

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ОБ-0311

Усанов В. И., Хныкина Е. С.

**ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ
И РАЗРАБОТКАМ ТЕХНОЛОГИЙ МНОГОКРАТНОГО РЕЦИКЛА
ПЛУТОНИЯ В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ**

Обнинск – 2024

Усанов В.И., Хныкина Е.С. *

** Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ*

Обзор зарубежных материалов по исследованиям и разработкам технологий многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах

Обзор ФЭИ-0311, Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024, 28 с.

Ключевые слова: отработавшее топливо, хранение отработавшего топлива, переработка отработавшего топлива, замкнутый топливный цикл.

В работе представлен обзорный материал по зарубежным технологиям и разработкам в области замыкания топливного цикла в тепловых ядерных реакторах. Замыкание топливного цикла в тепловых ядерных реакторах представляет собой важную задачу для повышения эффективности использования ядерного топлива и уменьшения вредного воздействия ядерных отходов. В последние десятилетия многие страны активно занимаются исследованием и разработкой новых технологий, направленных на оптимизацию топливного цикла, включая его замыкание, что может значительно повлиять на устойчивость ядерной энергетики в будущем.

In this work, an overview of foreign technologies and developments in the field of closed fuel cycle management in thermal nuclear reactors is presented. The closure of the fuel cycle in thermal nuclear reactors represents an important task for increasing the efficiency of nuclear fuel usage and reducing the harmful impact of nuclear waste. In recent decades, many countries have been actively engaged in researching and developing new technologies aimed at optimizing the fuel cycle, including its closure, which could significantly influence the sustainability of nuclear energy in the future.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. Мотивация и история развития технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах	6
2. Современное состояние программ реализации рецикла плутония за рубежом	7
2.1 Реализация частично замкнутого цикла во Франции	7
2.2 Реализация частично замкнутого цикла в Японии	8
3 Исследования по технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах	9
3.1 Текущая ситуация с ядерным топливным циклом во Франции	9
3.2 Необходимость замкнутого топливного цикла в долгосрочной перспективе	13
3.3 Многократная переработка плутония в реакторах PWR (EPR).....	16
3.4 Перспективный замкнутый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах	21
4. Потенциал ядерно-энергетического комплекса России по выходу на лидирующие позиции в использовании МОКС топлива в реакторах на тепловых нейтронах	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС	– атомная электростанция
БН	– реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
МА	– минорные актиниды
МОКС-топливо	– ядерное топливо из смеси оксидов плутония и обедненного урана
ОЯТ	– отработавшее (облученное) ядерное топливо
ТВС	– тепловыделяющая сборка
ЯЭ	– ядерная энергетика
ЯЭС	– ядерная энергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение уран-плутониевого топлива в ядерный топливный цикл позволяет существенно расширить ресурс топлива ядерной энергетики и избежать окончательного удаления плутония в глубокие геологические формации, где он будет тысячи лет представлять основную экологическую опасность ядерных отходов. Длительное время стратегии стран, ориентировавшихся на замыкание ядерного топливного цикла (ЯТЦ) по плутонию, были близки, однако запрет на переработку ядерного топлива в 1977 году Президентом США Джимми Картером, поддержанный последующими администрациями, привел к потере общей стратегии замыкания ЯТЦ и существенным образом повлиял на подходы к утилизации плутония. Россия, Китай и Индия сохраняют линию на развитие быстрых реакторов как системообразующую составляющую дальнейшего развития замкнутого ЯТЦ. Однако ряд стран — бывших лидеров развития быстрых натриевых реакторов: Великобритания, Германия — фактически отказались от развития этой технологии в обозримом будущем, другие: Франция, США, Япония, Республика Корея — отложили реализацию программ по быстрым реакторам на длительное время. Вместе с тем Франция, обладающая большим реакторным флотом и промышленным комплексом по переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и изготовлению смешанного уран-плутониевого оксидного (МОКС) топлива, потеряв возможность использования быстрых реакторов в среднесрочной перспективе, не отказалась от курса на утилизацию плутония и продолжила его реализацию в легководных реакторах страны и стран Евросоюза. В Японии также утилизируется плутоний в реакторах на тепловых нейтронах, лицензированных под загрузку МОКС-топлива, и это направление, вероятно, приобретет более значительный масштаб с вводом в эксплуатацию завода по переработке ОЯТ Rokkasho.

Фундаментом развития ядерной энергетики в России является двухкомпонентная ядерная энергетическая система (ЯЭС) с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ЯТЦ [1]. Доля реакторов ВВЭР в долгосрочных сценариях наращивания ядерных мощностей с учетом планов по сооружению этих реакторов за рубежом весьма значительна. Принимая во внимание время жизни современных ВВЭР (60 и более лет), можно заключить, что, если не обеспечить их работу в частично или полностью замкнутом по плутонию ядерном топливном цикле, то они станут основным

потребителем урана в двухкомпонентной ЯЭС. Поэтому наряду с развертыванием быстрых реакторов существенным и в определенной мере критическим фактором взвешенной технической политики на несколько десятилетий является поиск путей модернизации проектируемых реакторов ВВЭР для использования в них выделенного из ОЯТ плутония в составе МОКС или РЕМИКС топлива [2]. Опыт разработки и использования такого топлива за рубежом является исключительно ценным для понимания проблем, определяемых физикой тепловых реакторов, и поиска их преодоления путем гармоничного сочетания технологий реакторов на тепловых и быстрых нейтронах в двухкомпонентной ЯЭС России.

1. Мотивация и история развития технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах

На заре развития ЯЭ основным фактором, определившим развитие технологии замыкания ЯТЦ по плутонию как в быстрых, так и в тепловых реакторах, являлась перспектива расширения ресурса ядерного топлива путем использования плутония, выделяемого из отработавшего топлива. Незначительные объемы разведанных запасов урана в мире к концу 1960-х гг., начавшийся быстрый рост ядерной энергетики, получивший дополнительный импульс благодаря острому нефтяному кризису 1973 года, стали причиной рассмотрения плутония в качестве основного делящегося материала (ДМ), который в перспективе обещал избавиться от нефтяной зависимости и перейти к более устойчивому энергообеспечению. Началось активное развитие мощностей по переработке ОЯТ энергетических реакторов и извлечению плутония с целью его последующего использования в топливе ядерных реакторов.

Впервые МОКС-топливо загрузили в реактор на тепловых нейтронах в 1963 году в Бельгии [3]. Коммерческое использование МОКС-топлива началось с 1980-х годов. По данным Всемирной ядерной ассоциации около 40 реакторов во Франции, Бельгии, Германии, Швейцарии и 18 в Японии имели лицензию на применение МОКС-топлива [4]. Значительная часть из них использовала такое топливо в одной трети загрузки активной зоны и планировала дальнейшее расширение этого подхода. Однако тяжелые ядерные аварии на АЭС Три Майлз Айленд и на Чернобыльской АЭС привели к существенному замедлению темпов роста ядерной энергетики, к снижению стоимости природного урана и мотивации по замене уранового

топлива на смешанное уран-плутониевое топливо. В 2008 году правительство Бельгии проинформировало МАГАТЭ о том, что страна не предполагает заключения новых контрактов на переработку ОЯТ бельгийских АЭС, и поэтому дальнейшая фабрикация МОКС-кассет на предприятиях страны производиться не будет. За рубежом осталось только две страны, применяющие и развивающие технологию частичного замыкания ЯТЦ в реакторах на тепловых нейтронах: Франция и Япония.

2. Современное состояние программ реализации рецикла плутония за рубежом

2.1 Реализация частично замкнутого цикла во Франции

Технологическим лидером развития направления использования МОКС-топлива в ядерных реакторах на тепловых нейтронах сейчас является Франция. Ранее Франция, как и Великобритания, реализовывала замкнутый ЯТЦ: были построены быстрые натриевые энергетические реакторы Phénix и Superphénix, промышленные заводы по переработке ОЯТ (UP2, UP3, UP2-800) и завод Melox по производству МОКС-топлива для PWR [4], [5]. По ряду причин Франция остановила программу развития быстрых натриевых реакторов и в настоящее время реализует частично замкнутый ЯТЦ с использованием энергетических реакторов PWR, часть из которых использует МОКС-топливо. Продолжается эксплуатация заводов UP3 и UP2-800 по переработке UO_2 ОЯТ, а также завода Melox по производству МОКС-топлива. Начаты работы по изучению возможности продления сроков эксплуатации действующих производств по фабрикации МОКС-топлива (Melox) и по переработке ОЯТ на мысе Ла Аг (La Hague) до 2060 г., а также разработка проектов новых производств, которые должны быть построены к 2060 г. на площадке в La Hague [6].

Однократный рецикл Pu в составе МОКС-топлива применяется в реакторах PWR мощностью 900 МВт(э), к концу 2020-х гг. планируется начать загрузку МОКС-топлива в реакторы PWR мощностью 1300 МВт(э), а к 2040 г. — осуществить многократный рецикл Pu в тепловых реакторах [4]—[6]. На рисунке 1 показана схема организации многократного рецикла МОКС-топлива в легководных реакторах Франции по состоянию на 2019 год [4], [5].

В настоящее время проводятся дальнейшие исследования для подтверждения безопасности реакторов с выбранными вариантами загрузки.

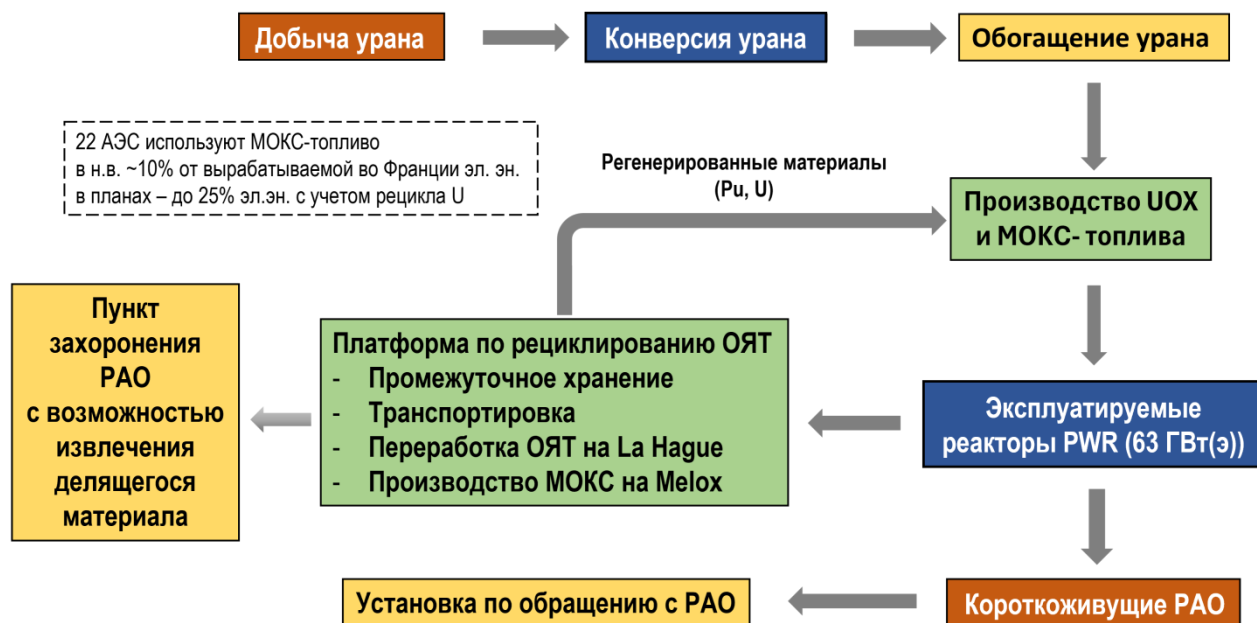


Рис. 1. Организация рецикла МОКС-топлива в реакторах Франции [4], [5]

2.2 Реализация частично замкнутого цикла в Японии

Япония не обладает природными ресурсами нефти, газа, урана, поэтому плутоний рассматривается в стране как ценный внутренний энергетический ресурс, который не надо экспортировать из-за рубежа, а замыкание ЯТЦ по плутонию является естественной стратегией развития ядерной энергетики. В значительной степени Япония следовала в фарватере западной политики в области рецикла плутония и пришла примерно к тому же состоянию на сегодняшний день. В 1960—1980-х годах в стране реализовывалась программа по замыканию ЯТЦ на основе использования плутония в топливе тепловых и быстрых реакторов. Были построены быстрый натриевый исследовательский реактор Жоуо, энергетический реактор Монжу (Monju), использующие МОКС-топливо, завод по переработке ОЯТ Токай (Tokai), лицензированы для использования МОКС-топлива реакторы PWR и BWR. В силу ряда технических и экономических причин программа создания быстрых реакторов была остановлена, перерабатывающий завод Токай закрыт, принято решение о выводе из эксплуатации остановленного в 2010 г. реактора Монжу (Monj).

Вместе с тем деятельность по использованию МОКС-топлива в реакторах на тепловых нейтронах продолжается. После аварии на Фукусиме МОКС-топливо используется только на четырёх вернувшихся в работу японских энергоблоках. Однако планируется, что к 2030 году МОКС-ТВС

будут загружаться как минимум на 12 блоках. Критическим вопросом является изготовление МОКС-топлива. Долгое время свежее МОКС-топливо для японских АЭС изготавливалось в Европе. Партии ОЯТ отработавшего уранового топлива, принадлежащего Японии, направлялись на заводы топливного цикла Великобритании и Франции для переработки и подготовки компонентов уран-плутониевого топлива. Эта практика продолжается до настоящего времени [7], хотя часть ОЯТ направляется на временное хранение в ожидании создания собственного производства по переработке ОЯТ и изготовлению МОКС-топлива на заводе в Рокасё (Rokkasho) [8]. В соответствии с планом, эксплуатация завода по переработке ОЯТ стартует в 2025 финансовом году [8], когда планируется переработать 70 тонн ОЯТ (здесь и далее — в пересчёте на металлический уран). В 2026 финансовом году производительность завода возрастёт до 170 тонн ОЯТ. В 2028 финансовом году производительность завода должна достигнуть 280 тонн ОЯТ в год, после чего продолжит возрастать. Выход на проектную отметку 800 тонн ОЯТ в год запланирован на 2031 финансовый год.

Эксплуатация МОКС-завода на площадке Рокасё начнётся в 2026 финансовом году после завершения подготовки персонала и выполнения всех необходимых испытаний, которые должны подтвердить качество и соответствие проекту технологического оборудования. Производительность МОКС-завода напрямую зависит от производительности завода по переработке ОЯТ, откуда будет поставляться плутоний для МОКС-топлива.

3 Исследования по технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах

Как следует из предыдущего раздела, безусловным лидером в разработке технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах является Франция. Ниже приведены материалы, отражающие прогресс технологии многократного рецикла плутония в реакторах на тепловых нейтронах, достигнутый в этой стране [4]—[6], [9].

3.1 Текущая ситуация с ядерным топливным циклом во Франции

Первый цикл

Ежегодно для производства около 1000 т топлива из диоксида урана (UOX) для 56 PWR французского парка реакторов извлекается, очищается и преобразуется в тетрафторид урана, а затем в гексафторид урана 8000 т природного урана. Гексафторид урана обогащается по изотопу урана-235 с

0,71 % до 3–5 % путем ультрацентрифугирования на обогатительном заводе Georges Besse II. При этом производится около 7000 тонн обедненного урана с содержанием урана-235 около 0,3 %. Таким образом, Франции доступен огромный накопленный ресурс в 320 000 тонн обедненного урана, который можно использовать как для производства МОКС-топлива, так и для возможных операций по повторному обогащению или для будущего использования в ядерных реакторах нового поколения.

Топливо UOX производится из обогащенного урана, затем облучается во французских реакторах PWR и, наконец, перерабатывается на заводах UP2-800 и UP3 Orano в Ла-Аге после определенного периода охлаждения. Эта операция позволяет Франции ежегодно перерабатывать около 940 т ОЯТ и получать около 10 т плутония, одновременно кондиционируя оставшиеся продукты деления и минорные актиниды в контейнеры из боросиликатного стекла, которые хранятся на площадке Ла-Аг для передачи на глубокое геологическое хранение CIGEO. На рисунке 2 показана упрощенная схема французского топливного цикла с однократным рециклом плутония и повторным использованием урана из ОЯТ.

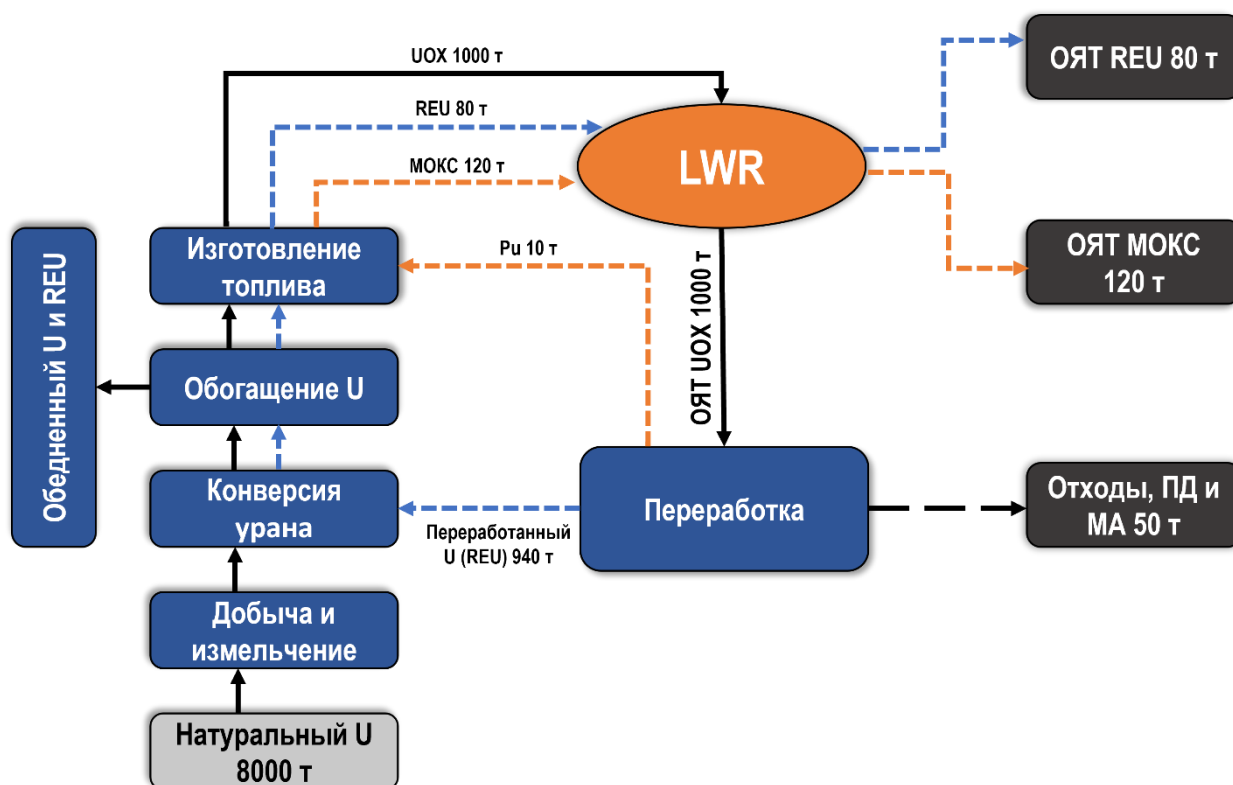


Рис. 2. Упрощенная схема французского топливного цикла с однократным рециклом плутония и повторным использованием урана из ОЯТ (RU – регенерированный уран; REU– обогатенный регенерированный уран; МОКС – смешанное оксидное топливо; ПД – продукты деления; МА – младшие актиниды)

Второй цикл

Уран, подвергнутый переработке, может быть снова обогащен и использован в четырех атомных реакторах PWR мощностью 900 МВт на АЭС Cruas. Переработка урана во Франции производилась в течение 20 лет, начиная с 1993 года. С 2013 года переработка урана была приостановлена, но в настоящее время возобновлена.

Ежегодно 10 т порошков диоксида плутония смешивают с диоксидом обедненного урана для изготовления топливных таблеток с МОКС-топливом с помощью метода порошковой металлургии на заводе Orano MELOX в Маркуле. Общий объем производства МОКС-топлива во Франции составляет 120 тонн ежегодно. В настоящее время МОКС-топливо может использоваться только в 24 реакторах французского парка реакторов мощностью 900 МВт, но в ближайшем будущем может также применяться в реакторах мощностью 1300 МВт, а в долгосрочной перспективе — в реакторах EPR2.

Отработавшее МОКС-топливо

После облучения отработавшее МОКС-топливо хранится на электростанциях на месте в бассейнах выдержки, а затем перемещается в хранилище на площадке Ла-Аг для охлаждения и возможного повторного использования.

Отработавшее МОКС-топливо содержит в среднем около 6 % ценного плутония, который может быть извлечен путем переработки. Этот процесс уже был успешно продемонстрирован. С 1992 по 2008 год во Франции на заводах Ла-Аг было переработано 73 тонны МОКС-топлива в промышленных масштабах.

Во Франции отработавшее МОКС-топливо не считается ядерными отходами, а скорее ценным делящимся материалом. Французы предполагают его повторное использование как в ближайшей, так и в долгосрочной перспективе.

Кроме того, во Французском хранилище ОЯТ также находится отработавшее топливо из регенерированного урана (80 тонн в год). В таблице приведен материальный баланс топлива при однократном рецикле плутония и в открытом топливном цикле.

Сокращение наработки плутония при осуществлении однократного рецикла происходит из-за того, что часть выделенного плутония преобразуется в продукты деления в реакторах.

**Однократный рецикл плутония в сравнении с открытым топливным циклом
(энерговыворотка 350 ТВт·ч/год)**

Характеристика	Однократный рецикл плутония	Открытый топливный цикл
Потребление природного урана	8000 т	9000 т
Экономия мощностей по хранению/ утилизации отходов	120 т отработанного МОКС + опционально 80 т отработанного повторно обогащенного урана + 360 т остеклованных отходов	1000 т отработавшего UOX
Производство плутония	7 т	10 т

Французский закон о переходе к зеленой энергетике

С целью достижения энергетической устойчивости и снижения выбросов углерода во Франции были приняты закон о переходе на зеленую энергетику и закон о климатической повестке в энергетике. Последовательные многолетние энергетические планы определяют стратегические приоритеты правительства и меры, которые необходимо принять в течение следующих 10 лет.

Последний Французский план, опубликованный в апреле 2020 года, подтвердил, что ядерная энергетика остается долгосрочным вариантом, но как часть более сбалансированного электроэнергетического баланса. Согласно этому плану, доля ядерной энергетики в электрогенерирующем балансе должна сократиться до 50 % к 2035 году, по сравнению с 62 % в 2022 году.

При этом сохраняется возможность строительства новых ядерных реакторов и подтверждается стратегия переработки и рециркуляции ядерного топлива как минимум до 2040-х годов. Стратегия замкнутого топливного цикла запланирована на более отдаленный период. Еще одной целью является увеличение производства возобновляемой энергетики до достижения 33 % в электроэнергетическом балансе к 2030 году по сравнению с 24 % в 2022 году.

10 февраля 2022 года президент Франции заявил, что в дополнение к развитию возобновляемых источников энергии будет поддерживаться и развиваться также и ядерная энергетика. Срок службы нынешних реакторов должен быть продлен, а также должна быть реализована новая программа строительства шести реакторов типа EPR2 (европейский реактор под давлением) и начаты исследования по восьми дополнительным реакторам.

Вывод из эксплуатации старых реакторов французского парка может повлечь за собой изменения в плане рецикла плутония, так как рецикл выполняется в 24 старых реакторах французской ЯЭС мощностью 900 МВт. Для поддержания текущей французской стратегии топливного цикла было запланировано использование МОКС-топлива в текущих реакторах мощностью 1300 МВт до ввода в эксплуатацию EPR2.

После 2040 года стратегические решения в рамках политики топливного цикла будут приниматься на основе проводимых в области замыкания топливного цикла НИОКР, с использованием двухэтапного подхода:

- Среднесрочная перспектива: многократная переработка плутония в реакторах LWR третьего поколения с использованием топливных сборок MOX2 с целью стабилизации запасов плутония и отработанного топлива. Первая цель — облучение тестовых топливных сборок в реакторе PWR с возможным промышленным применением к 2040 году.

- Долгосрочная перспектива: полное замыкание топливного цикла с многократной переработкой плутония в быстрых натриевых реакторах (SFR) во второй половине XXI века, что позволит Франции достичь независимости от природного урана.

3.2 Необходимость замкнутого топливного цикла в долгосрочной перспективе

На рисунке 3 показаны прогнозы добычи и спроса на природный уран до 2040 года, приведенные в «Красной книге МАГАТЭ/АЯЭ» 2020-го года по «разумной» стоимости (менее 50 долл. США/фунт U_3O_8).

Прогнозируемый спрос на уран должен покрываться существующими, планируемыми и перспективными производственными мощностями. В Красной книге указано, что для удовлетворения самого высокого прогноза спроса на ядерную электроэнергию к 2040 году потребуется потребление примерно 28 % от общего объема ресурсов по цене менее 130 \$/кг урана.

Прогнозы производства электроэнергии по пяти сценариям до 2100 года, сделанные в «Специальном докладе о глобальном потеплении климата на 1,5°C Международной группы экспертов по изменению климата», приведенные на рисунке 4, повторяющем рисунок 2.16 доклада, показывают, что спрос на электроэнергию возобновляемых источников и атомных электростанций, резко возрастет в течение 21 века.

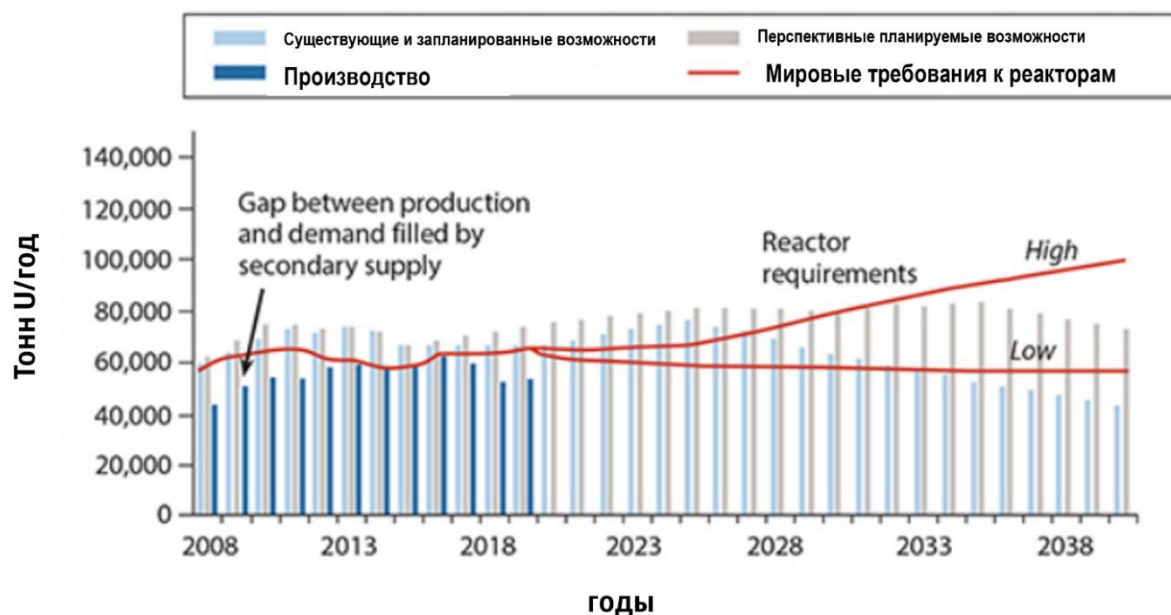


Рис. 3. Прогнозы добычи и спроса на природный уран до 2040 года (рисунок 2.10 Красной книги МАГАТЭ/АЯЭ, 2020 г.)

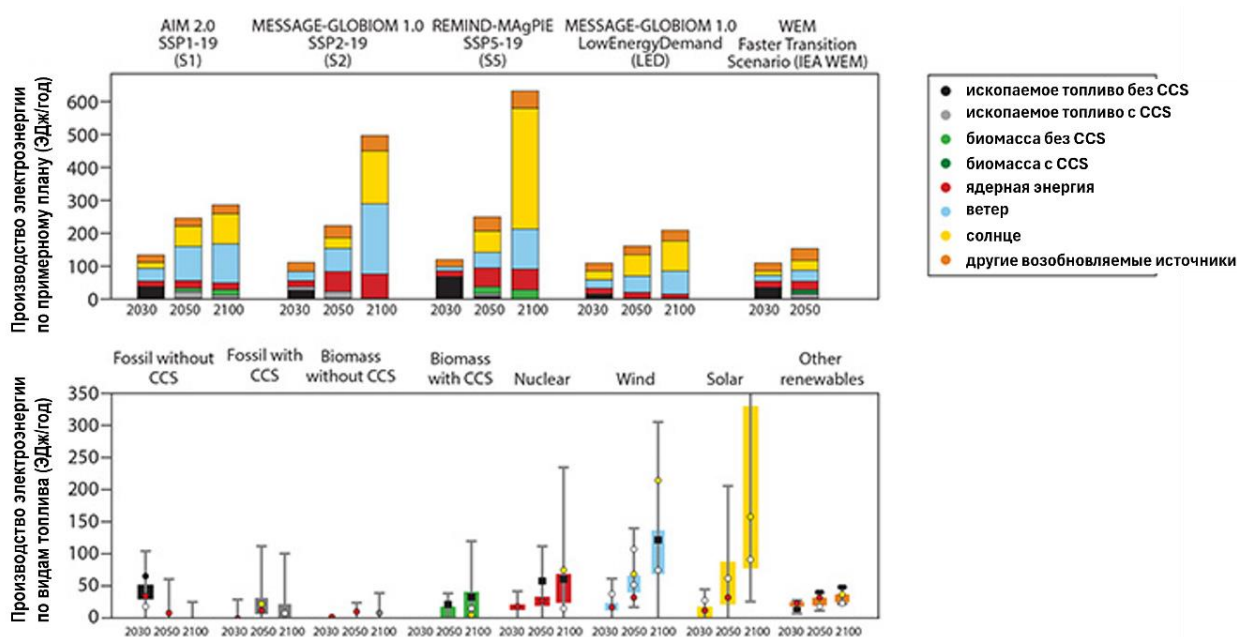


Рис. 4. Прогнозы производства электроэнергии по пяти сценариям до 2100 г. Специального доклада МГЭИК о глобальном потеплении на 1,5°C

Французские эксперты считают, что уже во второй половине века дешевые природные ресурсы урана перестанут быть доступными. Это объясняет французскую стратегию, направленную на полное замыкание топливного цикла до конца XXI века. Для осуществления замкнутого топливного цикла требуется ввод в ЯЭС Франции реакторов на быстрых нейтронах. Физическое объяснение целесообразности ввода в ЯЭС Франции реакторов на быстрых нейтронах заключается в том, что эффективность деления изотопов плутония

в быстром спектре выше, чем в тепловом спектре (рис. 5). Поэтому многократная переработка плутония в реакторах на тепловых нейтронах приводит к повышенному поглощению нейтронов и, как следствие, к увеличению производства минорных актинидов, которые практически не делятся в тепловом спектре нейтронов.

Напротив, развертывание реакторов на быстрых нейтронах (рис. 6) позволяет использовать каждый делящийся изотоп и питать парк быстрых реакторов исключительно переработанным плутонием и обедненным ураном (без потребления природного урана и без необходимости создания производств по добыче, конверсии, обогащению урана и изготовлению топлива из низко обогащенного урана).

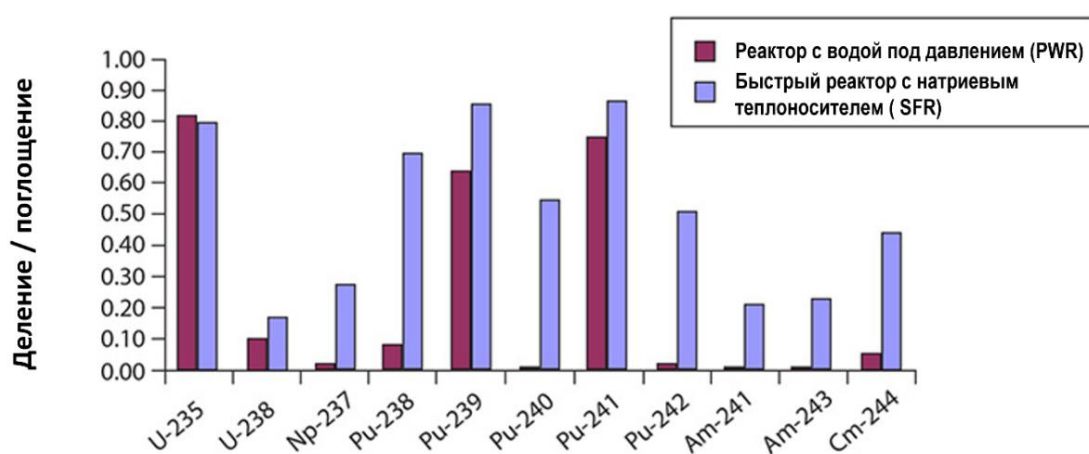


Рис. 5. Влияние спектра энергии нейтронов на отношение деления/поглощения изотопов актинидов

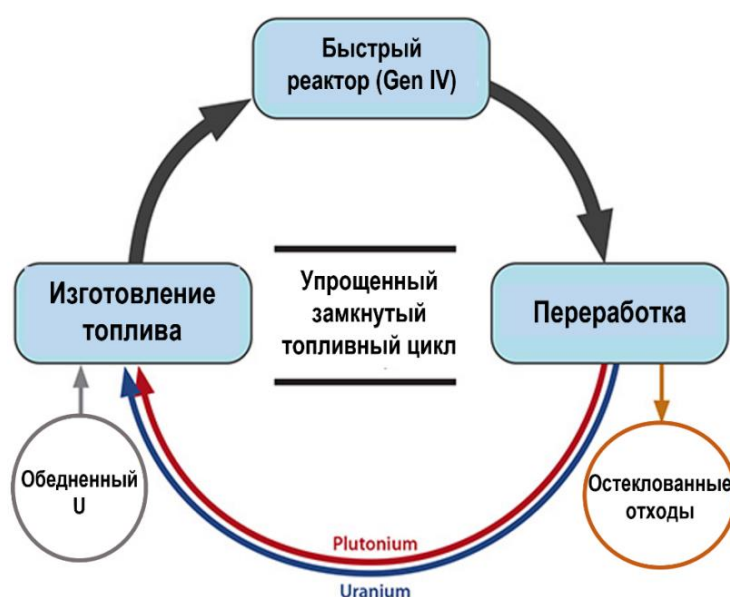


Рис. 6. Упрощенный принцип замкнутого топливного цикла, основанный на использовании реакторов на быстрых нейтронах

Таким образом, развертывание парка быстрых ядерных реакторов с использованием стратегии замкнутого топливного цикла может предоставить множество преимуществ: отсутствие необходимости в поставках природного урана и операциях на начальном этапе топливного цикла, производство плутония, отсутствие необходимости в больших хранилищах отработанного топлива и снижение производства минорных актинидов.

Тем не менее для достижения этой цели необходимо решить ряд важных технологических проблем. При постоянной эксплуатации быстрых реакторов объем производства плутония должен увеличиться в восемь-десять раз по сравнению с однократным рециклом, который в настоящее время используется во Франции.

Кроме того, необходим ввод парка быстрых реакторов, что предполагает преодоление технических и финансовых проблем и создание промышленной цепочки поставок компонентов реактора и топлива (заводы по производству и переработке МОКС-топлива БН). Поэтому, учитывая, что риск нехватки природного урана не должен возникнуть в течение нескольких десятилетий, Франция планирует использовать поэтапный подход к полному замкнутому топливному циклу.

После однократного рецикла в тепловых реакторах возможным следующим шагом, планируемым к 2040-м годам, может стать начало многократной переработки плутония в реакторах PWR путем адаптации сборок с МОКС-топливом и процессов топливного цикла к постепенно растущему количеству плутония, с низким качеством и более высокой степенью облучения.

3.3 Многократная переработка плутония в реакторах PWR (EPR)

Качество плутония с точки зрения его деления в тепловом реакторе партии зависит от доли делящихся изотопов плутония (плутоний-239, плутоний-241).

Французский плутоний из UOX-топлива обычно содержит 63 % делящихся изотопов плутония. Тогда как в отработавшем МОКС-топливе этих изотопов 53 % или меньше. Каждый новый цикл в PWR после переработки плутония также будет уменьшать количество делящегося плутония. Поэтому для поддержания заданной реактивности необходимо обязательно компенсировать выгорание делящегося плутония. Этого можно достичь, используя одну из двух концепций топлива MOX2 (рисунок 7).

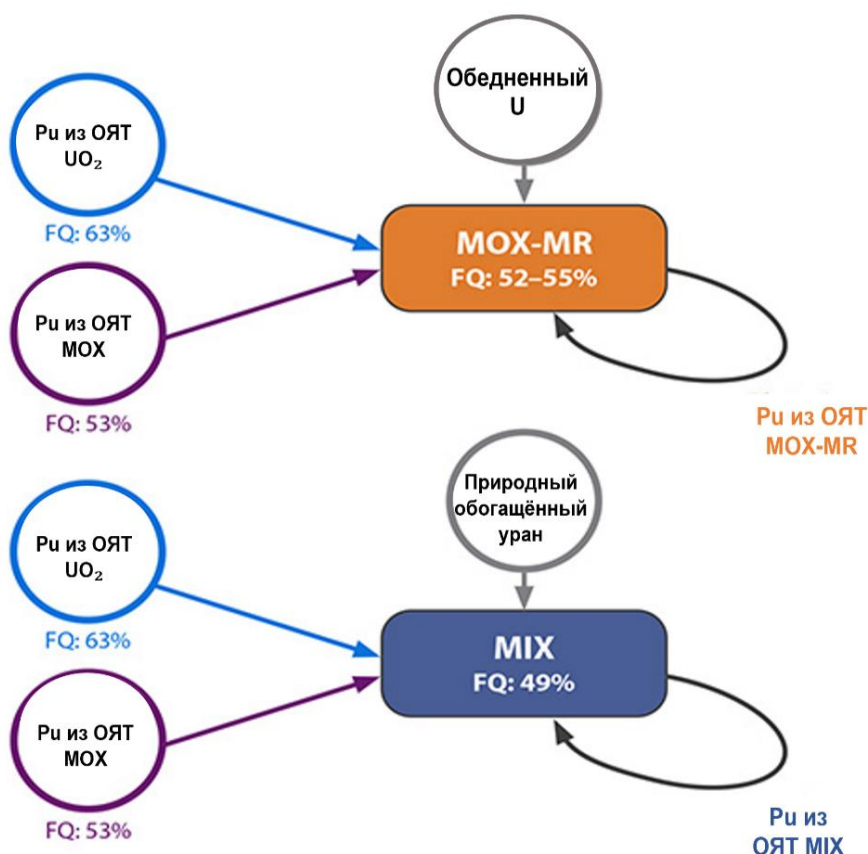


Рис. 7. Две различные концепции использования топлива MOX2 для переработки плутония в реакторах с водой под давлением (PWR)

В схеме MOX-MR предполагается смешивание партий плутония из переработанного использованного UOX-топлива, использованного однократно МОКС-топлива и небольшого количества многократно переработанного плутония, что приводит количество делящегося плутония в диапазон от 52,5 до 55%. Затем плутоний смешивается с обедненным диоксидом урана. Таким образом, сборки MOX-MR очень похожи на нынешние сборки с МОКС-топливом, используемые во Франции.

Схема MIX использует аналогичные источники для формирования партий плутония, но подразумевает получение плутония с немного более низким содержанием делящихся изотопов: в диапазоне от 53 до менее 50 %. Более низкое содержание делящегося плутония в топливе компенсируется использованием обогащенного диоксида урана вместо обедненного. Поскольку оба варианта используют поставки урана, система продолжает зависеть от операций по добыче, очистке и обогащению природного урана.

Можно достичь стационарного состояния с нулевым накоплением плутония во внешнем топливном цикле в системе тепловых реакторов, используя обогащенный оксид урана и MIX (рис. 7).

Для соблюдения ограничений безопасности в свежем топливе MIX содержание плутония не должно превышать 12 % (с запасом выбрано значение 8 %).

В отработавшем топливе UOX концентрация плутония составляет около 1 %.

В отработавшем топливе MIX среднее содержание плутония составляет примерно 6 %.

Для достижения стационарного состояния с нулевым накоплением плутония во внешнем топливном цикле необходимо, чтобы треть топлива, используемого в реакторах PWR, была топливом MIX, а две трети — топливом UOX. Это означает, что доля топлива MIX составляет примерно $y \approx 1/3$. Таким образом, для соблюдения ограничений безопасности и достижения нулевого накопления плутония во внешнем топливном цикле, необходимо использовать топливные сборки MIX в соотношении 1 : 2 с топливными сборками UOX.

Также легко сравнить количество плутония, которое производится в процессе переработки отработавшего топлива MIX ($m \text{ Pu}_{\text{MIX}} \approx 27$ тонн/год) с текущим значением однократного рецикла плутония ($m \text{ Pu}_{\text{mono}} \approx 10$ тонн/год).

Стоит отметить, что достижение стационарного состояния, при котором запасы использованного топлива и плутония не увеличиваются, приводит к значительному увеличению количества рециклируемого плутония, так как весь плутоний, извлеченный из отработанного топлива, повторно используется в ядерных реакторах, что требует более эффективных методов управления и переработки ядерных отходов.

С каждым циклом переработки среднее количество делящегося плутония немного уменьшается. В результате уменьшения делящегося плутония наблюдается увеличение изотопов с четными массовыми числами, таких как плутоний-238, плутоний-240 и плутоний-242. Эти изотопы имеют более высокое энерговыделение, что может потребовать дополнительных мер для управления тепловыделением. Четные изотопы плутония обладают более высокой радиоактивностью, что усложняет обращение с ними и хранение. Эти изотопы могут способствовать увеличению производства минорных актинидов, которые также являются высокорadioактивными и долгоживущими. В процессе распада четных изотопов плутония может увеличиваться производство гелия, что также требует учета при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов.

Все это было учтено в планах Франции по адаптации процессов топливного цикла к схеме многократной переработки. Были проведены конкретные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) для разработки и внедрения соответствующих технологий и методов управления. Для многократного рецикла Pu в составе МОКС-топлива реакторов PWR во Франции выбрана концепция топлива MOX-MR, подразумевающая полную или частичную загрузку активной зоны французских реакторов PWR топливом, содержащим Pu и обеднённый U. Концепция топлива MIX с включением Pu и обогащённого U (содержание ^{235}U от 2,7 % до 3,2 %), являющаяся аналогом отечественного РЕМИКС-топлива, признана менее перспективной, поскольку она потребовала бы проведения большего количества дополнительных НИОКР и квалификации таблеток из Pu и обогащённого U [10].

Изготовление: Разработка процесса криофрезерования

Чтобы ограничить выброс гелия и других газообразных продуктов деления Французская комиссия по альтернативным источникам энергии и атомной энергии (CEA) и Orano R&D стремятся оптимизировать размер гранул и повысить однородность $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ с помощью передовых процессов изготовления.

Процесс производства МОКС состоит из трех основных этапов: подготовка порошка (с использованием порошков диоксида плутония и диоксида урана), формовка гранул и спекание.

Оптимизация размера гранул и однородность оксида могут быть достигнуты путем адаптации либо первого этапа (подготовка порошка), либо последнего (спекание).

Первый путь, который изучили французские специалисты, заключается в изменении процесса с использованием роликовой шаровой мельницы на новый подход с использованием криофрезерования (рис. 8). Эксперименты показывают, что полное криофрезерование может:

- сократить время, необходимое для приготовления порошка;
- повысить однородность;
- привести к ряду других эксплуатационных преимуществ, таких как сокращение образования отходов.

Первоначальные результаты выглядят многообещающими — частицы порошка уменьшаются в диаметре и получаются за гораздо более короткое время с помощью криоизмельчения по сравнению с традиционным шаровым измельчением [11].

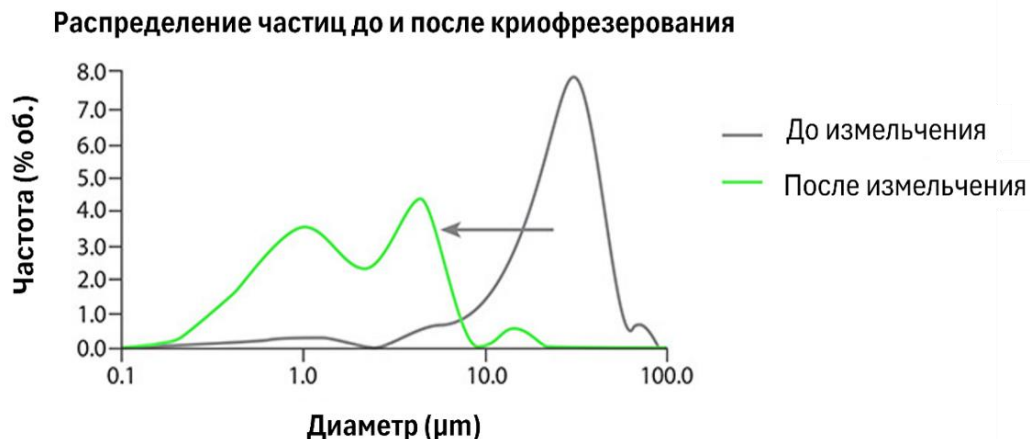


Рис. 8. Принцип процесса криофрезерования для порошков $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$

Переработка / растворение: этап волоксации

Использование более крупных гранул топлива с высоким содержанием плутония замедляет растворение отработанных топливных таблеток в азотной кислоте на этапе предварительной переработки. Это замедление также наблюдается при использовании таблеток МОКС-топлива для быстрых реакторов из-за высокого содержания плутония.

Чтобы ускорить растворение таких таблеток, CEA и ORANO исследуют метод волоксации. Этот процесс вызывает ускоренное окисление диоксида урана (UO_2) до триоксида урана (U_3O_8), что приводит к разбуханию решетки урана и фрагментации оксида. Увеличенная площадь поверхности оксида значительно ускоряет процесс растворения.

Влияние этой процедуры окисления и поведение плутония на этапе растворения в настоящее время изучается. Эти исследования могут быть полезны также для улучшения переработки топлива быстрых реакторов.

3.4 Перспективный замкнутый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах

Реакторы на быстрых нейтронах позволяют достичь более высоких значений выгорания, примерно 150 ГВт·сут./тм (против 50 ГВт·сут./тм для теплового реактора). Однако они требуют более высокого содержания плутония, обычно от 22 до 28 %.

Если предположить, что производство электроэнергии останется на текущем уровне (около 380 ТВт·ч/год), и учесть вышеуказанное повышенное значение выгорания, то это дает годовую производительность МОКС-топлива для реакторов типа SFR около 400 т/год (против 1200 т/год для нынешнего парка).

Учитывая диапазон содержания плутония, мы получаем значение годового оборота плутония на уровне примерно 90–110 т/год плутония на реакторах на быстрых нейтронах и заводах топливного цикла.

Мы приходим к выводу, что по сравнению с текущим значением однократной переработки плутония (около 10 т/г) использование плутония в замкнутом топливном цикле увеличивает объемы переработки топлива примерно в восемь-десять раз, а по сравнению с многократной переработкой MIX-топлива в реакторах ВВЭР — в три раза, что представляет собой значительную проблему.

Проблемы и цели НИОКР, связанные с замкнутым топливным циклом в быстрых реакторах, включают:

1. Большие объемы рециклируемого МОКС-топлива, подлежащие переработке. Необходимо разработать упрощенные процессы извлечения делящегося плутония из ОЯТ.

2. Повышенное содержание плутония в МОКС-топливе. Это делает процесс растворения более медленным и менее эффективным.

3. Сильно возросшие значения выгорания. Это ставит проблему обеспечения целостности материалов, используемых в реакторе. Ферритная сталь, упрочненная оксидной дисперсией (ODS), обладающая повышенной устойчивостью к разбуханию и высокотемпературной прочностью, разрабатывается в качестве инновационной оболочки ТВЭЛов.

4. Повышенное содержание продуктов деления и металлов платиновой группы в отработавшем топливе, связанное с повышенным выгоранием. Это, вероятно, потребует разработки определенных мер при обращении с высокоактивными отходами.

СЕА при поддержке партнеров Orano и EDF реализует несколько проектов НИОКР для разработки будущих процессов замкнутого топливного цикла.

Из-за ограниченной селективности и свойств молекул экстрагента трибутилфосфата, используемого в процессе PUREX, текущее разделение плутония и урана включает два этапа: начальный цикл экстракции (со специальной окислительно-восстановительной операцией для повторного извлечения плутония из органической фазы), за которым следуют два цикла очистки урана и плутония.

Использование новых высокоселективных растворителей моноамидного типа (DENiBA, DENBA и т. д.) упрощает процесс до одного цикла экстракции без окислительно-восстановительной операции. Плутоний и уран повторно извлекаются за счет снижения кислотности водной фазы (рис. 9). Этот упрощенный процесс был успешно испытан в горячих камерах Atalante в Маркуле, Франция, сначала с суррогатными растворами, а затем на реальных растворах для растворения МОКС-топлива PWR.

СЕА при поддержке Orano и EDF продолжает изучать новые молекулы для улучшения схем извлечения и коэффициентов разделения для различных элементов. Эти исследования также касаются процесса разделения в целом, включая внедрение промышленного оборудования и управление вторичными потоками в операциях скруббирования, которые удаляют продукты деградации, чтобы улучшить TRL (Technology Readiness Levels) этого процесса.

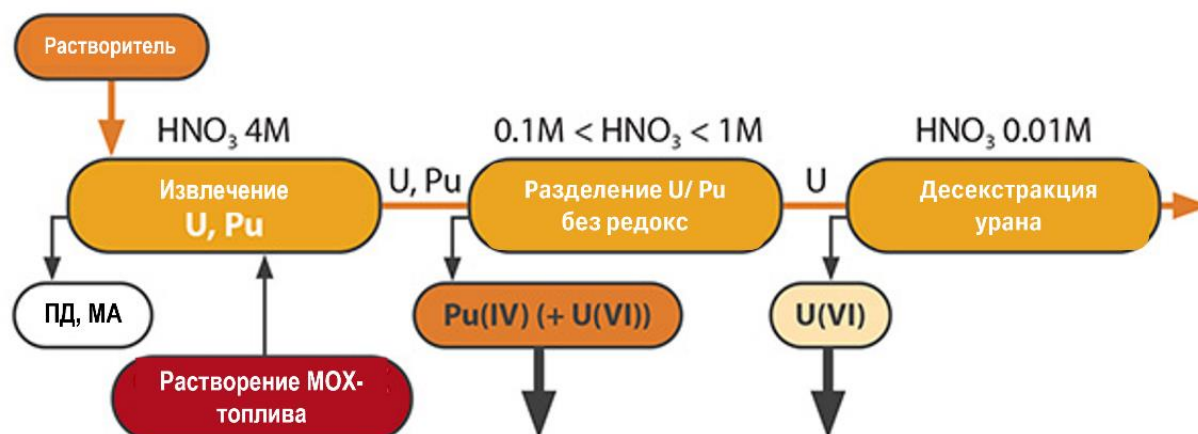


Рис. 9. Упрощенный процесс разделения на основе моноамида: один цикл без операции REDOX [12]

4. Потенциал ядерно-энергетического комплекса России по выходу на лидирующие позиции в использовании МОКС-топлива в реакторах на тепловых нейтронах

Стратегия замыкания ЯТЦ по плутонию в СССР/России долгое время была ориентирована на использования уран-плутониевого топлива в быстрых натриевых реакторах. На этом направлении достигнуты значительные успехи. В 2023 году на реакторе БН-800 завершен переход с высокообогащенного уранового топлива на смешанное оксидное (МОКС) уран-плутониевое топливо с плутонием, выделенным из ОЯТ ВВЭР. В принципиальном отношении логическая схема обеспечения быстрых натриевых реакторов топливом на основе плутония, как одна из целей создания этих реакторов, реализована. Вместе с тем предположение основоположников быстрых реакторов об их массовом строительстве для обеспечения существенной доли энергопроизводства и масштабном рецикле плутония, необходимого для кардинального сокращения потребления природного урана и накопления плутония в ОЯТ ВВЭР, не осуществилось. Начало сооружения второго реактора на быстрых нейтронах с МОКС-топливом БН-1200М на Белоярской АЭС намечено на 2027 год с ожидаемым вводом в эксплуатацию в 2034 году [13]. Серийное сооружение энергоблоков БН-1200М, может быть запущено в 2040-х годах [14]. На основе анализа имеющихся программ и планов развития быстрых реакторов с натриевым теплоносителем в странах, активно развивающих эту технологию, в первую очередь в Китае и Индии, можно ожидать, что масштабное внедрение этих реакторов также произойдет примерно в это же время. Еще в более отдаленной перспективе, вероятно не ранее третьей четверти текущего столетия, могут быть реализованы и занять значительную долю в ядерной энергетике инновационные концепции быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем, быстрые жидкосолевые реакторы и т. д.

Поиск реальных путей сокращения сроков решения проблем, связанных со снижением потребления растущего в цене природного урана и накоплением плутония, привел к развитию технологии использования МОКС-топлива в реакторах на тепловых нейтронах, составляющих сейчас почти весь парк ядерных энергетических реакторов в мире и его основную часть в обозримом будущем. Для России, расширяющей экспортные поставки тепловых реакторов с обязательствами по их обеспечению топливом и возможным возвратом уранового ОЯТ для переработки, экономия

природного урана и вовлечение выделенного плутония в топливный цикл имеют первостепенное значение. Объем российских исследований по технологиям использования плутония в реакторах на тепловых нейтронах в последнее время существенно вырос.

Для реакторных установок ВВЭР разработано уран-плутониевое РЕМИКС-топливо, которое успешно прошло полный цикл эксплуатации в виде опытных твэлов ВВЭР-1000 на Балаковской АЭС, а сейчас эксплуатируется в составе полноценных тепловыделяющих сборок [15]. В АО ГНЦ НИИАР в исследовательском реакторе МИР проходят испытания тепловыделяющих элементов типа ВВЭР с уран-плутониевым МОКС-топливом [16].

Следует отметить, что реализованные на сегодня решения по использованию плутония в реакторах на тепловых нейтронах (частичная загрузка МОКС-топливом, однократный рецикл плутония) недостаточно эффективны, чтобы мотивировать индустрию на масштабный переход на уран-плутониевое топливо. Поэтому решение задачи повышения эффективности этой технологии путем полной загрузки активной зоны МОКС-топливом и многократного рецикла плутония является одним из основных направлений исследований как в России, так и за рубежом. Во Франции эту задачу предполагается решить за счет модернизации активной зоны реактора EPR2 и улучшения качества МОКС-топлива, в частности, за счет подпитки низкообогащенным ураном. В России разрабатывается проект ВВЭР-С со спектральным регулированием, полной загрузкой активной зоны МОКС-топливом и достижением достаточно высокого КВ [2]. Однако разработка инновационного способа регулирования требует большого объема НИОКР, поэтому переход к серийному сооружению этих реакторов потребует значительного времени.

Между тем, освоенные в России технологии реакторов ВВЭР и БН и замкнутого ЯТЦ позволяют реализовать многократный рецикл плутония в достаточно короткие сроки, если развитие ядерной энергетики внутри страны и экспорт реакторов создадут для этого необходимые ресурсные, экономические и экологические (РАО) стимулы. Расчетные исследования, выполненные российскими специалистами, показали принципиальную возможность многократного рецикла плутония в реакторе ВВЭР-ТОИ с частичной загрузкой МОКС-топлива с плутонием из ОЯТ ВВЭР и зон воспроизводства БН. Этот подход также может быть применим и для разрабатываемого проекта ВВЭР средней мощности [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайшие десятилетия ожидается расширение и диверсификация использования ядерной энергии, что делает необходимым экономию ресурсов природного урана в условиях конкуренции на мировых рынках. Франция выбрала путь переработки пригодных для повторного использования расщепляющихся материалов через однократное рециклирование плутония и проведение технико-экономических исследований по многократной переработке и замыканию топливного цикла.

Многократная переработка плутония в реакторах PWR станет первым шагом на пути к полностью замкнутому циклу при включении в системы быстрых натриевых реакторов, что позволит Франции стать независимой от ресурсов природного урана. Этот путь к многократной переработке и замыканию топливного цикла до конца XXI века требует разработки новых процессов, учитывающих растущий объем плутония (от трех до десяти раз), изменение его изотопного состава, тепловой мощности и радиоактивности.

Для реализации этих разработок CEA совместно с промышленными партнерами Orano, EDF и Framatome реализуют важные научно-исследовательские программы по инновационным процессам переработки и изготовления топлива, что позволит подготовить французскую атомную промышленность к условиям будущего развития топливного цикла.

Уникальные возможности, предоставляемые российской двухкомпонентной системой ВВЭР — БН и освоенными технологиями замкнутого ЯТЦ, позволяют при продолжении работ по многократному рециклу плутония в реакторах на тепловых нейтронах в рамках кооперации российских организаций выйти на передовые рубежи в этой области. Для масштабной реализации стратегии использования уран-плутониевого топлива в реакторах на тепловых нейтронах российского дизайна как в России, так и за рубежом потребуются поисковые исследования по увеличению коэффициента воспроизводства реакторов БН. Это даст дополнительную мотивацию для дальнейшего инновационного развития натриевых быстрых реакторов в направлении их гармоничного сочетания с реакторами на тепловых нейтронах как долгосрочного мирового тренда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под редакцией Н.Н. Пономарева-Степного. — М.: Техносфера», 2016. — 160 с. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/dvuhkomponentnaya-yadernaya-systema_2016/p76/. Дата доступа 20.09.2024.

2. Семченков Ю.М., Мохов В.А., Алексеев П.Н. ВВЭР со спектральным регулированием — путь к эффективному использованию урана-238: презентация доклада на МНТК 2014, Москва, Концерн «Росэнергоатом», 21—23 мая 2014 г. Электронный ресурс: http://www.reamntk.ru/mediafiles/u/files/2014/Plenar/Semchenkov_YU.M..pdf?ysclid=m3h3k90ho618638932. Дата доступа 27.09.2024.

3. В реактор Белоярской АЭС загрузили первую крупную партию МОКС-топлива. Электронный ресурс: <https://strana-rosatom.ru/2021/02/26/v-reaktor-beloyarskoj-aes-zagruzili-pe/?ysclid=m3n075pvmu860558480>

4. Уран-плутониевое топливо: история, технико-экономические оценки, перспективные области применения. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Частное учреждение «Наука и инновации». Центр аналитических исследований и разработок. – Москва: 2024. – 128 с. Электронный ресурс: <https://naukarosatom.ru/upload/iblock/ed7/yuc6jxt351x44yj1bh5wmakn83mpyv0.pdf?ysclid=m3h48b14vb876759901>. Дата доступа 24.09.2024.

5. Cécile Evans Back-end cost methodologies: valuing flexibility and integrating risks in used fuel management: presentation IAEA Technical Meeting on Cost estimation methodologies for Spent Fuel management, Vienna, 2019. Электронный ресурс: https://nucleus.iaea.org/sites/connect/SFMpublic/TM%20on%20Cost%20Estimation%20Methodologies%20for%20Spent%20Fuel/Evans_Orano_France.pdf m3h48b14vb876759901. Дата доступа 24.09.2024.

6. Международный взгляд на обращение с ОЯТ. Ежемесячный дайджест. Подготовлено отраслевым Центром аналитических исследований и разработок (ЦАИР). Июль 2024. – 41 с.

7. Япония приняла ядерное МОКС-топливо из Франции. Электронный ресурс: <https://rossaprimavera.ru/news/1087a6d3?ysclid=m3h52ni6rd830460813>. Дата доступа 15.10.2024.

8. Японская JNFL планирует возобновление работы завода по переработке ОЯТ и производству МОКС-топлива «Рокасё». Электронный

ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/02/26/143437>. Дата доступа 15.10.2024.

9. French Nuclear Fuel Cycle. Электронный ресурс: <https://discover.lanl.gov/publications/actinide-research-quarterly/first-quarter-2024/the-french-nuclear-fuel-cycle/>. Дата доступа 15.10.2024.

10. Атомная отрасль за рубежом. Ежемесячный дайджест. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Частное учреждение «Наука и инновации». Центр аналитических исследований и разработок. – Москва: июль 2024. – 128 с. Электронный ресурс: <https://naukarosatom.ru/upload/iblock/ed7/yuc6jxt351x44yj1bh5wmakn83mpyv0.pdf?ysclid=m3h48b14vb876759901>. Дата доступа 24.09.2024.

11. Robisson M., Sorel C., et al. Cryo-milling process for MOX nuclear fuel. CEA-ORANO, GLOBAL Int. Conference, 2022.

12. C. Sorel et al., Proceedings of the GLOBAL Int. Conference 2017, 24–27 September, paper A221.

13. Строительство быстрого реактора БН-1200 на Белоярской АЭС начнётся в 2027 году. Электронный ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/01/18/142352>. Дата доступа 17.10.2024.

14. В 2040-х годах в России может быть развернуто серийное строительство быстрых реакторов БН-1200. Электронный ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/08/02/148082>. Дата доступа 17.10.2024.

15. «Росатом» завершил первый цикл эксплуатации РЕМИКС-топлива Электронный ресурс: <https://strana-rosatom.ru/2023/06/05/rosatom-zavershil-pervyj-cikl-ekspl/>. Дата доступа 19.10.2024.

16. В «Росатоме» стартовали реакторные испытания МОКС-топлива для установок типа ВВЭР. Электронный ресурс: <https://strana-rosatom.ru/2023/06/29/startovali-reaktornye-ispytaniya>. Дата доступа 19.10.2024.

17. Трапезников И.Н., Пономаренко Г.Л., Васильченко И.Н. Оценка возможности использования полной загрузки МОХ-топлива в реакторе ВВЭР-600 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2022. – вып. 4. – с. 99–106. Электронный ресурс: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-3-2022.pdf?ysclid=m3h6hk27sg37770807>. Дата доступа 21.09.2024.

Подписано к печати 28.11.2024.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1. Уч.-изд. л. 1,2.
Тираж 15 экз. Заказ № 377.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1