

О ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОГО ПРОИЗВОДСТВА ^{238}Pu ДЛЯ РАДИОИЗОТОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В ЛЕГКОВОДНОМ РЕАКТОРЕ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Глебов В.Б., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Кругликов А.Е.

НИЯУ МИФИ,
115409 г. Москва, Каширское ш., 31



Анализируется возможность накопления низкофонового плутония, пригодного для использования в радиоизотопных термоэлектрических генераторах, в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя (реактор типа ВВЭР-СКД). В качестве стартового материала рассматривалась двуокись нептуния из состава младших актинидов, основных компонентов трансурановых радиоактивных отходов. Получение полезного низкофонового плутония из бесполезных радиоактивных отходов можно оценивать как один из путей к обезвреживанию отходов ядерной промышленности. Сборка, содержащая стартовый материал, размещалась в центре активной зоны реактора, в зоне максимальной плотности потока нейтронов для интенсификации наработки плутония. В расчетных исследованиях применен мультифизический подход с взаимосвязанным анализом нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора ВВЭР-СКД. Показано, что накопление значимых количеств низкофонового плутония, удовлетворяющего требованиям по низкому содержанию ^{236}Pu и по высокому содержанию ^{238}Pu , возможно при выполнении следующих условий. Первое – решетка нептуниевых стержней в центральной сборке должна быть достаточно просторной с высокой объемной долей теплоносителя. Второе – центральная сборка должна окружаться сборками, создающими защитный барьер против быстрых нейтронов деления, усиливающих пороговую $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Pu}$ -реакцию. Такой барьер могут создать сборки, содержащие природный или радиогенный свинец. Приведены расчетные оценки темпа накопления низкофонового плутония в центральной сборке с просторной решеткой нептуниевых стержней, окруженной свинцовыми защитными сборками.

Ключевые слова: ^{236}Pu , ^{238}Pu , радиоизотопные термоэлектрические генераторы, легководные реакторы со сверхкритическими параметрами.

Для цитирования: Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Глебов В.Б., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Кругликов А.Е. О возможности крупномасштабного производства ^{238}Pu для радиоизотопных термоэлектрических генераторов в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 153–165. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.12>

ВВЕДЕНИЕ

Ценность низкофонового плутония с высоким содержанием ^{238}Pu (согласно спецификации NASA [1] ^{238}Pu в плутонии должно быть более 80%) обусловлена уникальными свойствами этого изотопа. Интенсивное тепловыделение ^{238}Pu (570 Вт/кг) может быть преобразовано в электроэнергию с КПД на уровне 10–15% в радиоизотопных термоэлектрических генераторах (РИТЭГ), обеспечивающих энергетические потребности космических аппаратов. Период полураспада (87,7 лет) ^{238}Pu позволяет надеяться на их длительное и стабильное энергообеспечение.

Имеющиеся в настоящее время в мире мощности по его наработке недостаточны и не покрывают растущие годовые потребности [2]. В основном, этот изотоп нарабатывается в исследовательских реакторах. На 2019 г. производство ^{238}Pu на двух исследовательских реакторах в национальных лабораториях Айдахо и Окридж оценивалось в 800–900 граммов в год. Программой NASA поставлена задача расширить к 2025 г. масштаб производства этого изотопа до 1,5 кг/год [3]. При этом состав производимого плутония должен удовлетворять спецификации к источникам энергии для космических исследований [1]. В Российской Федерации одним из ведущих производителей ^{238}Pu является производственное объединение ПО «Маяк». В настоящее время на ПО «Маяк» имеются два исследовательских реактора третьего поколения – «Руслан» и «Людмила». Оба реактора обладают уникальными нейтронно-физическими характеристиками и позволяют получать широкий спектр радиоактивных изотопов гражданского назначения [4]. В сентябре 2015 г. на ПО «Маяк» приступили к проектированию нового реактора, который задуман как многоцелевой с возможностью генерации электроэнергии и получения широкого спектра радиоизотопов, включая ^{238}Pu [4].

В принципе, плутоний может быть использован в зарядах ядерных взрывных устройств (ЯВУ). Но именно плутоний с большой долей ^{238}Pu оказывается непригодным для ЯВУ из-за слишком высокого удельного тепловыделения. Согласно документу МАГАТЭ INFCIRC/153 [5], плутоний с долей ^{238}Pu выше 80% не может быть использован в ЯВУ и выведен из-под гарантий МАГАТЭ. Как раз такой плутоний и нужен для РИТЭГ космических аппаратов.

В настоящее время основным стартовым материалом для наработки низкофонового плутония в ядерных реакторах являются различные соединения ^{237}Np . Нейтроны, бомбардирующие этот изотоп, способны инициировать полезную $^{237}\text{Np}(n, \gamma)^{238}\text{Pu}$ -реакцию, ведущую к накоплению нужного изотопа ^{238}Pu , и бесполезную $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Pu}$ -реакцию, ведущую к накоплению ненужного изотопа ^{236}Pu [6]. Нежелательность присутствия ^{236}Pu в плутонии для РИТЭГ связана с радиоактивностью продуктов его распада, среди которых есть мощные источники жесткого γ -излучения (например, ^{208}Tl). Считается, что плутоний пригоден для РИТЭГ космических аппаратов, если он содержит не более 2 ppm ^{236}Pu [1].

Представляется разумным нарабатывать низкофононовый плутоний в Np-содержащих ТВС, облучаемых тепловыми нейтронами, в легководных энергетических реакторах. Мягкий нейтронный спектр легководных реакторов может усилить полезную $^{237}\text{Np}(n, \gamma)^{238}\text{Pu}$ -реакцию и подавить бесполезную $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Pu}$ -реакцию, которую способны инициировать только быстрые нейтроны. В работе [7] приведены расчетные оценки возможности наработки низкофонового плутония в энергетическом легководном реакторе ВВЭР-1000. Эти оценки показали способность реактора производить низкофононовый плутоний с темпом до 3 кг/год в центральной ТВС, содержащей двуокись нептуния в качестве стартового материала. Получаемый плутоний содержит ^{238}Pu на уровне не ниже 90% и ^{236}Pu на уровне не выше 2 ppm.

Перспективность реакторов ВВЭР-СКД определяется, главным образом, их лучшей экономичностью по сравнению с традиционными реакторами типа ВВЭР. Значение КПД на АЭС с реактором, работающим при давлении воды на уровне 25 МПа и при выходной температуре около 600°C, может достигать 48% против 30–32% на АЭС с реакторами типа ВВЭР. Более высокий КПД означает меньший объем тепловых сбросов и снижение экологического воздействия реакторов ВВЭР-СКД на окружающую среду. Кроме этого, проекты реакторов ВВЭР-СКД характеризуются приемлемыми как характеристиками безопасности, так и удельными капитальными вложениями [8].

Именно поэтому в настоящее время легководные реакторы со сверхкритическими параметрами теплоносителя рассматриваются как один из наиболее перспективных вариантов развития реакторных технологий. В частности, легководные СКД-реакторы включены международными экспертами в перечень из шести перспективных реакторных систем Международного Форума «Поколение-4» [9]. Следует также отметить важную особенность создания реакторов со сверхкритическими параметрами воды – возможность максимального использования имеющейся индустриальной и инфраструктурной базы для действующих и строящихся легководных реакторов.

В работе оценивается способность легководных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя нарабатывать значимые количества низкофонового плутония для РИТЭГ космических аппаратов.

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА ВВЭР-СКД

В реакторе ВВЭР-СКД в качестве теплоносителя используется вода сверхкритических параметров с подогревом на уровне 260°C. При этом плотность и энтальпия воды по высоте активной зоны изменяются в несколько раз [10]. Это приводит к тому, что спектр нейтронов сильно меняется от резонансного на входе теплоносителя в активную зону до быстрого на выходе из нее. Все эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости применения мультифизической модели связанных нейтронных и теплогидравлических процессов для корректного описания характеристик реактора.

В данной работе мультифизический подход связанных нейтронных и теплогидравлических процессов реализован в виде проведения сходящейся последовательности аксиальных теплофизических и нейтронно-физических расчетов опускного и подъемного участков СКД-реактора (рис. 1).

В расчетах за основу был принят проект реакторной установки ВВЭР-СКД-1600 [10, 12] с двухходовой схемой движения теплоносителя в активной зоне (рис. 2). Основные параметры активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600:

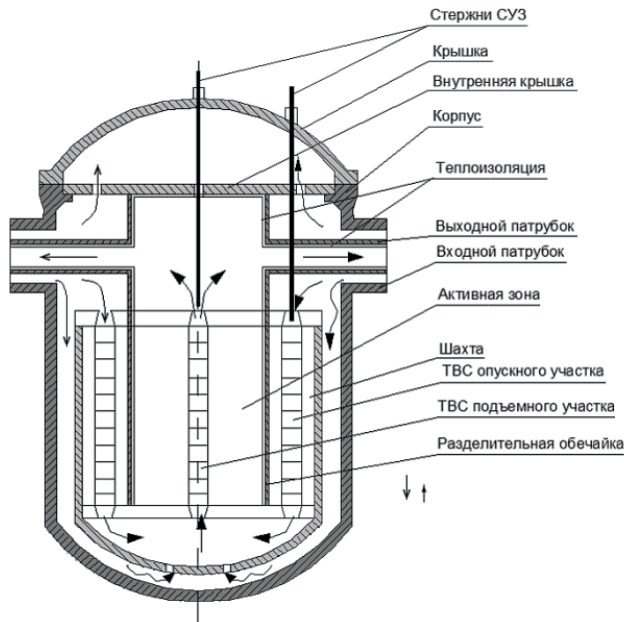


Рис. 1. Двухходовая схема охлаждения реактора [11]

- тепловая мощность – 3682 МВт;
- давление воды – 24.5 МПа;
- температура воды на опускном участке – от 280 до 382.9°C;
- температура воды на подъемном участке – от 382.9 до 540°C;
- количество ТВС на опускном участке – 109;
- количество ТВС на подъемном участке – 132;
- форма ТВС – гексагональная;
- размер ТВС «под ключ» – 20.5 см;
- шаг решетки твэлов – 12 мм;
- диаметр топливного сердечника – 9.6 мм;

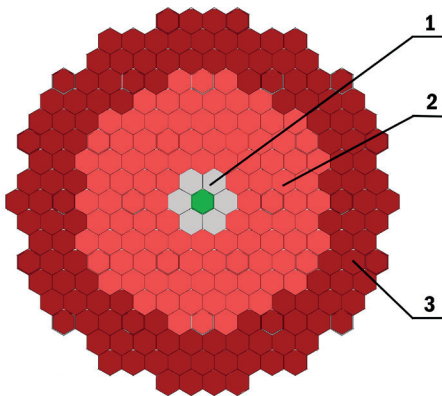


Рис. 2. Компоновка активной зоны реактора ВВЭР-СКД, принятая за основу для связанных теплогидравлических и нейтронно-физических расчетов [10]: 1 – облучательное устройство; 2 – подъемный участок; 3 – опускной участок

- материал топливного сердечника – двуокись урана;
- длина активной части твэла – 400 см;
- толщина оболочки твэла – 0.55 мм;
- материал оболочки твэла – нержавеющая сталь ЭП-172;
- массовая скорость воды ρ_w на опускном участке – 164.3 г/(см²·с);
- массовая скорость воды ρ_w на подъемном участке – 181.5 г/(см²·с).

Расчетные оценки возможности крупномасштабного производства низкофонового плутония в легководном реакторе ВВЭР-СКД-1600 проводились с использованием компьютерных программ TIME26 [13] и про-

граммы WaterSteamProCalculator [14]. Применение этих программ позволило выполнять требуемый комплексный анализ нейтронно-физических и теплофизических процессов в реакторе.

Программа TIME26 предназначена для определения пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и анализа временного поведения изотопного состава топлива в рамках 26-группового диффузионного приближения для аксиальных и радиальных моделей ядерных реакторов. Программа использует групповые микросечения нейтронных реакций из библиотеки оцененных ядерных данных БНАБ-78 [15].

Программа WaterSteamProCalculator позволяет получать температурные зависимости плотности и энтальпии воды по мере ее продвижения по ТВС опускного и подъемного участков активной зоны реактора. Температурные зависимости энтальпии и плотности воды были введены в программу TIME26 в виде табулированных массивов.

АЛГОРИТМ СВЯЗАННЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Расчеты аксиальных распределений энтальпии, температуры и плотности воды в ТВС опускного и подъемного участков проводились в следующей последовательности. На первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты одномерных аксиальных моделей ТВС на опускном и на подъемном участках активной зоны. Эти расчеты позволили получить аксиальную зависимость линейного тепловыделения в ТВС $q_{l,ТВС}(z)$ и с ее помощью определить аксиальные распределения энтальпии, температуры и плотности воды по высоте ТВС.

Расчет аксиальных зависимостей энтальпии, температуры и плотности воды осуществлялся по следующей итерационной схеме.

1. Задавалось начальное упрощенное распределение плотности воды по высоте ТВС. Например, плотность воды принималась одинаковой по всей высоте ТВС и равной плотности воды при температуре входа.

2. Проводился нейтронно-физический расчет, в результате которого определялась аксиальная зависимость линейного тепловыделения в ТВС $q_{l,ТВС}(z)$. С помощью этой зависимости рассчитывалось распределение энтальпии воды по высоте ТВС:

$$J(z) = J(0) + \int_0^z \frac{q_{l,ТВС}(z') dz'}{\rho_W \cdot \varepsilon(H_2O) \cdot S_{ТВС}},$$

где $J(z)$ – энтальпия воды, Дж/г; $q_{l,ТВС}(z)$ – линейное тепловыделение, Вт/см; ρ_W – массовая скорость воды, г/(см²·с); $\varepsilon(H_2O)$ – объемная доля воды в ТВС; $S_{ТВС}$ – площадь поперечного сечения ТВС, см².

Рассчитав распределение энтальпии воды, можно определить и распределение ее температуры, используя введенные в программу табулированные массивы.

Линейное тепловыделение по оси ТВС нормировалось таким образом, чтобы температура воды на выходе из ТВС соответствовала заданным значениям (382.9°C на выходе из опускного участка и 540°C на выходе из подъемного участка).

3. Зная аксиальное распределение температуры воды, можно найти новое распределение плотности воды по высоте ТВС с помощью упомянутых выше табулированных зависимостей плотности и энтальпии воды от ее температуры.

После нахождения уточненного распределения плотности воды по высоте ТВС последовательность вычислений возвращалась на нейтронно-физический расчет нового аксиального распределения линейного тепловыделения $q_{l,ТВС}(z)$. Снова рассчитывались аксиальные зависимости энтальпии и температуры воды. Такой итерационный процесс продолжался до стабилизации аксиального распределения температуры воды.

Полученные аксиальные зависимости плотности воды использовались для определения средних значений плотности воды в ТВС опускного и подъемного участков.

РАСЧЕТЫ НАКОПЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТВС ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

Полученные на предыдущем этапе средние плотности воды в ТВС опускного и подъемного участков использовались для расчетного анализа временного поведения пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и изотопного состава топлива в цилиндрической модели активной зоны реактора.

В качестве стартового материала для накопления низкофонового плутония рассматривалась двуокись нептуния NpO_2 . Твэлы с двуокисью нептуния в стальной оболочке размещались в центральной ТВС. Варьируемыми параметрами, изменяемыми с целью создать наилучшие спектральные условия для производства низкофонового плутония, были шаг решетки NpO_2 -твэлов $t(NpO_2)$ и состав ТВС ближайшего окружения центральной ТВС. В качестве материалов, окружающих центральную ТВС, использовались легкая вода, природный свинец и радиогенный свинец с высоким содержанием изотопа ^{208}Pb .

Увеличение шага решетки NpO_2 -твэлов повысит объемную долю воды в центральной ТВС, смягчит нейтронный спектр, усилит темп накопления ценного изотопа ^{238}Pu через $^{237}Np(n, \gamma)^{238}Pu$ -реакцию и ослабит темп накопления нежелательного изотопа ^{236}Pu через $^{237}Np(n, 2n)^{236}Pu$ -реакцию.

Окружение центральной NpO_2 -ТВС слоем из шести ТВС, содержащих легкую воду или свинец (природный или радиогенный), создает барьер против проникновения быстрых нейтронов деления от основных UO_2 -ТВС реактора, способных усилить нежелательную $^{237}Np(n, 2n)^{236}Pu$ -реакцию. Во всех вариантах, различающихся шагом решетки NpO_2 -твэлов и составом ближайшего окружения центральной NpO_2 -ТВС, доля ^{235}U в UO_2 -ТВС реактора подбиралась так, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов на начало цикла облучения NpO_2 -ТВС был равен $k_{эфф} = 1.10$.

Результаты расчетов темпа накопления и изотопного состава плутония приведены в табл. 1–3.

Данные, приведенные в табл. 1–3, позволяют сделать следующие выводы.

Таблица 1

Центральная ТВС, окруженная шестью ТВС, заполненными водой

$t(NpO_2)$, мм	Pu, кг/год	$^{238}Pu/Pu$, %	$^{236}Pu/Pu$, ppm	Pu/Np, %
12	9.27	99.7	387.0	1.13
20	7.01	99.5	118.7	2.37
40	6.20	97.3	35.5	8.36
60	5.64	92.2	21.6	17.1
80	4.98	85.8	17.0	26.9

Таблица 2

Центральная ТВС, окруженная шестью ТВС с природным свинцом

t(NpO ₂), мм	Pu, кг/год	²³⁸ Pu/Pu, %	²³⁶ Pu/Pu, ppm	Pu/Np, %
12	7.90	99.7	158.5	0.96
20	7.22	99.4	23.5	2.43
40	6.49	96.9	4.24	8.76
60	5.54	90.8	2.29	16.9
80	4.49	84.0	1.82	24.3

Таблица 3

Центральная ТВС, окруженная шестью ТВС с радиогенным свинцом (100% ²⁰⁸Pb)

t(NpO ₂), мм	Pu, кг/год	²³⁸ Pu/Pu, %	²³⁶ Pu/Pu, ppm	Pu/Np, %
12	8.72	99.6	208.2	1.06
20	7.37	99.4	28.7	2.49
40	6.55	96.8	4.61	8.84
60	5.67	90.4	2.40	17.2
80	4.66	83.1	1.91	25.2

1. Результаты расчетов накопления ²³⁸Pu в реакторе ВВЭР-СКД показали, что темп его накопления составил ~ 4.7 кг/год, что существенно выше, чем в классическом ВВЭР-1000 (~ 3.0 кг/год, [16]).

2. Основные трудности в накоплении низкофонового плутония связаны не с выполнением ограничения по доле ²³⁸Pu (не ниже 80%), а с выполнением ограничения по доле ²³⁶Pu (не выше 2 ppm).

3. Легкая вода является слабым барьером против быстрых нейтронов деления, производимых основными UO₂-ТВС реактора и проникающих в центральную NpO₂-ТВС. В результате плутоний неприемлемо сильно загрязнен изотопом ²³⁶Pu.

4. Природный свинец оказался более сильным барьером против быстрых нейтронов деления по сравнению с водой и радиогенным свинцом. Рекордно слабое поглощение нейтронов изотопом ²⁰⁸Pb, играющее положительную роль при использовании радиогенного свинца в качестве теплоносителя вместо природного свинца, в данном случае стало его недостатком. Радиогенный свинец слишком прозрачен для быстрых нейтронов деления, которые усилили темп накопления ²³⁶Pu в центральной NpO₂-ТВС.

Кроме того, радиогенный свинец прозрачен для резонансных и тепловых нейтронов, способных усилить накопление делящегося изотопа ²³⁹Pu в центральной сборке. Быстрые нейтроны деления этого изотопа усиливают ²³⁷Np(n, 2n)²³⁶Pu-реакцию и повышают долю ²³⁶Pu в производимом плутонии.

Рассматривалась также возможность увеличить темп накопления низкофонового плутония, сделав более прозрачным барьер из шести ТВС введением небольшой доли воды (10%), омывающей свинцовые стержни. Результаты расчетов с таким окружением центральной NpO₂-ТВС приведены в табл. 4.

Видно, что даже столь небольшая доля воды в шести ТВС, окружающих NpO₂-ТВС, заметно ослабляет защитные возможности этих ТВС. Конечно, темп накопления плутония повысился примерно на 13% по сравнению с отсутствием воды (5.3 кг/год против

Таблица 4

Шесть ТВС вокруг NpO_2 -ТВС содержат 90% свинца и 10% воды

$t(\text{NpO}_2)$, мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/Np, %
12	9.89	99.6	159.1	1.20
20	8.44	99.1	26.8	2.85
40	7.63	95.3	5.20	10.3
60	6.56	87.6	2.96	19.9
80	5.33	79.2	2.44	28.8

4.7 кг/год), но его изотопный состав не удовлетворяет требованиям ни по содержанию ^{236}Pu , ни по содержанию ^{238}Pu .

Защитный барьер от быстрых нейтронов деления, производимых основными ТВС реактора, можно усилить добавлением еще одного слоя из 12-ти сборок вокруг центральной NpO_2 -ТВС. Тогда эта ТВС будет окружена 18-тью сборками, содержащими природный свинец и воду. Результаты расчетов с более толстым окружением центральной NpO_2 -ТВС приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5

18 сборок вокруг NpO_2 -ТВС содержат 90% свинца и 10% воды

$t(\text{NpO}_2)$, мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/Np, %
12	9.44	99.3	43.7	1.15
20	8.76	98.1	5.72	2.96
25	8.49	97.2	2.99	4.47
29.8	8.22	96.0	2.00	6.16

Таблица 6

18 сборок вокруг NpO_2 -ТВС содержат 78% свинца и 22% воды

$t(\text{NpO}_2)$, мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/Np, %
12	11.27	98.6	34.2	1.37
20	10.31	96.6	6.27	3.48
30	9.47	93.0	2.83	7.19
40	8.58	88.8	2.16	11.6
50	7.64	84.4	2.00	16.1

Видно, что барьер из 18-ти сборок с природным свинцом и водой делает возможным существенное повышение темпа накопления низкофонового плутония в центральной NpO_2 -ТВС. Темп накопления может составить от 7.6 до 8.2 кг/год в зависимости от объемной доли воды. При этом производимый плутоний удовлетворяет заявленным требованиям по содержанию ^{236}Pu и ^{238}Pu . Однако при объемной доле воды выше 22% становится невозможным удовлетворить сразу обоим требованиям. При содержании ^{238}Pu ниже 80% содержание ^{236}Pu остается выше 2 ppm.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена мультифизическая модель взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов, учитывающая значительные нелинейные изменения теплофизических свойств воды по высоте активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600. Применение данной модели позволило сделать оценки наработки низкофонового плутония более приближенными к реальной ситуации в активной зоне реактора.

2. Расчетные оценки наработки низкофонового плутония в реакторе типа ВВЭР-СКД-1600 позволили сделать следующие выводы:

- показана принципиальная возможность наработки значимых количеств низкофонового плутония (на уровне 7–8 кг/год), удовлетворяющего требованиям к плутонию для РИТЭГ космических аппаратов, в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя;

- наработка значимых количеств низкофонового плутония в центральной ТВС, содержащей двуокись нептуния, возможна лишь при окружении этой сборки достаточно плотным защитным барьером против быстрых нейтронов деления. Таким барьером могут стать сборки, содержащие стержни природного свинца.

3. Следует отметить, что накопление плутония с высоким (более 80%) содержанием ^{238}Pu будет сопровождаться образованием значительной (до 20%) доли хорошо делящегося изотопа ^{239}Pu . Быстрые нейтроны деления этого изотопа способны усилить пороговую $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Pu}$ -реакцию и повысить содержание нежелательного изотопа ^{236}Pu . Оценка такого эффекта «самозагрязнения» низкофонового плутония может стать предметом дальнейших исследований.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-22-00287.

Литература

1. Wong A.S. Chemical analysis of Plutonium-238 for space applications. / AIP Conf. Proc., 2001, 552, pp. 753–757. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1358003>
2. Start-up Plan for Plutonium-238 Production for Radioisotope Power Systems. Электронный ресурс: https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/09/f26/Final_Startup_Plan_for_Plutonium238.pdf (дата доступа 01-04-2024).
3. Sutliff T.J., Bishop T., Hamley J., Sandifer C., McCallum P., McCune M.C. Radioisotope Power Systems – an Interagency Program Status. / Nuclear and Emerging Technologies for Space, American Nuclear Society Topical Meeting, Richland, WA, February 25 – February 28, 2019. Электронный ресурс: <https://anstd.ans.org/NETS-2019-Papers/Track-5--Radioisotope-Power-Systems/abstract-85-0.pdf> (дата доступа 01-04-2024).
4. Комбинат «Маяк» приступил к проектированию новейшего исследовательского реактора. Электронный ресурс: <https://tass.ru/ural-news/2304431> (дата доступа 01-04-2024).
5. INFCIRC/153. The structure and content of agreements between the Agency and States required in connection with the Treaty on the non-proliferation of nuclear weapons. – IAEA, February 2008. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1972/infcirc153.pdf> (дата доступа 01-04-2024).

6. *Shmelev A.N., Geraskin N.I., Apse V.A., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Glebov V.B.* The problem of large-scale production of plutonium-238 for autonomous energy sources. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1689. – № 1. Электронный ресурс: <https://iopscience.iop.org/year/1742-6596/Y2020> (дата доступа 01-04-2024).
7. *Shmelev A.N., Geraskin N.I., Apse V.A., Glebov V.B., Kulikov G.G., Kulikov E.G.* A possibility for large-scale production of ^{238}Pu in light-water reactor VVER-1000. // Journal of Nuclear Engineering. – 2022. – № 3. PP. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.3390/jne3040015>
8. *Лапин А.С., Бобряшов А.С., Бландинский В.Ю., Бобров Е.А.* Исследование системных характеристик реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.09>
9. Международный форум «Поколение IV». Электронный ресурс: https://ru.fw.wiki/wiki/Forum_international_G%C3%A9n%C3%A9ration_IV (дата доступа 01-04-2024).
10. *Деев В.И., Круглов А.Б., Маслов Ю.А., Махин В.М., Харитонов В.С., Чуркин А.Н.* Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета). – Учебное пособие, Москва, НИЯУ МИФИ, 2015, 156 с. Электронный ресурс: http://library.mephi.ru/pdfunnel.php?Z21FAMILY=%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0&Z21ID=62665&PATH=book-mephi%2FDeev_Yadernye_reaktory_s_vodoy_sverkhkriticheskogo_davleniya_2015.pdf (дата доступа 01-04-2024).
11. *Глебов А.П., Клушин А.В.* Развитие реакторов, охлаждаемых водой сверхкритических параметров, в России и за рубежом. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 5. – С.267–273. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t116-5_2014/p267/ (дата доступа 01-04-2024).
12. *Кириллов П.Л., Богословская Г.П.* Водоохлаждаемые АЭС четвертого поколения ВВЭР-СКД. Реальные перспективы и программа исследований. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.01>
13. *Кузьмин А.М., Шмелев А.Н., Апсэ В.А.* Моделирование физических процессов в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах. – Учебное пособие, М.: Издательский дом МЭИ, 2015, 128 с.
14. Интернет-программа WaterSteamProCalculator. Электронный ресурс: www.wsp.ru/ru (дата доступа 01-04-2024).
15. *Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. – Москва, Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.
16. *Шмелев А.Н., Гераскин Н.И., Апсэ В.А., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Глебов В.Б.* Оценка возможности крупномасштабной наработки ^{238}Pu в энергетическом реакторе типа ВВЭР-1000. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.10>

Поступила в редакцию 01.04.2024

Авторы

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор,

E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС,

E-mail: apseva@mail.ru

Глебов Василий Борисович, с.н.с.,

E-mail: vbglebov@mephi.ru

Куликов Геннадий Генрихович, доцент,

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент,

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Кругликов Антон Евгеньевич, ассистент,

E-mail: aekruglikov@mephi.ru

UDC 621.039.8

A Possibility for Large-Scale Production of ^{238}Pu for Radioisotope Thermoelectrical Generators in a Supercritical Light-Water Reactor

Shmelev A.N., Apse V.A., Glebov V.B., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Kruglikov A.E.

МЭФН,

31 Kashirskoe sh., 115409 Moscow, Russia

Abstract

The paper analyzes the possibility for large-scale production of high-purity plutonium suitable for use in radioisotope thermoelectrical generators in the VVER-SKD light-water power reactor with supercritical coolant parameters. Neptunium dioxide (NpO_2) was used as the starting material. Neptunium can be extracted from minor actinides, i.e. from the main components of radioactive transuranium waste. Large-scale production of useful high-purity plutonium via neutron irradiation of useless radioactive waste can be estimated as one of the possible ways to convert harmful waste into a harmless form. The assembly with the starting material was placed in the central part of the reactor core with the maximal neutron flux for more intense plutonium accumulation. Numerical studies were based on a multi-physical approach with coupled analyses of neutronic and thermal-hydraulic processes in the downward and upward reactor zones. The results obtained in numerical studies have demonstrated that large quantities of high-purity plutonium with a low content of ^{236}Pu and a high content of ^{238}Pu could be accumulated in the central NpO_2 assembly if the following conditions are satisfied. Firstly, it is desirable that the lattice of NpO_2 -containing rods would be sufficiently wide with a high volume fraction of light-water coolant. Secondly, the central NpO_2 assembly must be surrounded by protective assemblies to form a barrier against high-energy fission neutrons which are capable to intensify the threshold $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{238}\text{Pu}$ reaction. The protective function can be performed by the assemblies containing rods with natural lead or radiogenic lead. The paper estimates the production scales of high-purity plutonium in the central assembly with a wide lattice of NpO_2 -containing rods and surrounded by a layer of protective Pb-containing assemblies.

Keywords: ^{236}Pu , ^{238}Pu , radioisotope thermoelectrical generators, light-water power reactors with supercritical coolant parameters.

For citation: Shmelev A.N., Apse V.A., Glebov V.B., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Kruglikov A.E. A Possibility for Large-Scale Production of ^{238}Pu for Radioisotope Thermoelectrical Generators in a Supercritical Light-Water Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 153 – 165; DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2024.3.12> (in Russian).

References

1. Wong A.S. Chemical analysis of Plutonium-238 for space applications. / AIP Conf. Proc., 2001, 552, pp. 753–757. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1358003>

2. Start-up Plan for Plutonium-238 Production for Radioisotope Power Systems. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/09/f26/Final_Startup_Plan_for_Plutonium238.pdf (accessed 01-04-2024).
3. Sutliff T.J., Bishop T., Hamley J., Sandifer C., McCallum P., McCune M.C. Radioisotope Power Systems – an Interagency Program Status. / Nuclear and Emerging Technologies for Space, American Nuclear Society Topical Meeting, Richland, WA, February 25 – February 28, 2019. Available at: <https://anstd.ans.org/NETS-2019-Papers/Track-5--Radioisotope-Power-Systems/abstract-85-0.pdf> (accessed 01-04-2024).
4. The Mayak plant has begun designing a new research reactor. Available at: <https://tass.ru/ural-news/2304431> (accessed 01-04-2024) (in Russian).
5. INFCIRC/153. The structure and content of agreements between the Agency and States required in connection with the Treaty on the non-proliferation of nuclear weapons. IAEA, 2008. Available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1972/infcirc153.pdf> (accessed 01-04-2024).
6. Shmelev A.N., Geraskin N.I., Apse V.A., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Glebov V.B. The problem of large-scale production of plutonium-238 for autonomous energy sources. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1689, no. 1. Available at: <https://iopscience.iop.org/year/1742-6596/Y2020> (accessed 01-04-2024).
7. Shmelev A.N., Geraskin N.I., Apse V.A., Glebov V.B., Kulikov G.G., Kulikov E.G. A possibility for large-scale production of ^{238}Pu in light-water reactor VVER-1000. *Journal of Nuclear Engineering*. 2022, no. 3, pp. 263–276. DOI: <https://doi.org/10.3390/jne3040015>
8. Lapin A.S., Bobryashov A.S., Blandinsky V.Yu., Bobrov E.A. Analysis of system characteristics of a reactor with supercritical coolant parameters. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020, no. 3, pp. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.09> (in Russian).
9. International Forum «Generation IV». Available at: https://ru.fw.wiki/wiki/Forum_international_G%C3%A9n%C3%A9ration_IV (accessed 01-04-2024).
10. Deev V.I., Kruglov A.B., Maslov Yu.A., Makhin V.M., Kharitonov V.S., Churkin A.N. Nuclear reactors with supercritical pressure water (basics of thermal calculations). Textbook. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2015, 156 p. Available at: http://library.mephi.ru/pdfunnel.php?Z21FAMILY=%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0&Z21ID=62665&PATH=book-mephi%2FDeev_Yadernye_reaktory_s_vodoy_sverkhkriticheskogo_davleniya_2015.pdf (accessed 01-04-2024) (in Russian).
11. Glebov A. P., Klushin A. V. Development of supercritical-water cooled reactors in Russia and abroad. *Atomic energy*. 2014, vol. 116, iss. 5, pp. 320–329. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9860-x>
12. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. Water-cooled NPPs of the fourth generation VVER-SKD. Real prospects and research program. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 4, pp. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.01> (in Russian).
13. Kuzmin A.M., Shmelev A.N., Apse V.A. Modeling of physical processes in fast neutron power nuclear reactors. Textbook. Moscow, MPEI Publishing House, 2015, 128 p. (in Russian).
14. Online-software WaterSteamProCalculator. Available at: www.wsp.ru/ru (accessed 01-04-2024).
15. Abagyan L.P., Bazazyants N.O., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Group constants for calculating reactors and protection. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981, 232 p. (in Russian).
16. Shmelev A.N., Geraskin N.I., Apse V.A., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Glebov V.B. Assessment of the possibility for large-scale ^{238}Pu production in a VVER-1000 power reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.10> (in Russian).

Authors

Anatoly N. Shmelev, professor,

E-mail: shmelan@mail.ru

Vladimir A. Apse, Head of NIS,

E-mail: apseva@mail.ru

Vasily B. Glebov, senior researcher,

E-mail: vbglebov@mephi.ru

Gennady G. Kulikov, associate professor,

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Evgeny G. Kulikov, associate professor,

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Anton E. Kruglikov, assistant,

E-mail: aekruglikov@mephi.ru