокировка потока тепловых нейтронов, тем меньше эффективность ВП (тем меньшее количество ВП участвует в поглощении нейтронов).

Результаты

Все расчеты были выполнены с использованием кода SERPENT 2.1.30 [8], основанного на решении уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло, для сборки ТВС реактора ВВЭР-1200. Основное внимание уделено анализу зависимости коэффициента размножения нейтронов K_∞ от выгорания и распределения поля энерговыделения для выбранной ТВС. Средняя мощность ТВС была принята равной 1.96326×10^7 Вт, статистика расчетов составила 2 000 000. Ядерные данные были получены из библиотеки ядерных констант ENDFB7 [9].

Коэффициенты размножения нейтронов

На рисунке 2 представлены коэффициенты размножения нейтронов K_∞ в зависимости от глубины выгорания для всех рассмотренных вариантов.

Из-за большего сечения поглощения тепловых нейтронов гадолиний выгорает быстрее, чем европий, при этом необходимо отметить следующее:

- 1) влияние гадолиния сказывается в диапазоне выгорания до 14 МВт×сут/кгU, а влияние Eu прослеживается в течение всей кампании;
- 2) эффект сильной блокировки потока тепловых нейтронов при использовании гадолиния больше, чем для европия.

Поскольку коэффициент размножения нейтронов в ТВС с гадолинием при любом выгорании больше, чем при использовании европия, следовательно, использование европия позволяет снизить «вес» жидкостной системы регулирования. Увеличение числа твэгов при одновременном уменьшении содержания европия в каждом из них приводит:

- во-первых, к уменьшению начального коэффициента размножения нейтронов;
- во вторых, к снижению объема жидкостного регулирования.

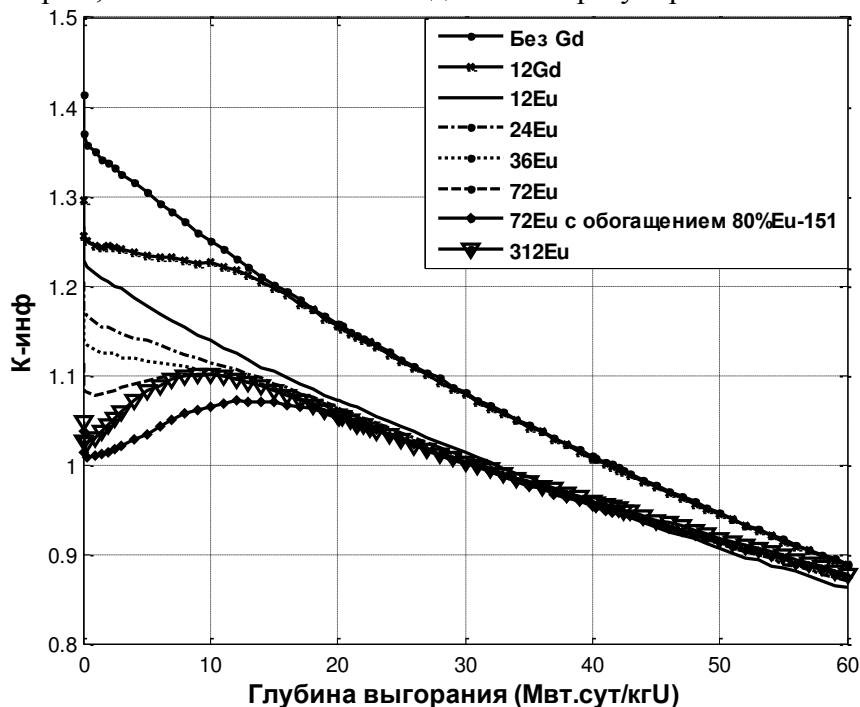


Рисунок 2 – Коэффициент размножения нейтронов в зависимости от глубины выгорания [Neutron multiplication factor depending on burnup depth]

Из-за большего сечения поглощения тепловых нейтронов гадолиний выгорает быстрее, чем европий, при этом необходимо отметить следующее:

3) влияние гадолиния сказывается в диапазоне выгорания до 14 МВт×сут/кгU, а влияние Eu прослеживается в течение всей кампании;

4) эффект сильной блокировки потока тепловых нейтронов при использовании гадолиния больше, чем для европия.

Поскольку коэффициент размножения нейтронов в ТВС с гадолинием при любом выгорании больше, чем при использовании европия, следовательно, использование европия позволяет снизить «вес» жидкостной системы регулирования. Увеличение числа твэгов при одновременном уменьшении содержания европия в каждом из них приводит:

- во-первых, к уменьшению начального коэффициента размножения нейтронов;
- во вторых, к снижению объема жидкостного регулирования.

Кроме того, независимо от начального обогащения европия по изотопу 151 (вариант В₇), конечная концентрация изотопа 153 и поведение коэффициента размножения нейтронов в конце кампании во всех вариантах (В₃ – В₈) примерно одинаковы. Отметим, что в вариантах В₆ – В₈ (72 твэга и больше), максимальное значение коэффициента размножения нейтронов достигается не в начале кампании.

Концентрация изотопов

Наличие ВП в топливе смещает нейтронный спектр в область эпитепловых нейтронов. И чем больше 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 ^{239}Pu и ^{241}Pu (рис. 3 и 4). А с повышением числа твэгов – к еще большему повышению накопления ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора.

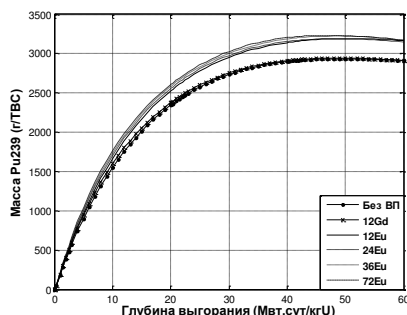


Рисунок 3 – Масса ^{239}Pu в зависимости от глубины выгорания [The mass of ^{239}Pu depending on the burnup]

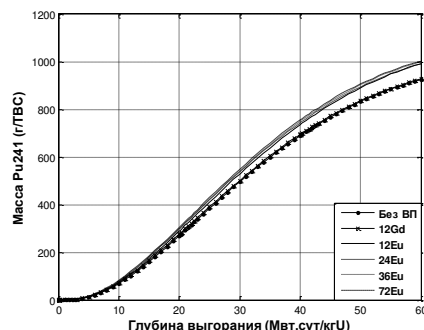


Рисунок 4 – Масса ^{241}Pu в зависимости от глубины выгорания [The mass of ^{241}Pu , depending on the burnup]

На рисунках 3 и 4 видно, что поскольку эффективность Eu больше чем Gd, то накопление ^{239}Pu и ^{241}Pu больше. При этом с повышением числа твэгов блокировка тепловых нейтронов уменьшается, эффективность ВП повышается и смещение нейтронного спектра в область эпитепловых нейтронов усиливается, что приводит к повышению накопления ^{239}Pu и ^{241}Pu . Накопление ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора, приводит к увеличению содержания остаточного невыгоревшего ^{235}U к концу кампании.

Хранение ОЯТ

С использованием европия в топливе как ВП накопление изотопа ^{154}Eu повышается. Он образуется путем захвата нейтронов изотопом ^{153}Eu ; кроме того, выход ^{154}Eu при делении ^{239}Pu больше, чем при делении ^{235}U в 3,5 раза [10]. Спектр гамма-излучения изотопа ^{154}Eu имеет высокую энергию и большой период полураспада, поэтому его наличие в отработавшем топливе ухудшает радиационные свойства ОЯТ. А при использовании гадолиния, который полностью выгорает в первой кампании, соответствующие свойства ОЯТ практически не изменяются.

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости остаточного энерговыделения и мощности излучения гамма-квантов ОЯТ в зависимости от времени выдержки.

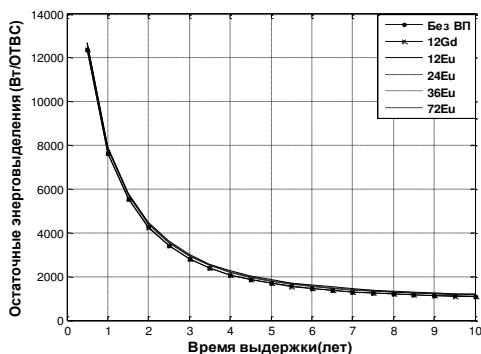


Рисунок 5 – Остаточное энерговыделение в зависимости от времени выдержки [Residual energy depending on cooling time]

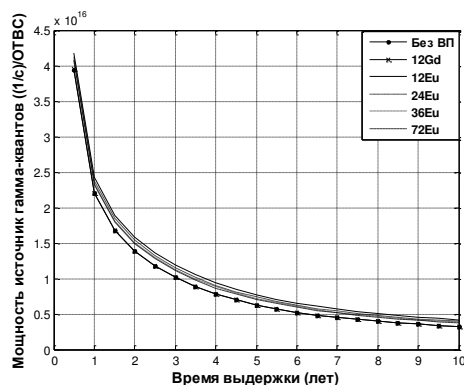


Рисунок 6 – Мощность излучения гамма-квантов в зависимости от времени выдержки [Source rate of gamma-quantum depending on the cooling time]

Прежде всего, отметим, что использование европия в топливе повышает остаточное энерговыделение и увеличивает мощность излучения гамма-квантов. Это может потребовать немного более длительного охлаждения отработавшего топлива в бассейне выдержки реактора.

Спектр гамма-излучения ОЯТ после пяти лет выдержки для всех вариантов представлен на рисунке 7.

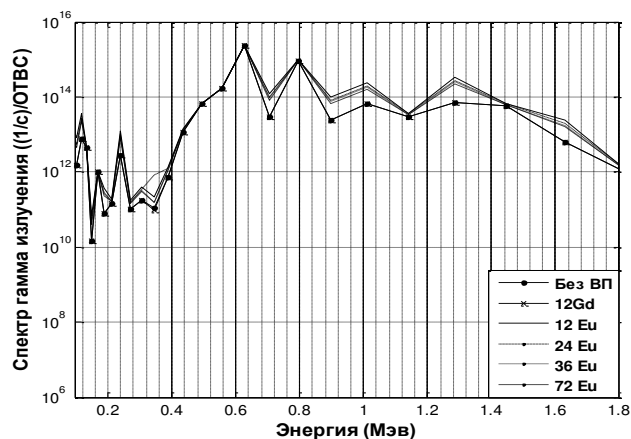


Рисунок 7 – Спектр интенсивности гамма излучения после пяти лет выдержки [Spectrum gamma source after five years of cooling]

Видно, что спектр гамма-излучения для всех рассмотренных вариантов расчета (V_1 - V_6) почти одинаков, кроме диапазонов энергий, в которых основной вклад в спектральное гамма-излучение дают фотоны изотопов Eu, важнейшим из которых является ^{154}Eu , что и может потребовать более длительного охлаждения ОЯТ.

В таблице 3 представлены остаточное энерговыделение и интенсивность гамма-излучения ОЯТ после пяти лет выдержки для вариантов V_1 - V_6 .

Таблица 3 – Остаточное энерговыделение и интенсивность гамма-излучения после пяти лет выдержки [Residual energy and the energy spectrum of gamma radiation after five years of cooling]

Параметры	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
Остаточное энерговыделение (Вт/ОТВС)	1687,1	1684,1	1851,6	1818,3	1797,0	1786,5
Интенсивность гамма-излучения (Вт/ОТВС)	624,3	622,2	744,3	718,9	702,4	690,6
Доля энергии гамма-излучения от полного энерговыделения	37,0%	37,0%	40,2%	39,5%	39,1%	38,7%

Из таблицы 3 видно, что использование Gd в топливе не изменяет ядерные и радиационные характеристики ОЯТ, а Eu повышает остаточное энерговыделение и долю энергии гамма-излучения от общего энерговыделения, особенно при 12 твэгах. Использование ТУК-13 для транспортирования ОТВС после пяти лет выдержки возможно для первого и второго вариантов (без европия), а в варианте V_3 наши расчеты показывают, что потребуются еще как минимум полгода дополнительной выдержки ОЯТ. Аналогичные изменения при соответствующей небольшой корректировке потребуются для вариантов V_4 , V_5 и V_6 .

Выводы

Использование европия вместо гадолиния в ядерном топливе реактора ВВЭР-1200 приводит как к положительным, так и к отрицательным эффектам.

Положительные эффекты:

1) Использование европия обеспечивает большее снижение объема жидкостного регулирования.

2) Использование европия ускоряет накопление изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора.

Отрицательные эффекты:

1) Из-за накопления радиоактивности изотопа ^{154}Eu и изотопов плутония может потребоваться увеличение времени выдержки ОЯТ в бассейне выдержки.

2) Использование европия снижает выгорание топлива, что приводит к увеличению расхода природного урана. Но при повторном использовании топлива этот эффект будет играть значительно меньшую роль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Балистайри, Д. Исследование $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ топливной смеси [Текст] / Д. Балистайри // *МАГАТЭ-ТесДос-1036*. – Вена (Австрия). – 1998. – С. 63-72.
4. Ермолин, В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов [Текст] / В.С. Ермолин, В.С. Окунев // *Физико-технические проблемы ядерной энергетики*. – Научная сессия МИФИ-2008. – С. 101-102.
5. 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.
6. Выговский, С.Б. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР [Текст] / С.Б. Выговский [и др.]. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
7. Жахонг Ли, Дзюньити Хори, Кен Накадзима, Тадафуми Сано, Самуол Ли Нейтронозахватной крест измерений раздел 151,153 ЕС через пару C6D6 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 обращения: 10.11.2018).
8. Липаннен, Дж. SERPENT – код расчета выгорания физики реактора Монте-Карло с непрерывной энергией [Текст] / Дж. Липаннен // *Центр технических исследований VTT Финляндии*. – 18 июня 2015.
9. 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. – 10.1016/Дж.НСР.2011.11.002.
10. Уиллман, С. Применение гамма-спектроскопии отработавшего ядерного топлива для целей гарантий и инкапсуляции [Текст] / С. Уиллман. – *Acta Universitatis Upsaliensis*. Цифровые всеобъемлющие резюме диссертаций Уппсальского научно-технического факультета 212. Уппсала. – 2006. – 81 с. ISBN 91-554-6637-0.

REFERENCES

- [1] 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 e`nergii [Annals of Nuclear Energy]*. Volume 110. December 2017. P. 1127-1133 (in Russian).
- [2] Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivny`e tehnologii ispol'zovaniya oksidnogo uran-gadolinievogo topliva v legkovodny`x 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).
- [3] Balestieri D. Issledovanie UO₂/Gd₂O₃ toplivnoj smesi. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. P. 63-72.
- [4] Ermolin V.S., Okunev V.S. O razmeshhenii gadoliniya v central'nom otverstii tve'lov vodo-vodyany'x reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Opening of Water-Water Reactor Fuel Rods]. Fiziko-texnicheskie problemy` yadernoj e`nergeti [Physical and Technical Problems of Nuclear Power Engineering]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of MEPhI]. 2008. P. 101-102 (in Russian).
- [5] Bergelson B., Belonog V., Gerasimov A. et al. Glubina vy`goraniya yadernogo topliva VVE`R s razny`mi poglotitelyami [Depth of Burn-Up of WWER Nuclear Fuel with Different Absorbers]. Atomnaya e`nergiya [Atomic Energy]. V. 109 Vol. 4 October 2010. P. 240-245 (in Russian).
- [6] Vygovskii S.B., Ryabov N.Oh, Semenov A.A. et al. Fizicheskie i konstrukcionny`e osobennosti yaderny`x e`nergeticheskix ustanovok s VVE`R [Physical and Structural Features of Nuclear Power Plants with WWER]. Moskva. NIYaU MIFI [Moscow. National Research Nuclear University «MEPhI»]. 2011. 376 p. (in Russian).
- [7] 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. Pages 1046-1057 | Received 14 Oct 2016, Accepted 23 May 2017, Published online: 17 Jul 2017.
- [8] Leppänen J. SERPENT – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
- [9] 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.
- [10] Willman, C. 2006. Applications of Gamma Ray Spectroscopy of Spent Nuclear Fuel for Safeguards and Encapsulation. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 212. 81 p. Uppsala. ISBN 91-554-6637-0.

Assess of Possibility of Eu₂O₃ Using as Burnable Absorber in WWER-1200 Reactor

M.A. Abu Sondos¹, V.M. Demin², V.I. Savander³

Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID ID: 0000-0003-3954-151X

Was Researher ID: E-2735-2019

e-mail: MAbusondos@mephi.ru

²ORCID ID: 0000-0003-3894-9396

Was Researher ID: E-2750-2019

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³ORCID ID: 0000-0001-9309-5616

Was Researher ID: E-2743-2019

e-mail: VISavander@mephi.ru

Abstract – The paper deals with the problem of using burnable absorbers (BAs) in WWER reactors to reduce the volume of liquid regulation of excess fuel burnup reactivity. It considers natural europium in the form of Eu₂O₃, placed in an integrated form with uranium fuel in fuel rods. The analysis of nuclear and radiation safety in the use of such fuel in VVER-1200 reactors is carried out.

Keywords: TVEG, SERPENT, FA, WWER-1200, burnable absorbers, Eu₂O₃, Gd₂O₃, gamma radiation source spectrum.