



ФЭИ
РОСАТОМ

Метод подобия в задаче многократного рецикла плутония в двухкомпонентной ядерной энергетической системе

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

Усанов В.И., Хныкина Е.С., Исанов К.А.

Представляет Хныкина Е.С.

Актуальность и практическая значимость работы

Проблема топливообеспечения

Обеспокоенность общественности вопросами ядерной безопасности и утилизации ОЯТ и РАО, а также низкая цена на уран привели к откладыванию на второй план проблемы топливообеспечения и низкому темпу роста ядерных мощностей.

Позитивная повестка ЯЭ сегодня

Обсуждение перспективы устойчивого развития мирового энергетического сектора, развития безуглеродной энергетики, безопасная эксплуатация ЯЭУ способствовали росту позитивного общественного мнения в отношении ЯЭ и планов ее развития.

Спрос на ядерное топливо

Цена природного урана на мировых рынках, как один из индикаторов ожиданий в отношении перспектив ввода новых ядерных мощностей с 2023 года существенно возросла.



Фундаментальное свойство 2-х компонентной ЯЭС

Расширение топливной базы ЯЭ за счет наработки и многократного использования Pu .

Возможный подход к многократному рециклу топлива

Использование Pu в тепловых реакторах в ЗЯТЦ с использованием Pu из зоны воспроизводства быстрого реактора.

Направления рецикла ядерного топлива



Использование Pu из ОЯТ ВВЭР для топлива БН с целью снижения потребления U в ЯЭС, использования энергетического потенциала Pu и снижения его накопления, является общепризнанным перспективным направлением.



Однако низкие цены на U привели к тому, что бывшие лидеры в создании реакторов на быстрых нейтронах отложили или отказались от программ по их разработке. В результате единственным вариантом повторного использования Pu стало использование МОКС-топлива в тепловых реакторах.



Нынешний рост цен на U и масштабное строительство реакторов на тепловых нейтронах в России и за рубежом свидетельствуют о целесообразности дальнейшего развития подходов по обращению с топливом и в нашей стране.

Взаимодействие двух компонент Российской ЯЭ на основе тепловых и быстрых реакторов позволяет рециклировать плутоний более эффективно, чем в странах, где использованию МОКС-топлива в реакторах на тепловых нейтронах пока нет альтернативы.

Published on Investing.com, 14/May/2024 - 6:26:19 GMT, Powered by TradingView.
Uranium Futures, United States, CME:UXXc2, D

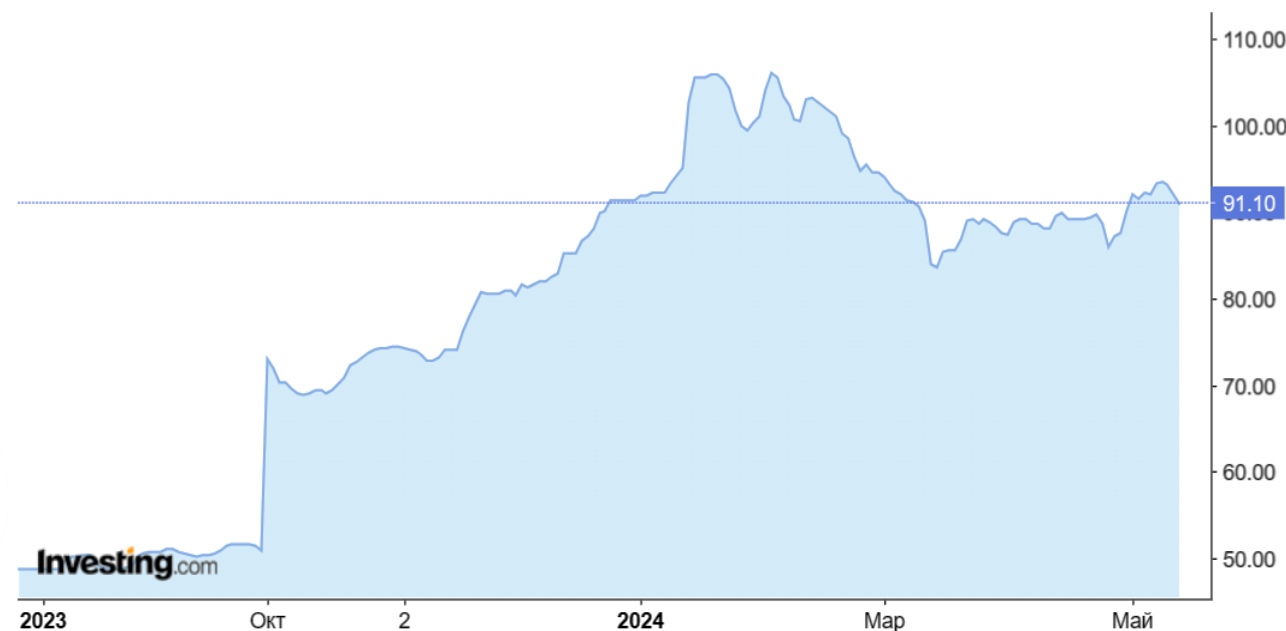


Рис. Фьючерс на уран

Частичная загрузка МОКС-топлива

Ограничения:

- Проектные ограничения, имеющие отношение к безопасности [1]:
 - 1) Снижение эффективности органов СУЗ, борной кислоты и выгорающих поглотителей;
 - 2) уменьшение эффективной доли запаздывающих нейтронов;
 - 3) увеличение количества нейтронов деления;
 - 4) повышение неравномерности энерговыделения и других эффектов;
 - 5) условие о содержании плутония в МОКС топливе менее 12% (ограничивает возможности многократного рецикла).
- Однократный цикл Pu.

Полная загрузка РЕМИКС-топлива

Основные ограничения [3]:

- 1) Снижение эффективности органов компенсации реактивности;
- 2) содержание плутония в РЕМИКС-топливе менее 5%.

В России продолжаются работы над проектами реакторов с полной загрузкой РЕМИКС-топливом.

Возможности:

- Частичная загрузка является отработанной технологией [2].
- Утилизации Pu из ОЯТ нескольких РТН с возможностью экономии природного урана.
- Превращение Pu из ВАО в составе ОЯТ в ценный источник энергии.

Многократный рецикл Pu в РТН в рамках двухкомпонентной системы может быть осуществлен путем создания условий, близких к условиям реализации первого цикла МОКС топлива

1. Le Mer J., Carzenne C., Lemasson D. France EDF Research Scenarios for Closing the Plutonium Cycle. International Conference of Fast Reactors and Related Fuel Cycles. Safe Technologies and Sustainable Scenarios FR13, 4-7 March 2013, Paris, France. Paper N IAEA-CN-199-292.

2. Physics and Fuel Performance of Reactor-Based Plutonium Disposition. AEA/NEA, Workshop Proceedings, Paris, France, 28-30 September, 1998

3. Павловичев А.М. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из смеси регенерированного урана, плутония и обогащенного урана // атомная энергия. – 2006. – Т.101. – с. 407-413.

Подход к формированию состава топлива для многократного рецикла в ЯЭС ВВЭР/БН

Варианты повторного использования Pu [1,2] предполагают реализацию схем со сложной логистикой, что с практической точки зрения представляет большие трудности для предприятий ЯТЦ и других составляющих инфраструктуры:

- Необходимость поддержания точных составов топлива при переработке ОЯТ
- Необходимость строгой последовательности изготовления топлива



Предлагаемый подход:

Корректировка изотопного состава Pu отработавшего МОКС-топлива путем смешивания Pu из зон воспроизводства БН и ОЯТ БН.

Каждая новая загрузка МОКС топлива реактора ВВЭР с откорректированным составом плутония должна обеспечивать необходимый запас реактивности и требуемые физические характеристики активной зоны до конца кампании

Метод корректировки состава плутония в МОКС топливе



ИДЕЯ МЕТОДА ПОДОБИЯ

Сохранение в формируемом топливе **состава Pu, близкого к составу первоначальной загрузки МОКС-топлива.**

Реализация этого метода с учетом изотопов урана, плутония и МА практически невыполнима из-за отсутствия способа разделения нуклидов при фабрикации МОКС-топлива

В работе рассмотрен упрощенный вариант корректировки топлива с сохранением в повторных загрузках МОКС-топлива количества делящегося Pu.

Ежегодная загрузка МОКС-топлива для ВВЭР:

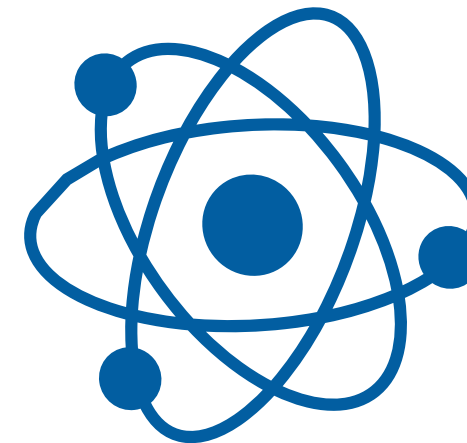
$$\left. \begin{aligned} m_{\text{(делящегося Pu)}} \text{ в МОКС}(n+1) &= m_{\text{(делящегося Pu)}} \text{ в МОКС}(n) \\ m_{\text{(всего Pu)}} \text{ в МОКС}(n+1) &= m_{\text{(всего Pu)}} \text{ в МОКС}(n) \end{aligned} \right\}$$

В работе были рассмотрены следующие источники:

- Pu высокого качества из зон воспроизводства БН
- Pu равновесного качества из а.з. БН

Тогда задача определения структуры системы, обеспечивающей многократный рецикл, сводится к решению уравнений

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{(ВВЭР с МОКС-топливом)}} * m_{\text{(выгружаемого делящегося Pu)}} \text{ МОКС}(n) + N_{\text{(БН)}} * m_{\text{(выгружаемого делящегося Pu)}} \text{ из БН} &= m_{\text{(делящегося Pu)}} \text{ в МОКС}(n+1) \\ N_{\text{(ВВЭР с МОКС-топливом)}} * m_{\text{(всего выгружаемого Pu)}} \text{ МОКС}(n) + N_{\text{(БН)}} * m_{\text{(всего выгружаемого Pu)}} \text{ из БН} &= m_{\text{(всего Pu)}} \text{ в МОКС}(n+1) \end{aligned} \right\}$$



Расчетная модель

Основные параметры	ВВЭР-1200 (UOX)	ВВЭР-1200 (МОКС)	БН-1200	
			Активная зона	Зона воспроизводства
Электрическая мощность/Тепловая мощность, МВт	1200/3000	1200/3000	1200/2800	1200/2800
Реакторная кампания, эфф. сут.	300	300	330	330
КИУМ	0,9	0,9	0,9	0,9
Количество ТВС в зоне, шт.	163	163	432	74
Количество ТВС с МОКС-топливом, шт.	0	54	432	0
Кратность перегрузок	4	4	4	8
Количество ТВС, перегружаемых ежегодно, шт.	40	14(МОКС)/26(UOX)	108	21
Топливная кампания, эфф. сут.	1200	1200	1320	2640
Глубина выгорания топлива (средняя) МВт*сут/кг	51,2	51,2	88	БЭ-14
Время выдержки + переработки, лет	5	5	5	2
Масса топлива/ масса тяжелых атомов, т	86/75	86/75	47,2/42	22,2/19,7

Расчеты выполнены с помощью программы WIMS, предназначенной для расчётов ячеек различных типов реакторов, расчёта выгорания и получения мелкогрупповых констант.

Формирование состава плутония

Пу первого цикла МОКС-топлива теплового реактора

	Пу -238	Пу -239	Пу -240	Пу -241	Пу -242
Плутоний на входе в а.з.	3%	55%	24%	12%	6%
Плутоний на выходе из а.з.	3%	46%	27%	17%	7%
Плутоний после выдержки (4 года)	4%	48%	28%	13%	7%



Пу подпитки

	Пу -238	Пу -239	Пу -240	Пу -241	Пу -242
Плутония высокого качества (Вариант 1)	1%	95%	1%	2%	1%
Плутоний равновесного состава БН (Вариант 2)	0%	68%	26%	3%	3%



Результаты корректировки Пу МОКС-топлива теплового реактора отработавшего один цикл

	Пу -238	Пу -239	Пу -240	Пу -241	Пу -242
ОЯТ МОКС + Пу высокого качества (Вариант 1)	3%	58%	23%	11%	6%
ОЯТ МОКС + Пу равновесного качества БН (Вариант 2)	2%	60%	23%	10%	5%

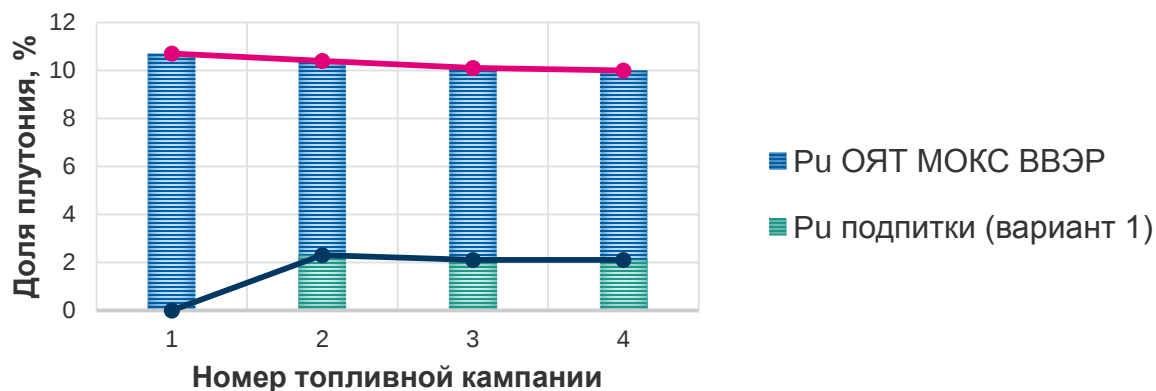
Результаты расчетов



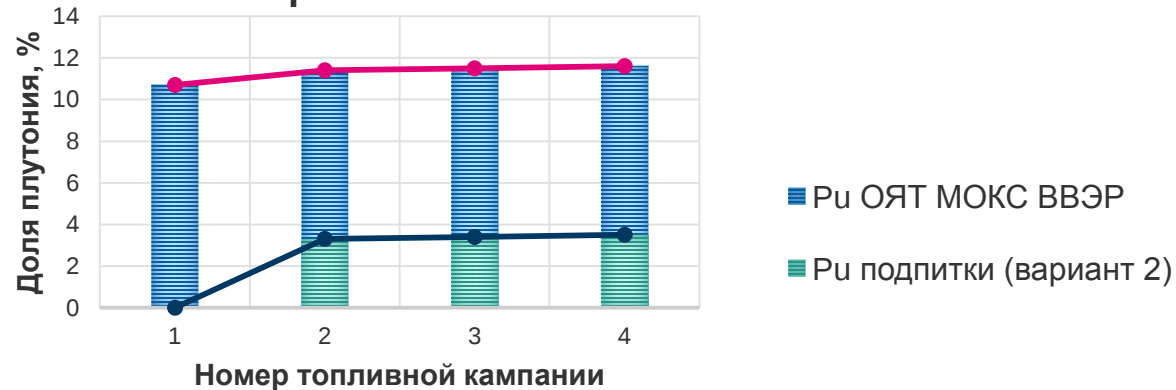
Доля Pu подпитки

Качество Pu

Pu высокого качества



Pu равновесного качества



ОЯТ МОКС + Pu высокого качества (Вариант 1)

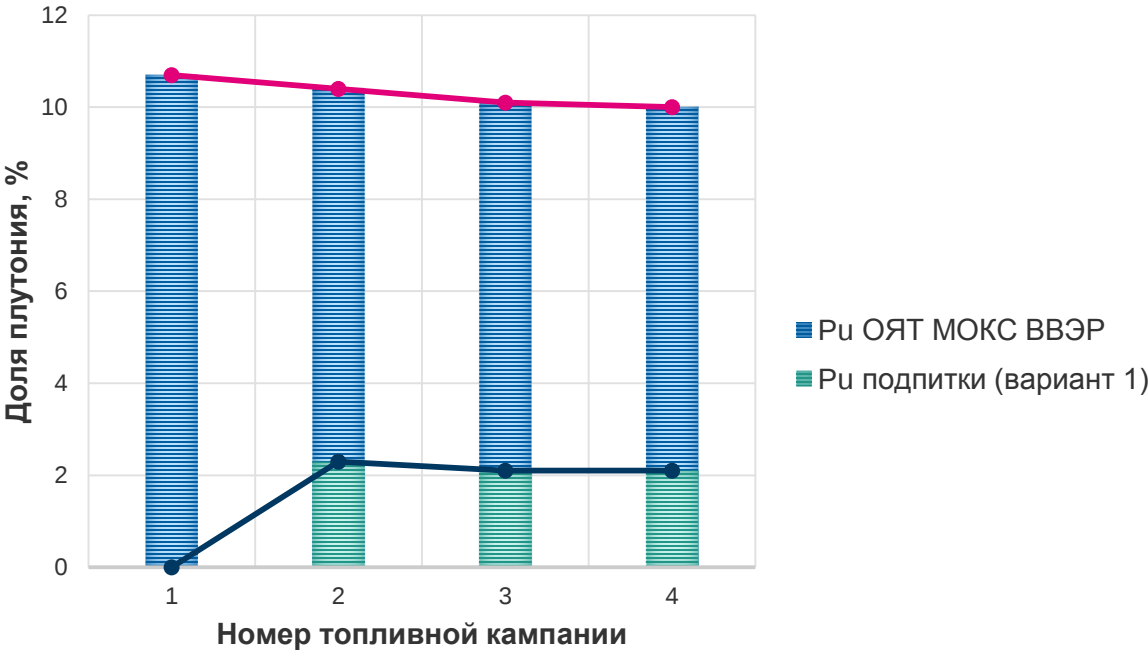
Топливо	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-241	Подпитка Pu кг
Эталонный МОКС (МОКС-1)	3%	55%	24%	12%	6%	0
ОЯТ МОКС-1 после выдержки	3%	46%	29%	14%	8%	0
МОКС после 1 корректировки	3%	58%	23%	11%	6%	139
МОКС после 2 корректировки	2%	59%	23%	10%	5%	133
МОКС после 3 корректировки	2%	60%	23%	10%	5%	133

ОЯТ МОКС + Pu равновесного качества БН (Вариант 2)

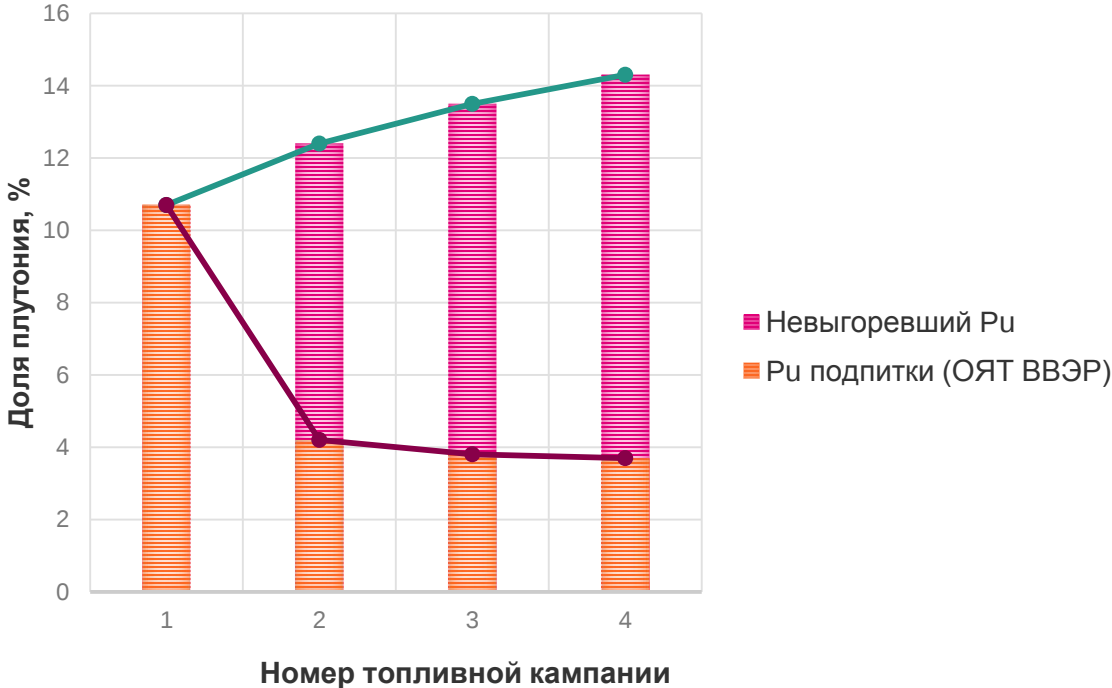
Топливо	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-241	Подпитка Pu кг
Эталонный МОКС (МОКС-1)	3%	55%	24%	12%	6%	0
ОЯТ МОКС-1 после выдержки	3%	46%	29%	14%	8%	0
МОКС после 1 корректировки	1%	61%	27%	6%	4%	370
МОКС после 2 корректировки	1%	61%	28%	7%	4%	353
МОКС после 3 корректировки	1%	60%	28%	7%	4%	342

Сравнение с результатами предыдущих работ

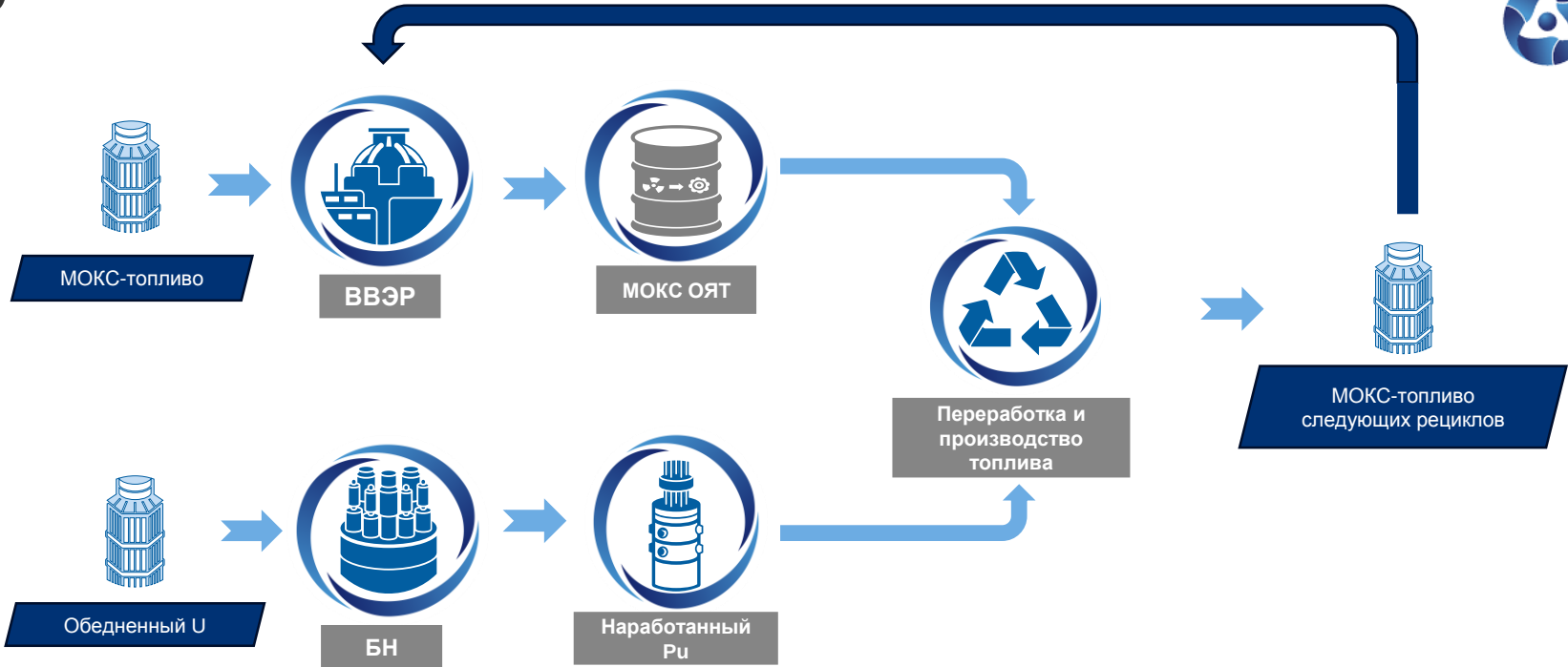
Рu высокого качества

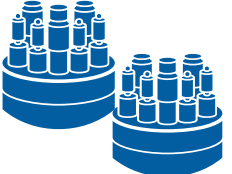


Рu ОЯТ ВВЭР



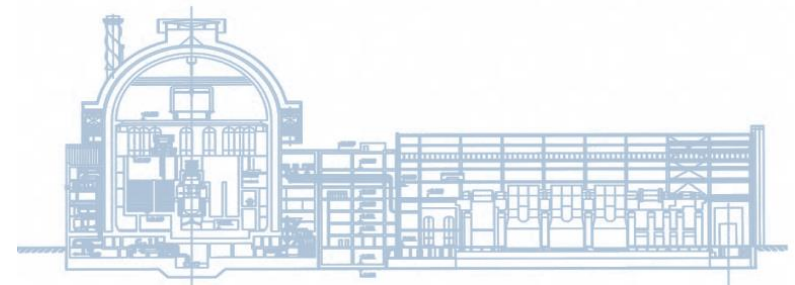
Структура ЯЭС



Вариант 1 (Загрузка 1/3 активной зоны ВВЭР и подпитка Pu высокого качества)	Вариант 2 (Загрузка 1/3 активной зоны ВВЭР и подпитка равновесным Pu)
 <u>1 БН</u> +  <u>1 ВВЭР</u>	 <u>2 БН</u> +  <u>1 ВВЭР</u>

- 01** Представлен методический подход, дающий ориентир для выбора состава плутония подпитки ОЯТ ВВЭР для обеспечения многократного рецикла плутония в двухкомпонентной ядерно-энергетической системе ВВЭР-БН с частично замкнутым ЯТЦ.
- 02** Вариант с третьей загрузкой активной зоны теплового реактора МОКС-топливом не требует разработки дополнительных систем обеспечения безопасности и является отработанной технологией.
- 03** Предварительные результаты показывают, что Pu из реакторов БН, в первую очередь из зон воспроизводства, способен поддерживать необходимый энергетический потенциал топлива легководных реакторов для многократного рецикла плутония, и, тем самым, снижать потребление природного урана и накопление плутония в ЯЭС.
- 04** Содержание плутония в МОКС-топливе и корректировка изотопного состава плутония, а также массы плутония подобраны таким образом, чтобы полученная смесь имела ценность и энергетический потенциал как у МОКС-топлива первой загрузки теплового реактора.
- 05** Анализ структуры ЯЭС, показывает, что в рамках предложенного подхода один реактор БН способен обеспечить частичную загрузку реактора ВВЭР без использования дополнительных источников плутония.

Таким образом, в условиях невысоких темпов развития ядерной энергетики и значительного превалирования числа тепловых реакторов над быстрыми, производство качественного плутония в БН с высоким содержанием делящихся изотопов и его использование в РТН может стать важным шагом для развития двухкомпонентной системы ЯЭ.



Спасибо за внимание

Хныкина Екатерина

Phone: +7 (48439)9 82-13

E-mail: eskhnykina@ippe.ru

2024