

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang L., Xue D., Wei Z., Chen Zh., Mirzayev M., Chen Y., Chen Sh. Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification // *Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 1. – Iss. 1. – Art. no 100004. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100004>
2. World Energy Outlook Special Report (2016) Energy and air pollution. International Energy Agency, Paris.
3. Косторева Ж.А. Обоснование параметров древесно-угольных смесей в качестве топлива котельных агрегатов: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – 2022, 110 с.
4. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. Coal–biomass co-combustion: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106>
5. Arpia A.A., Chen W.H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 403. – Art. no 126233. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126233>
6. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив / Р.Б. Табакаев, И.Д. Димитрюк, И.К. Калинин, А.В. Астафьев, А.В. Гиль, К.Т. Ибраева, П.Ю. Чумерин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 190–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
7. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.
8. Fernández Y., Menéndez J.A. Influence of feed characteristics on the microwave-assisted pyrolysis used to produce syngas from biomass wastes // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2011. – Vol. 91. – P. 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.03.010>
9. Matamba T., Tahmasebi A., Yu J., Keshavarz A., Abid H.R., Iglauer S. A review on biomass as a substitute energy source: Polygeneration influence and hydrogen rich gas formation via pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 175. – Art. no. 106221. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106221>

ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР

Д.Г. Веретенников

*Томский политехнический университет,
ИЯТШ, ОЯТЦ, гр. ОАМЗИ*

Научный руководитель: С.В. Беденко, к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ

В реакторах ВВЭР используется топливо UO_2 , обогащенное до 3–5 % по U^{235} . Такое топливо обладает сравнительно низкой радиационной и термической стойкостью, что ограничивает эффективность работы реактора и снижает его безопасность.

Практическое применение получило уран-гадолиниевое топливо $UO_2 + 5–8 \text{ мас. \% } Gd_2O_3$. Ведутся исследования топлива с добавкой с AmO_2 , которую предлагается использовать как выгорающий поглотитель нейтронов [1]. Для длительной и эффективной работы реактора топливо легируют различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями. В качестве легирующих добавок также рассматриваются В, Ве, В, С, Mg, Al, Si, Hf, Er, Pa и др. Эти элементы улучшают радиационную и термическую стойкость топлива, его теплопроводность, теплофизические и нейтронно-физические параметры активной зоны. Например, теплопроводность топлива улучшается при добавлении в него различных соединений бериллия [2]. При внедрении добавок алюминия и кремния возрастает механическая прочность топливной таблетки UO_2 благодаря увеличению размеров зерна [3].

Тем не менее, не смотря на ряд преимуществ, некоторые из вышеперечисленных элементов являются целевыми для (α, n) -реакций и потому могут существенно осложнить радиационную обстановку на различных стадиях открытого и закрытого ядерно-топливного цикла. Используемое на практике уран-гадолиниевое топливо имеет сниженное значение теплопро-

водности (на 20 %) [3], поэтому проводятся исследования по поиску иных выгорающих поглотителей.

Целью данной работы является определение нейтронно-физических и радиационных характеристик наиболее оптимального состава модифицированного топлива для реактора ВВЭР-1200. В рамках данной работы поставлен ряд задач: анализ источников альфа- и нейтронного излучения свежего и облученного топлива, анализ выходов и спектров (α , n)-нейтронов из легирующих элементов малой и средней атомной массы, нейтронно-физический расчёт (k_{eff}) ТВС и расчёт выгорания ($N_i(t)$) топлива, расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения ОЯТ.

Расчёты выходов и спектров (α , n)-нейтронов из элементов малой и средней атомной массы выполнены в программе Sources-4C. В качестве расчётной модели использовалась модель плоскопараллельного моноэнергетического пучка α -частиц, падающего на материал мишени с интенсивностью 10^6 α -частиц/с. Энергия α -частиц принята равной 5,15 МэВ как средняя по спектру α -частиц отработавшего ядерного топлива реактора типа ВВЭР при значении выгорания равного 60 МВт·сут/т(U), при этом выдержка составляет год и более, а удельная активность радиоизотопов – $2,58 \cdot 10^{15}$ Бк/ТВС. Рассматриваются нейтроны с энергией 0–12 МэВ, данный диапазон разделен на 48 моноэнергетических групп для расчёта и представления спектра в групповом виде.

Рассматриваются два топливных состава с обогащением 4,9 % по U^{235} : UO_2 и $UO_2+0,2$ ат. % AmO_2 .

Расчёт нейтронного излучения ОЯТ выполнен в Sources-4C с использованием гомогенной модели топлива. Источниками альфа-частиц и нейтронов спонтанного деления являются различные тяжелые изотопы, возникающие в топливе в результате ядерных реакций. Материалом мишени являются изотопы O^{17} и O^{18} , являющиеся целевыми для (α , n)-реакции и входящие в состав UO_2 . По полученным данным о нейтронных спектрах рассчитана мощность эквивалентной дозы согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 года.

Активность источника α -частиц ОЯТ получена с помощью MCNP6.2 и данных авторов [1]. Нейтронно-физический расчёт и расчёт изотопного состава ОЯТ проведены в программах WIMS-D5B и MCNP6.2. Расчётная модель WIMS-D5B представляет собой элементарную ячейку упрощенной геометрии ТВС ВВЭР-1200, где реальные шестигранные ячейки заменяются на эквивалентные им цилиндрические.

На рис. 1 демонстрируются результаты расчета по Sources-4C выхода нейтронов (Y_n) и их энергетического распределения для элементов (E_n), которые рассматриваются для применения с целью улучшения свойств топлива и активной зоны реактора типа ВВЭР

В табл. 1 сведены результаты расчетов выходов (α , n)-нейтронов на Be, Al, Si и O (UO_2) в случае их присутствия в составе ОЯТ. Результат получен по данным рис. 1 (выход на ядрах O получен по гомогенной модели для UO_2) для ОЯТ активностью $2,58 \cdot 10^{15}$ Бк/ТВС ($\omega_\alpha = 4,47 \cdot 10^{-3}$ Бк·с⁻¹). Для сравнения также представлены характеристики спектров нейтронов спонтанного деления ^{244}Cm .

Таблица 1. Радиационные характеристики спектров нейтронов в сравнении

	9Be	^{27}Al	$^{29,30}Si$	$^{17,18}O (UO_2)$	^{244}Cm
Y_n , нейтр./с	$1,308 \cdot 10^9$	$6,490 \cdot 10^6$	$1,922 \cdot 10^6$	$3,315 \cdot 10^5$	$5,773 \cdot 10^6$
$E_{ср}$, МэВ	4,787	0,992	1,318	2,510	2,109
E_{max} , МэВ	10,75	2,25	3,5	6,5	>12

Нейтронно-физический расчёт ТВС с топливом из UO_2 показывает, что на начало кампании реактора k_{eff} составляет 1,35. При гомогенном введении 0,2 ат. % AmO_2 начальный k_{eff} снижается до 1,27. В обоих случаях k_{eff} на конец кампании реактора равен 0,77.

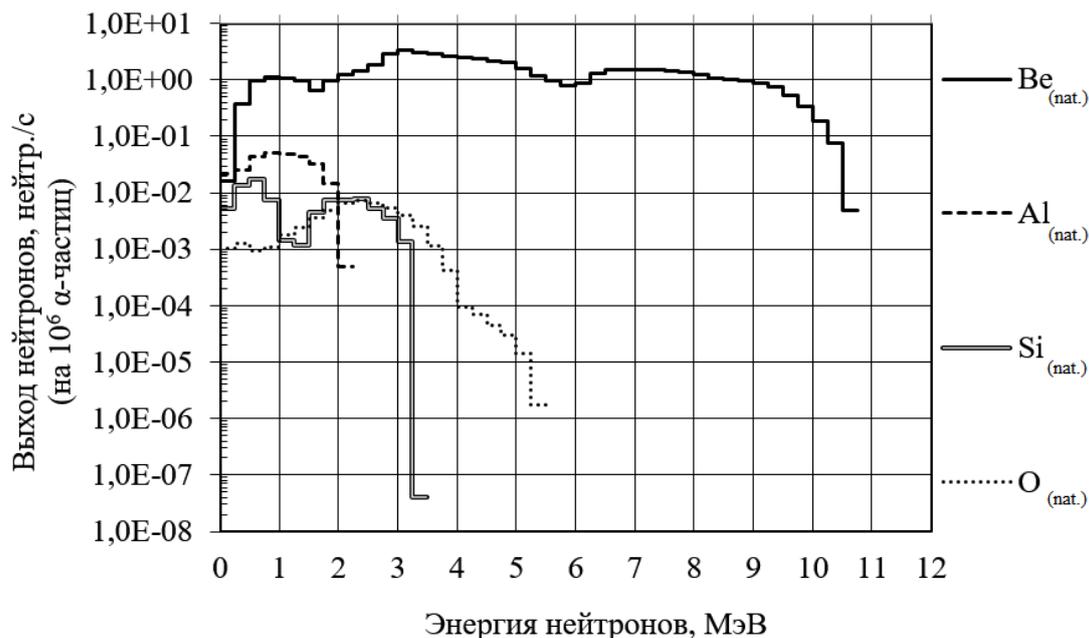


Рис. 1. Нейтронные спектры целевых для (α, n) -реакции элементов

Результаты расчёта мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения ($H_{T,R}$) после 7 лет выдержки следующие: при использовании топлива из UO_2 $H_{T,R} = 6,18$ Зв/(ч·ТВС), при введении 0,2 % AmO_2 $H_{T,R}$ увеличивается до 15,98 Зв/(ч·ТВС).

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и табл. 1 показывает, что 9Be , ${}^{27}Al$ и ${}^{29,30}Si$ обладают большим выходом (α, n) -нейтронов по сравнению с ${}^{17,18}O$ в составе UO_2 . При этом бериллий имеет выход даже более значительный, чем выход нейтронов спонтанного деления ${}^{244}Cm$, являющегося основным источником нейтронов ОЯТ. Учитывая, что данные элементы также уменьшают ураноёмкость топливных таблеток и усложняют технологический процесс их изготовления, сделан вывод о нецелесообразности их применения в качестве легирующих добавок.

Результаты нейтронно-физического расчёта подтверждают эффективность применения AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя нейтронов в UO_2 . Так как америций является более слабым поглотителем по сравнению с гадолинием, топливо размещается в твэлах без изменения обогащения. В таком случае легирующая добавка не влияет на неравномерность энерговыделения в ТВС. Кроме того, AmO_2 (0,2 ат. %) в гомогенном исполнении не ухудшает теплопроводность топлива, в отличие от Gd_2O_3 [1].

Результаты расчёта мощности эквивалентной дозы показывают, что дозовая нагрузка при использовании топлива с AmO_2 возрастает, но остаётся приемлемой при обращении с ОЯТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shelley A. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor / A. Shelley, M.H. Ovi // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 2454–2463.
2. Савченко А.М. Перспективные научно-технические разработки материалов и технологий безопасных твэлов коммерческих водо-водяных реакторов // Технико-экономическая оценка (исследование – ТЭИ) Проекта. – 2017. – 41 с.
3. Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива / В.Г. Баранов и др. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 1. – С. 36–40.