

УДК 53.05

**ЧИСЛЕННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОЯТ ВВЭР-1200:
МОДЕЛИРОВАНИЕ В MCNP6.2, WIMS-D5B, SOURCES-4C**

Д.Г. Веретенников

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: dgv3@tpu.ru

**NUMERICAL SPECTROMETRY OF NEUTRON RADIATION OF VVER-1200 SNF: SIMULATION
IN MCNP6.2, WIMS-D5B, SOURCES-4C**

D.G. Veretennikov

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., Ph.D. S.V. Bedenko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: dgv3@tpu.ru

***Abstract.** One of the ways to improve the properties of the reactor core is the use of modified fuel. In this study, it was found that the use of elements of low and medium atomic mass as alloying additives is inappropriate, since they are targeted for the (α , n)-reaction, reduce the uranium content of fuel pellets and complicate the technological process of their manufacture. The $UO_2+Gd_2O_3$ fuel has a low thermal conductivity, alternative burnable absorbers are being sought. It was found that the most optimal composition of the modified fuel for VVER-1200 is $UO_2+0.2$ at.% AmO_2 . Such fuel is placed in fuel elements without changing the enrichment, AmO_2 does not worsen the thermal conductivity of the fuel. The performed neutron-physical calculation using WIMS-D5B and MCNP6.2 confirms the efficiency of using AmO_2 as a burnable absorber. The results of calculating the activity using MCNP6.2 and the neutron component of the SNF radiation characteristics using Sources-4C show that the dose rate when using fuel with AmO_2 remains within acceptable limits.*

Введение. В реакторах типа ВВЭР в качестве топлива используется UO_2 с обогащением по U^{235} от 3 до 5 %. Основными проблемами применения UO_2 является его сравнительно низкая радиационная и термическая стойкость, ограничивающая производительность и безопасность реактора.

Практическое применение получило модифицированное топливо $UO_2 + 5-8$ масс. % Gd_2O_3 . Проводятся исследования свойств активной зоны, содержащей топливо с AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя [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, при добавлении в топливо Ве улучшается его теплопроводность [2]. При введении микродобавок, содержащих Al и Si, увеличиваются размеры зерна плотноспечённого UO_2 и тем самым повышается механическая прочность топливной композиции [3, 4].

Очевидно, что перечисленные элементы обладают рядом преимуществ при их использовании в качестве легирующих добавок, однако некоторые из них являются целевыми для (α, n) -реакции и поэтому могут существенно осложнить радиационную обстановку на стадиях открытого и закрытого ЯТЦ. Кроме того, используемое на практике топливо с Gd_2O_3 имеет сниженное на 20 % значение теплопроводности [4], поэтому ведутся поиски альтернативных 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.

Экспериментальная часть. Расчёты выходов и спектров (α, n) -нейтронов из элементов малой и средней атомной массы выполнены по 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 и соответствует средневзвешенной энергии спектра α -частиц ОЯТ реактора ВВЭР-1200 с выгоранием ~ 60 МВт·сут/т(U), выдержкой от года и удельной активностью $2,58 \cdot 10^{15}$ Бк/ТВС. Диапазон рассматриваемых энергий нейтронов обозначен от 0 до 12 МэВ и разделен на 48 равнозначных моноэнергетических групп.

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

Расчёт нейтронной компоненты излучения ОЯТ выполнен по Sources-4C с использованием гомогенной модели. В данном случае источниками альфа-излучения и нейтронов в результате спонтанного деления являются тяжелые изотопы, составляющие топливо. Материалом мишени являются изотопы O^{17} и O^{18} , являющиеся целевыми для (α, n) -реакции. По полученным данным о нейтронных спектрах рассчитана мощность эквивалентной дозы согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 года.

Состав, активность и источник α -частиц ОЯТ получен по MCNP6.2 и данным авторов [1]. Нейтронно-физический расчёт, расчёт изотопного состава, активности и выдержки ОЯТ выполнены по WIMS-D5B и MCNP6.2 для штатной ТВС ВВЭР-1200 и ТВС, содержащей AmO_2 . Расчётная модель WIMS-D5B представляет собой элементарную ячейку упрощенной геометрии ТВС ВВЭР-1200, где реальные шестигранные ячейки заменяются на эквивалентные им цилиндрические.

Результаты. На рисунке 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.

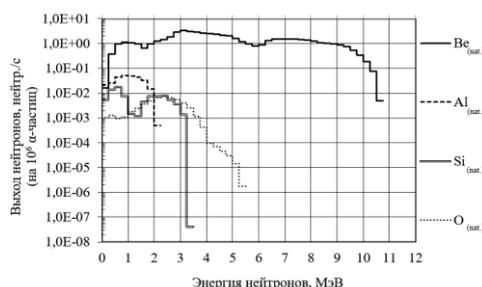


Рис. 1. Нейтронные спектры целевых для (α, n) -реакции элементов

В таблице 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 рисунка 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 | $^{29,30}\text{Si}$ | $^{17,18}\text{O}$ (UO_2) | ^{244}Cm |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Y_n , нейтр./с | $1,308 \cdot 10^9$ | $6,490 \cdot 10^6$ | $1,922 \cdot 10^6$ | $3,315 \cdot 10^5$ | $5,773 \cdot 10^6$ |
| $E_{\text{ср}}$, 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. Расчёт мощности эквивалентной дозы ($H_{T,R}$) нейтронного излучения ОЯТ после 7 лет выдержки показывает, что при использовании топлива из UO_2 $H_{T,R} = 114,5$ мЗв/(ч·ТВС), при введении 0,2 % AmO_2 $H_{T,R}$ увеличивается до 296,1 мЗв/(ч·ТВС).

Заключение. Анализ результатов, представленных на рисунке 1 и таблице 1, показывает наличие значительного выхода (α , n)-нейтронов для ^9Be , ^{27}Al , $^{29,30}\text{Si}$ в сравнении с $^{17,18}\text{O}$ в составе UO_2 . Выход и (α , n)-спектр ^9Be также выше выхода и спектра 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 в UO_2 . Так как Am является более слабым поглотителем по сравнению с Gd, 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 расчета активности и нейтронной составляющей радиационных характеристик ОЯТ показывают, что дозовая нагрузка при использовании топлива с AmO_2 сохраняется в допустимых пределах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shelley A., Ovi M.H. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 2454-2463.
2. Савченко А.М. Техничко-экономическая оценка (исследование - ТЭИ) Проекта: «Перспективные научно-технические разработки материалов и технологий безопасных твэлов коммерческих водородных реакторов». – 2017. – 41 с.
3. Панов В.С., Лопатин В.Ю., Мякишева О.В. Оценка использования модифицирующих добавок для повышения производительности ядерного топлива в реакторе // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – Т. 21, № 2(71). – С. 48-59.
4. Баранов В.Г. [и др.] Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 1. – С. 36-40.