

Возможность исследования $(U+Sm+Pu)N$ топлива в реакторе на быстрых нейтронах

Д.Е. Ширкова,* Т.С. Дикова, А.М. Терехова
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ,
факультет ядерной физики и технологий
Россия, 249030, г. Обнинск

(Поступила в редакцию 01.06.2023; подписана в печать 02.10.2023)

Основной проблемой рассматриваемой в данной работе является проблема переработки Отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Минорные актиниды вносящие основной вклад в радиоактивность ОЯТ представляют из себя большую опасность в долгосрочной перспективе. В качестве одного из возможных решений данной проблемы предлагается выжигание минорных актинидов, путем добавления их к топливу реактора на быстрых нейтронах. Основным объектом настоящего исследования является активная зона реактора на быстрых нейтронах. В качестве прототипа был выбран реактор на быстрых нейтронах РБЕЦ. Целью работы стало исследование эффективности использования Кюрия в качестве фракции к топливу реактора РБЕЦ. В ходе исследования была разработана гетерогенная расчетная модель активной зоны реактора РБЕЦ с кюрием в качестве фракций к топливу, а также произведен расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны. Данные расчеты были произведены с использованием программного комплекса «Serpent». В результате исследования были рассчитаны нейтронно-физические характеристики активной зоны с модифицированным топливом, а также произведено сравнение с нейтронно-физическими характеристиками, полученными для стандартного уран-плутониевого топлива.

PACS: 28.41.-i УДК: 621.039.54

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, активная зона реактора, радиоактивные отходы, отработавшее топливо, минорные актиниды, кюрий, трансмутация, фракции к топливу, РБЕЦ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема переработки отработавшего ядерного топлива является определяющей в дальнейшем развитии ядерной энергетики.

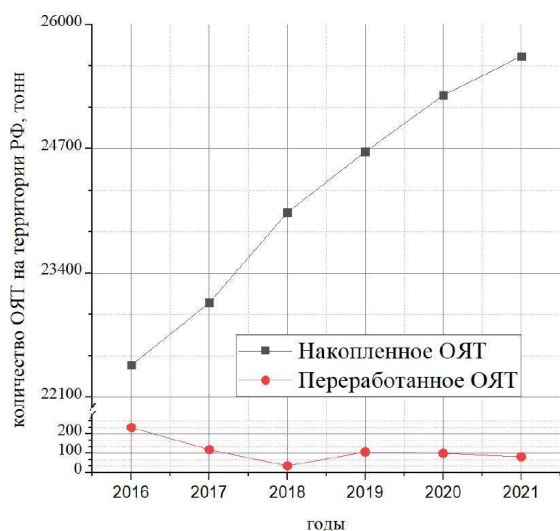


Рис. 1. Зависимость количества ОЯТ от времени на территории РФ

Это обусловлено тем, что практически во всех странах, развивающих атомную промышленность, на дан-

ный момент накоплено достаточное количество отработавшего ядерного топлива, в том числе на территории Российской Федерации (РФ) (см. рис. 1) [1, 2].

Минорные актиниды в свою очередь вносят основной вклад в радиоактивность отработавшего ядерного топлива. Кюрий является последним элементом в ряду малых актинидов и большинство его изотопов получают в ходе работы ядерных реакторов. Изотопы кюрия являются альфа-излучающими радионуклидами. $Sm-244$ обладает большой вероятностью испускания спонтанных нейтронов и вносит основной вклад в формирование активности в отработавшем ядерном топливе. Следовательно, было бы уместно разработать наиболее эффективные способы его выжигания в существующих на данный момент промышленных реакторах.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

1.1. Вычислительные методы

Все нейтронно-физические расчеты выполнены в программном комплексе «Serpent». В качестве расчетной модели рассматривалась активная зона реактора РБЕЦ. Реактор РБЕЦ был разработан НИЦ Курчатовский институт в 2000 г.

Основной особенностью данного программного комплекса, является удобная механика реализации как 2D, так и 3D геометрий не только топливных элементов, но и моделей активных зон [3]. «Serpent» использует CSG модель геометрии, которая состоит из материала ячеек и определяется произвольным типом

* shirkovade21@oiate.ru

поверхности. Код также имеет дополнительные геометрии, которые можно использовать для проектирования топлива [4, 5].

В реакторе РБЕЦ используют активную зону РБЕЦ-М. Геометрия активной зоны РБЕЦ-М включает в себя 12 физических зон с отличающимися друг от друга материалами и температурам (см. рис.2).

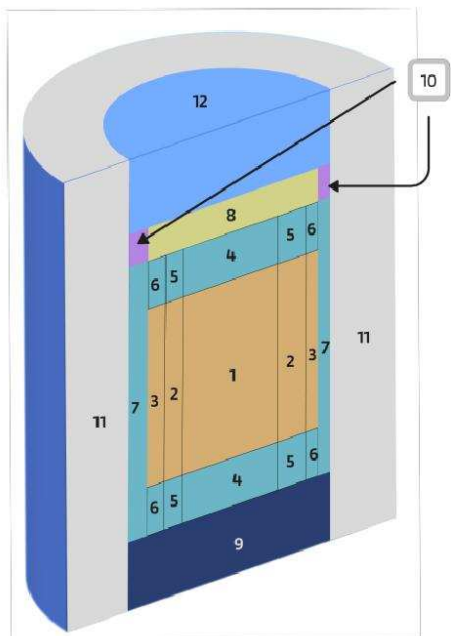


Рис. 2. Схематическое изображение геометрии активной зоны реактора. РБЕЦ: (1-3) — 3 активные зоны, (4-6) — зоны воспроизводства, 7 — боковая зона воспроизводства, 8 — концевики ТВС, 9 — газосборник тепловыделяющего элемента, 10 — концевики вертикального отражателя, 11 — корпус, 12 — крышка

Время на перегрузку в ходе расчетов не учитывалось, а мощность активной зоны считалась постоянной за время облучения. Конструкционным материалом является сталь (С, Si, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Nb, Mo, W).

1.2. Расчетная модель

Топливный цикл реактора РБЕЦ длится 4 года. Для расчета было использовано стандартное (U+Pu)N топливо, которое довольно часто рассматривается в качестве топлива для быстрых реакторов. Нитрид плутония возможно растворять в нитриде урана при любых соотношениях, но для топлива быстрых ядерных реакторов считается идеальным состав близкий к соотношениям: UN — 0.8 и PuN — 0.2. Выбор реактора на быстрых нейтронах в данной работе был мотивирован рядом причин подробно рассмотренных в ряде работ [6–8]

Основой выбора нитридного топлива для данной расчетной модели в свою очередь послужил не только

факт того, что данное топливо является стандартной для данного реактора, но еще и ряд свойств нитридного топлива, которые делают его использование, в качестве топлива для быстрых реакторов крайне перспективным (например, данный вид топлива хорошо совместимо с нержавеющей стали, а также слабее распухает в ходе топливной кампании).

Также (U+Pu+Cm)N и (U+Cm)N топлива. Были рассчитаны доли, при которых возможна работа реактора. Для (U+Pu+Cm)N они составили: UN — 0.7; PuN — 0.1 и CmN — 0.15. Для (U+Cm)N топлива доли составили: UN — 0.98; и CmN — 0.02. Как можно заметить доля Cm в топливе (U+Pu+Cm)N выше, чем в (U+Cm)N. Время на перегрузку в ходе расчетов не учитывалось, а мощность активной зоны считалась постоянной за время облучения. В быстрых реакторах используется (U+Pu)N топливо.

Горизонтальный разрез расчетной модели активной зоны реактора РБЕЦ (см. рис. 3.)

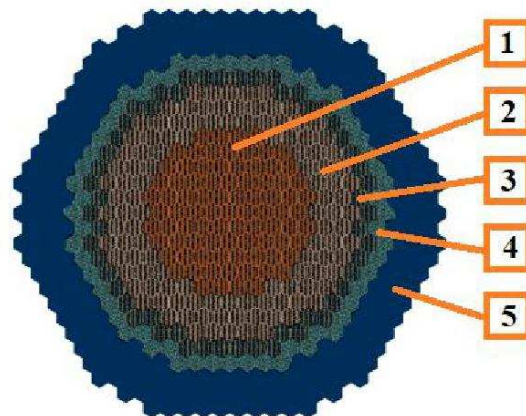


Рис. 3. Активная зона реактора РБЕЦ-М: 1 — активная зона-1, 2 — активная зона-2, 3 — активная зона-3, 4 — отражатель, 5 — корпус

Ряд решений для реализации проекта реактора РБЕЦ был взят при анализе проекта реактора БН-1200М. Температура топлива принималась равной 1200, 1100 и 1000 соответственно для активной зоны-1, активной зоны-2 и активной зоны-3.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 4 представлено изменение эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для (U+Pu)N, (U+Pu+Cm)N и (U+Cm)N топлив

Из рис. 4 можно сделать вывод, что коэффициент размножения снижается практически равномерно для (U+Pu)N топлива, пока не достигнет единицы. Ниже единицы коэффициент становится через пять лет после начала топливной кампании.

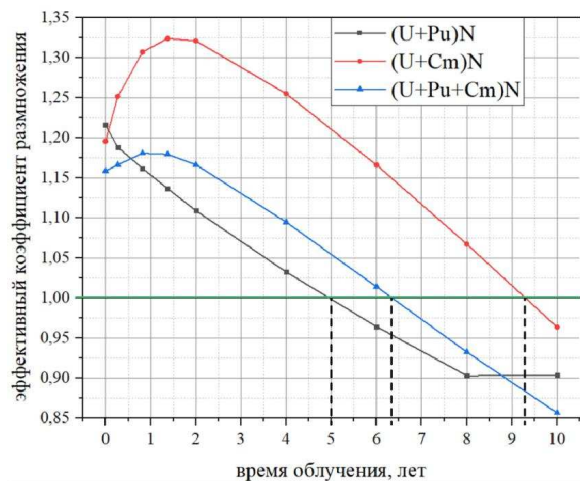


Рис. 4. Сравнение зависимостей эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для (U+Pu)N, (U+Pu+Cm)N и (U+Cm)N топлив

В начале топливной кампании для топлив (U+Pu+Cm)N и (U+Cm)N коэффициент размножения нейтронов растет и достигает своего максимального значения примерно через 500 суток после начала топливной кампании. Данный эффект в начале топливной кампании связан с тем что топливо включает в себя не только изотопы Cm, но также изотопы, нарабатываемые в ходе кампании [9].

Можно отметить что коэффициент размножения нейтронов для топлив (U+Pu+Cm)N и (U+Cm)N становится ниже единицы значительно позднее чем у стандартного топлива, что ведет к удлинению топливной кампании. Зависимость коэффициента размножения для (U+Pu+Cm)N топлива ведет себя сходным образом с зависимостью для (U+Cm)N топлива. Однако график более гладкий и скачек коэффициента размножения ниже. Удлинение топливной кампании происходит аналогично (U+Cm)N топливу, но, как и в случае с коэффициентом реактивности эффект значительно ниже.

На рис. 5 представлен сравнительный график коэффициентов размножения для (U+Cm+Pu)N и (U+Cm+Pu+Zr)N. Стоит заранее отметить, что эффективный коэффициент размножения на начало кампании для (U+Cm+Pu)N составляет 1.159 ± 0.00032 , а для (U+Cm+Pu+Zr)N соответственно 1.151 ± 0.00031 .

Следует отметить незначительное уменьшение топ-

ливной кампании. Скорость уменьшения коэффициента размножения для топлива с добавкой нитрида циркония выше. Добавление нитрида циркония к модифицированному топливу не ведет к существенному изменению конечных концентраций изотопов минорных актинидов, плутония и урана на конец топливной кампании.

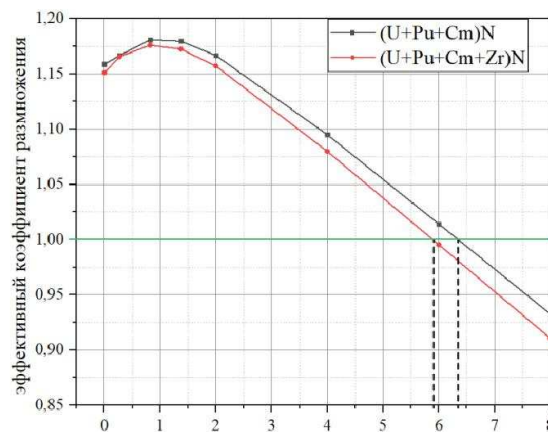


Рис. 5. Сравнение зависимостей эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для (U+Pu+Cm)N и (U+Cm+Pu+Zr)N топлив

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коэффициент размножения нейтронов показывает, что (U+Pu+Cm)N, (U+Pu+Cm+Zr)N, (U+Cm)N виды топлива пригодны для использования. Однако ввиду роста коэффициента размножения нейтронов в первые несколько лет работы реактора данная особенность топлива требует дополнительного изучения.

Анализ расчетных данных показал, что уран-кюриеое топливо демонстрирует лучшую делящую способность, в сравнении с уран-плутониевым топливом. Уран-кюриеое топливо способствует выгоранию малых актинидов и не способствует наработке кюрия и других актинидов таких как Am, Np.

Рассмотренное топливо (U+Pu+Cm)N позволяет облегчить управление реактором и увеличить долю загружаемого в топливо минорного актинида. Тем не менее для стабилизации модифицированного топлива с фракциями минорных актинидов следует применять Zr [10]. Чистый нитрид кюрия, как и (Pu+Cm)N не следует применять в качестве топлива реактора РБЕЦ по соображениям безопасности.

[1] Performance of State Atomic Energy Corporation Rosatom in 2018 // Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go_eng/go_rosatom_eng_2018/go_eng_2018.pdf (дата посещения 27.05.2022).

[2] Performance of State Atomic Energy Corporation

Rosatom in 2021 // Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go_eng/go_rosatom_eng_2021/rosatom_2021_eng.pdf (дата посещения 27.05.2022).

[3] Третьякевич С.С., Сперанский. Ф.А., Аникин А.Ю. и

- др. Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. Использование кода PSG2/SERPENT для расчета K_{eff} уран-водографитовых систем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. **3**. 72. Обнинск, 2011.
- [4] Алексеев П.Н., Микитюк К.О., Васильев А.В. // Атомная энергия. **97**, № 2. 115. (2004).
- [5] Аникин, А.Ю., Герасимов Д.К., Курьиндин А.В. и др. Верификация программного средства PSG2/SERPENT для расчета K_{eff} уранводных систем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. № 3. 70. Обнинск, 2012.
- [6] Osaka M., Koyama S., Mitsugashira T. // Journal of Nuclear Science and Technology. (2004).
- [7] IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation (Proceedings of a Specialists Meeting, Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992), IAEA-TECDOC-693, IAEA, Vienna (1993).
- [8] Хорасанов Г.Л., Блохин А.И. // Из. вузов. Ядерная энергетика. № 3. 96. (2013).
- [9] Dikova T.S., Karazhelevskaya Y.E., Terekhova A.M. // J. of Physics: Conference Series. **1689**, N 1. 1. IOP Publishing, 2020.
- [10] Огарков А.И., Шорников Д.П., Тенишев А.В. Особенности нейтронно-физического и теплофизического расчета ядерного топлива (Zr,U)N, полученного с применением подхода окислительного конструирования // Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества: Материалы докладов IX Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Суздаль, 2022. Суздаль: Общество с ограниченной ответственностью «Буки Веди», 2022. 198–199 с.

The possibility of investigating (U+Cm+Pu)N fuel in a fast reactor

D.E. Shirkova^a, T.S. Dikova, A.M. Terehova

Obninsk institute for nuclear power engineering (OINPE), Department of Nuclear Physics and Technology
Obninsk, 249030, Russia
E-mail: ^ashirkovade21@oiate.ru

The main problem considered in this paper is the problem of reprocessing spent nuclear fuel (SNF). The minor actinides, which are the main contributors to the radioactivity of spent nuclear fuel, pose a great danger in the long term. One possible solution to this problem is to burn off the minor actinides by adding them to the fast-neutron reactor fuel. The main object of this study is the core of a fast reactor. The RBEC fast-neutron reactor was chosen as the prototype. The purpose of the work was to investigate the efficiency of using curium as a fraction to fuel the RBEC reactor. In the course of the study, a heterogeneous calculation model of the RBEC reactor core with curium as a fuel fraction was developed, and the neutron-physical characteristics of the core were calculated. These calculations were performed using the "Serpent" software package. As a result of the study, the neutron-physical characteristics of the core with modified fuel were calculated, and a comparison was made with the neutron-physical characteristics obtained for standard uranium-plutonium fuel. PACS: 28.41.-i

Keywords: fast reactor, reactor core, radioactive waste, spent nuclear fuel, minor actinides, curium, transmutation, fractions to the fuel, RBEC.

Received 01 June 2023.

Сведения об авторах

1. Ширкова Д.Е. — студентка ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: shirkovade21@oiate.ru.
2. Дикова Татьяна Сергеевна — студентка ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: dikovats@oiate.ru.
3. Терехова Анна Михайловна — ст. преподаватель ИАТЭ НИЯУ МИФИ, e-mail: anna_terehova@inbox.ru.