

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЛАДШИХ АКТИНИДОВ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ НАРАБОТКИ ^{238}Pu В ЛЕГКОВОДНОМ РЕАКТОРЕ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2024 г. А. Н. Шмелев^а, *, Н. И. Гераскин^а, В. А. Апсэ^а,
В. Б. Глебов^а, Г. Г. Куликов^а, Е. Г. Куликов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409 Россия

*E-mail: vbglebov@mephi.ru

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

В статье рассмотрена возможность наработки плутония, пригодного для радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ), в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя. В качестве стартового материала использована смесь нептуниевой и америциевой фракции младших актинидов из состава трансурановых радиоактивных отходов. Предполагалось размещение стартового материала в центральной ТВС реактора. Показано, что накопление значимых количеств плутония с малым содержанием ^{236}Pu (не выше 2 ppm) и с высоким содержанием ^{238}Pu (не ниже 80%), возможно при окружении центральной ТВС слоем сборок, заполненных свинцом. Эти сборки должны создать барьер против быстрых нейтронов деления, способных повысить долю ^{236}Pu через пороговую $^{237}\text{Np}(n,2n)^{236}\text{Pu}$ реакцию. Приведены расчетные оценки темпа накопления плутония, пригодного для РИТЭГ, в центральной (Np,Am)-ТВС, окруженной такими защитными сборками.

Ключевые слова: плутоний-236, плутоний-238, радиоизотопные термоэлектрические генераторы, легководные реакторы со сверхкритическими параметрами

DOI: 10.56304/S2079562923030338

1. ВВЕДЕНИЕ

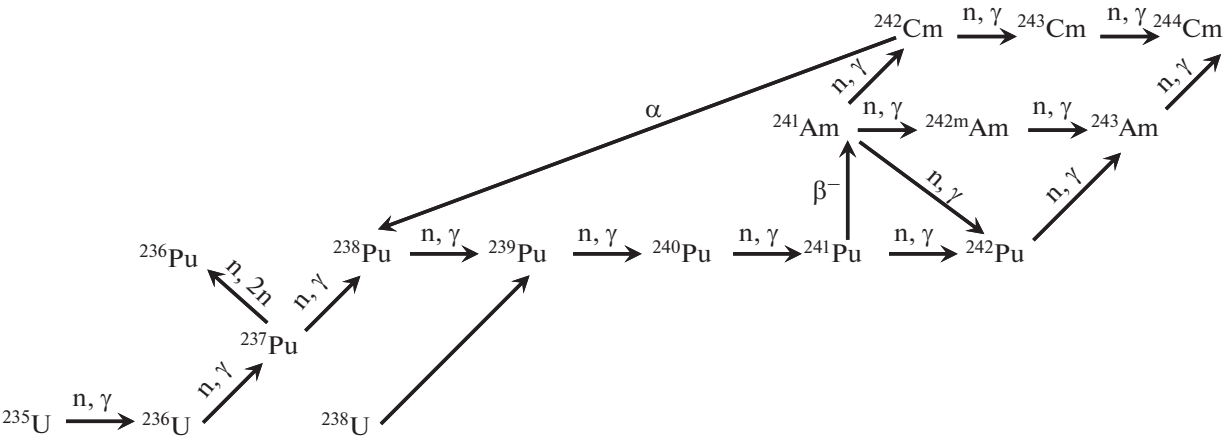
Плутоний становится пригодным для РИТЭГ космических аппаратов и кардиостимуляторов только в том случае, если его изотопный состав удовлетворяет ограничениям по доле ^{236}Pu (не выше 2 ppm) и ^{238}Pu (не ниже 80%) [1]. Интенсивное тепловыделение ^{238}Pu (570 Вт/кг) может быть преобразовано в электроэнергию с КПД на уровне 10–15% современными РИТЭГ. Достаточно долгий период полураспада ^{238}Pu (87.7 лет) гарантирует стабильное энергообеспечение. Кроме того, согласно документу МАГАТЭ INFCIRC/153 [2], плутоний с долей ^{238}Pu выше 80% не может быть использован в ядерных взрывных устройствах и выведен из-под контроля МАГАТЭ. Требование по малому содержанию ^{236}Pu связано с радиоактивностью продуктов его распада, среди которых есть мощные источники жесткого γ -излучения.

Младшие актиниды (МА) из состава трансурановых радиоактивных отходов от процесса переработки облученного ядерного топлива АЭС частично могут быть использованы для наработки

плутония, пригодного для РИТЭГ. В состав МА входят три фракции: нептуниевая фракция (изотоп ^{237}Np), америциевая фракция (изотопы ^{241}Am и ^{243}Am) и кюриевая фракция (изотопы ^{244}Cm и ^{245}Cm). Наиболее подходящими стартовыми материалами для наработки ^{238}Pu в цепочке изотопных переходов, показанной на рис. 1, представляются нептуниевая и америциевая фракции МА. Там же выделен участок цепочки, отдельно показывающий «америциевое» разветвление цепочки.

Некоторые физические свойства изотопов МА приведены в табл. 1. Видно, что изотопы МА являются радиоактивными нуклидами с длительными периодами полураспада и с интенсивным тепловыделением (особенно ^{244}Cm). Мощное тепловыделение, радиационная и химическая токсичность МА приводят к необходимости либо их окончательного захоронения в геологических формациях, либо их нейтронной трансмутации в специализированных ядерных установках.

Кроме того, МА это делящиеся изотопы с хорошими размножающими свойствами, особенно



“Америциевое” разветвление:
Радиационный захват нейтронов изотопом ^{241}Am идет по следующим двум каналам:
 $^{241}\text{Am}(n, \gamma)^{242g}\text{Am}$ с вероятностью 90.3% и $^{241}\text{Am}(n, \gamma)^{242m}\text{Am}$ с вероятностью 9.7%.
Быстрый распад изотопа ^{242g}Am ($T_{1/2} = 16$ ч) идёт также по двум каналам:
 $^{242g}\text{Am}(83\%, \beta^-)^{242}\text{Cm}$ и $^{242g}\text{Am}(17\%, \text{э. з.})^{242}\text{Pu}$. Считая распад ^{242g}Am мгновенным, этот участок цепочки может быть представлен следующим образом:

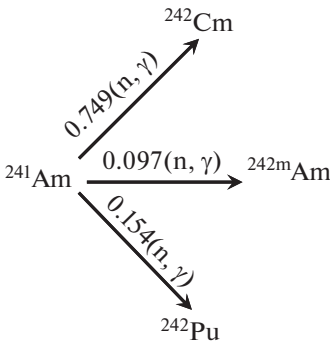


Рис. 1. Схема изотопных переходов при наработке плутония из МА.

в области высоких энергий нейтронов. К сожалению, включение МА в состав топлива АЭС невозможно из-за неприемлемо высокого тепловыделения ^{244}Cm . В итоге кюриевую фракцию МА можно считать бесполезной и для ядерной энергетики (слишком мощное тепловыделение ^{244}Cm), и для наработки плутония для РИТЭГ (нет нейтронных реакций, превращающих ^{244}Cm и ^{245}Cm в изотопы плутония).

Однако имеется принципиальная возможность полезного применения двух остальных фракций МА, а именно Np-фракции и Am-фракции, для крупномасштабной наработки плутония с изотопным составом, пригодным для РИТЭГ.

Наиболее удобным представляется использование Np-фракции МА, поскольку ^{237}Np является ближайшим нейтронным предшественником изотопов плутония. Реакция радиационного захвата

Таблица 1. Физические свойства изотопов МА [3, 4]

	^{237}Np	^{241}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm
$T_{1/2}$, годы	$2.1 \cdot 10^6$	432	7380	18.1	8250
Накопление, кг/ГВт(э) год	20.4	1.3	2.5	0.90	0.06
Тепловыделение, Вт/кг	0.02	112	6.2	2780	5.6
$\nu_{\text{эф}}$ (6.5 МэВ)	3.80	4.18	4.65	4.85	5.26
$\nu_{\text{эф}}$ (0.025 эВ)	$3.2\text{e-}04$	$1.8\text{e-}02$	0	0.19	3.25

нейтронов $^{237}\text{Np}(n,\gamma)^{238}\text{Pu}$ ведет к накоплению целевого изотопа ^{238}Pu , а пороговая $^{237}\text{Np}(n,2n)^{236}\text{Pu}$ реакция приводит к образованию вредного изотопа ^{236}Pu . Поскольку нежелательная $^{237}\text{Np}(n,2n)^{236}\text{Pu}$ реакция может быть инициирована только нейтронами высоких энергий, задача состоит в том, чтобы создать спектральные условия, усиливающие желательную $^{237}\text{Np}(n,\gamma)^{238}\text{Pu}$ реакцию и подавляющие нежелательную $^{237}\text{Np}(n,2n)^{236}\text{Pu}$ реакцию.

Америциевая фракция МА также может быть использована для наработки плутония через более длинную цепочку изотопных переходов (см. рис. 1). Сначала изотоп ^{241}Am переходит в ^{242}Cm , а затем ^{242}Cm сравнительно быстро распадается в ^{238}Pu (период полураспада — 162.8 сут). Здесь важно отметить, что Ам-фракция не может быть источником накопления нежелательного изотопа ^{236}Pu .

В настоящей статье оценивается возможность использования смешанной (Np, Am)-фракции МА для наработки плутония, пригодного для РИТЭГ, в энергетическом легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя (реактор типа ВВЭР-СКД). Перспективность реакторов ВВЭР-СКД определяется, главным образом, их лучшей экономичностью по сравнению с традиционными реакторами типа ВВЭР. Значение КПД на АЭС с реактором ВВЭР-СКД может достигать 48% против 35–37% на АЭС с реакторами ВВЭР. Более высокий КПД означает меньший тепловой сброс и меньшее экологическое воздействие АЭС на окружающую среду. Кроме этого, проекты реакторов ВВЭР-СКД характеризуются приемлемыми характеристиками по безопасности и по удельным капиталовложениям [5]. В настоящее время реакторы типа ВВЭР-СКД рассматриваются как один из наиболее перспективных вариантов развития реакторных технологий. Так реакторы ВВЭР-СКД включены в число шести перспективных реакторных систем Международного Форума “Поколение-4” [6].

2. МУЛЬТИФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА ВВЭР-СКД

В реакторе ВВЭР-СКД в качестве теплоносителя используется вода сверхкритических параметров (давление ~ 25 МПа, подогрев ~ 260°C). При таких условиях плотность и энтальпия воды по высоте активной зоны изменяются в несколько раз [7]. 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. 2).

В расчетах за основу был принят проект реактора ВВЭР-СКД-1600 [7, 9] с двухходовой схемой движения теплоносителя в активной зоне (рис. 2). Основные параметры активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1600 приведены ниже.

- 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.
- 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 наработки плутония для РИТЭГ в реакторе ВВЭР-СКД-1600 проводились с использованием компьютерных программ TIME26 [10] и программы WaterSteamPro Calculator [11].

Программа TIME26 предназначена для определения пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и анализа временного изменения 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 [4].

Программа WaterSteamPro Calculator 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.

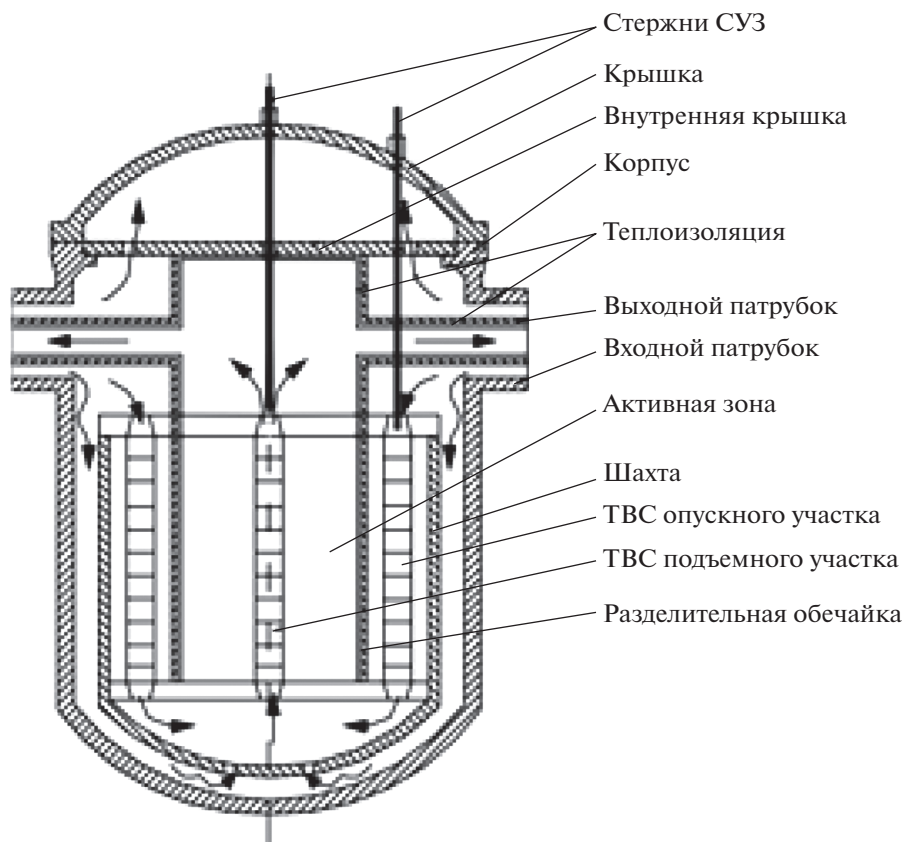


Рис. 2. Двухфазовая схема охлаждения реактора [8].

3. 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 участке активной зоны. Эти расчеты позволили получить аксиальную зависимость линейного тепловыделения в ТВС $q_{l,TVС}(z)$, а затем, 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 зави-

симость линейного тепловыделения в ТВС $q_{l,TVС}(z)$. С помощью этой зависимости рассчитывалось распределение энтальпии воды по высоте ТВС:

$$J(z) = J(0) + \int_0^z q_{l,TVС}(z') dz' / \rho_W \epsilon(H_2O) S_{TVС};$$

где $J(z)$ – энтальпия воды, Дж/г;

$q_{l,TVС}(z)$ – линейное тепловыделение, Вт/см;

ρ_W – массовая скорость воды, г/(см² с);

$\epsilon(H_2O)$ – объемная доля воды в ТВС;

$S_{TVС}$ – 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 $q_{l,TBC}(z)$. 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. Последние были использованы в расчетах накопления плутония в рамках цилиндрической модели активной зоны реактора.

Надо отметить, что выраженная аксиальная зависимость плотности теплоносителя в реакторе СКД оказывает сильное влияние на спектральные условия для наработки плутония, пригодного для РИТЭГ. В связи с этим на следующем шаге исследований планируется постановка задачи о поиске оптимального аксиального размещения облучаемого материала с наилучшими спектральными условиями для наработки плутония.

4. 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 наработки плутония рассматривалась смесь двуокиси нептуния NpO_2 с двуокисью америция AmO_2 . Твэлы со смесью $(Np,Am)O_2$ в стальной оболочке размещались в центральной ТВС. Варьируемыми параметрами, изменяемыми с целью создания наилучших спектральных условий для производства плутония, были шаг решетки (Np,Am) -твэлов $t(Np,Am)$ и состав ТВС ближайшего окружения центральной ТВС. В качестве материалов, окружающих центральную ТВС, использовались природный свинец и радиогенный свинец (100% ^{208}Pb).

Увеличение шага решетки (Np,Am) -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.

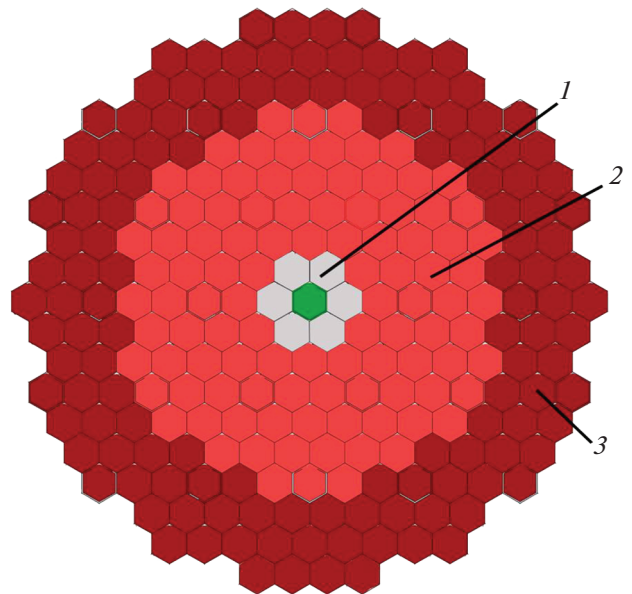


Рис. 3. Схема активной зоны реактора ВВЭР-СКД для связанных теплогидравлических и нейтронно-физических расчетов [7]: 1 – облучательное устройство; 2 – подъемный участок; 3 – опускной участок.

Окружение центральной (Np,Am) -ТВС слоем сборок, содержащих 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 (Np,Am) -твэлов и составом ближайшего окружения центральной (Np,Am) -ТВС, доля ^{235}U в UO_2 -ТВС реактора подбиралась так, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов на начало цикла облучения был равен 1.10.

4.1. Окружение центральной ТВС одним слоем свинцовых ТВС

В первой серии расчетов центральная ТВС со стартовым материалом для наработки плутония окружена одним слоем из шести гексагональных сборок, заполненных природным свинцом (Pb -ТВС) или радиогенным свинцом (^{208}Pb -ТВС). Рассмотрены два варианта стартового материала: только двуокись нептуния Np -ТВС и смесь двуокисей нептуния и америция (Np,Am) -ТВС в пропорции, соответствующей темпу накопления изотопов МА в легководных реакторах (см. табл. 1). Результаты расчетов темпа накопления и изотопного состава плутония, полученные в первой серии расчетов, приведены в табл. 2–5.

Видно, что основной проблемой в накоплении плутония для РИТЭГ в центральной ТВС реактора

Таблица 2. Центральная Np-ТВС окружена шестью Pb-ТВС

t(Np), 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 Np-ТВС окружена шестью ²⁰⁸Pb-ТВС

t(Np), 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

является не ограничение доли ²³⁸Pu (не ниже 80%), а ограничение доли ²³⁶Pu (не выше 2 ppm). Последнее требование может быть выполнено лишь в достаточно просторной решетке (шаг – 80 мм) Np-твэлов и (Np,Am)-твэлов. Доля ²³⁸Pu при этом остается на приемлемом (83-85%) уровне. Однако это означает, что доля ²³⁹Pu окажется на уровне 15–17%, а быстрые нейтроны деления этого изотопа усилят ²³⁷Np(n,2n)²³⁶Pu реакцию и повысят долю ²³⁶Pu в плутонии. Возникает эффект “самозагрязнения” (ЭСЗ) плутония изотопом ²³⁶Pu. Этот эффект был оценен сокращением числа уравнений, описывающих изотопные переходы в центральной ТВС, таким образом, чтобы учесть вклад нейтронов деления ²³⁹Pu в накопление ²³⁶Pu.

В варианте окружения центральной Np-ТВС одним слоем Pb-ТВС исключение быстрых нейтронов деления ²³⁹Pu снизило долю ²³⁶Pu с 1.82 ppm до 1.28 ppm, т.е. эффект “самозагрязнения” составил

$$\text{ЭСЗ} = (1.82 - 1.28) / 1.82 = 29.7\%.$$

В варианте окружения центральной Np-ТВС шестью ²⁰⁸Pb-ТВС эффект “самозагрязнения” составил 31.4%. Повышение ЭСЗ вызвано увеличе-

нием доли ²³⁹Pu (16.9% против 16.0% в предыдущем варианте) из-за большей прозрачности ²⁰⁸Pb для нейтронов из окружающих UO₂-ТВС реактора.

Величины ЭСЗ для вариантов размещения (Np,Am)-ТВС в центре реактора составили 31.8% при окружении этой сборки шестью Pb-ТВС и 32.7% при окружении шестью ²⁰⁸Pb-ТВС.

Данные, приведенные в табл. 2–5, позволяют сделать следующие выводы:

1. Природный свинец является более сильным барьером для быстрых нейтронов деления из окружающих UO₂-ТВС реактора по сравнению с радиогенным свинцом, что снизило долю ²³⁶Pu в нарабатываемом плутонии.
2. Радиогенный свинец более прозрачен не только для быстрых нейтронов деления, но и для резонансных и тепловых нейтронов, способных увеличить темп накопления плутония и повысить в нем долю изотопа ²³⁹Pu. Быстрые нейтроны деления этого изотопа усиливают ²³⁷Np(n,2n)²³⁶Pu реакцию и повышают долю ²³⁶Pu, создавая эффект “самозагрязнения” плутония изотопом ²³⁶Pu.
3. Величины эффекта “самозагрязнения” плутония оценивались сокращением числа уравне-

Таблица 4. Центральная (Np,Am)-ТВС окружена шестью Pb-ТВС

t(Np,Am), мм	Pu, кг/год	²³⁸ Pu/Pu, %	²³⁶ Pu/Pu, ppm	Pu/(Np,Am), %
12	7.19	98.7	145.6	0.87
20	7.08	97.3	40.7	2.38
40	5.46	96.1	4.40	7.34
60	4.82	90.9	2.34	14.5
80	4.05	84.8	1.75	21.8

Таблица 5. Центральная (Np,Am)-ТВС окружена шестью ^{208}Pb -ТВС

t(Np,Am), мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/(Np,Am), %
12	7.96	98.7	195.0	0.96
20	6.50	98.0	24.9	2.18
40	5.51	96.0	4.78	7.40
60	4.91	90.6	2.44	14.8
80	4.20	84.0	1.81	22.6

Таблица 6. Центральная Np-ТВС окружена 18-ю Pb-ТВС

t(Np), мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/Np, %
12	7.59	99.8	83.0	0.92
20	7.27	99.4	7.59	2.45
25	7.19	99.2	3.82	3.79
30	7.05	98.6	1.96	5.35
35	6.87	97.8	1.25	7.10

ний, описывающих изотопные переходы в центральной ТВС, таким образом, чтобы учесть вклад нейтронов деления ^{239}Pu в накопление ^{236}Pu . Получены значения ЭС на уровне 30–33%.

4. Включение Am-фракции в состав стартового материала понижает темп накопления плутония для РИТЭГ примерно на 10%. Снижение доли ^{237}Np в стартовом материале уменьшает наработку плутония, и это уменьшение не компенсируется вкладом изотопа ^{241}Am .

4.2. Окружение центральной ТВС двумя слоями свинцовых ТВС

Во второй серии расчетов центральная ТВС со стартовым материалом окружена двумя слоями (18 гексагональных сборок) Pb-ТВС или ^{208}Pb -ТВС. Как и в первой серии, рассмотрены два варианта стартового материала: только двуокись нептуния в Np-ТВС и смесь двуокисей нептуния и америция в (Np,Am)-ТВС. Результаты расчетов темпа накопления и изотопного состава плутония, полученные во второй серии расчетов, приведены в табл. 6–9.

Видно, что доля ^{238}Pu в наработанном плутонии находится на уровне 97–98%, т.е. на долю ^{239}Pu остается 2–3%. Поэтому оцененный эффект “самозагрязнения” плутония изотопом ^{236}Pu , образованном быстрыми нейтронами деления ^{239}Pu , оказался незначительным, на уровне 3–4%.

4.3. Сравнение результатов первой и второй серии расчетов

Результаты, полученные в лучших вариантах обеих серий, т.е. в вариантах, удовлетворяющих требованиям по содержанию изотопов ^{238}Pu и ^{236}Pu в наработанном плутонии, собраны в табл. 10.

Из этих данных можно сделать следующие выводы:

1. Два слоя свинцовых сборок, окружающих центральную ТВС со стартовым материалом, обеспечивают существенное увеличение темпа наработки и улучшение изотопного состава плутония по сравнению с одним слоем свинцовых сборок. Темп наработки плутония может быть повышен с 4.0–4.7 кг/год при одном слое до 5.8–7.1 кг/год при двух слоях свинцовых сборок. При этом доля

Таблица 7. Центральная Np-ТВС окружена 18-ю ^{208}Pb -ТВС

t(Np), мм	Pu, кг/год	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, %	$^{236}\text{Pu}/\text{Pu}$, ppm	Pu/Np, %
12	8.78	99.7	158.1	1.07
20	7.63	99.4	14.8	2.57
25	7.39	99.1	4.55	3.90
30	7.30	98.5	3.23	5.54
35	7.13	97.7	1.93	7.37

Таблица 8. Центральная (Np,Am)-ТВС окружена 18-ю Pb-ТВС

t(Np,Am), мм	Pu, кг/год	²³⁸ Pu/Pu, %	²³⁶ Pu/Pu, ppm	Pu/(Np,Am), %
12	6.88	98.8	74.7	0.83
20	6.49	98.6	8.99	2.18
25	6.22	98.1	3.22	3.27
30	6.00	97.6	1.93	4.54
36	5.76	96.7	1.28	6.27

Таблица 9. Центральная (Np,Am)-ТВС окружена 18-ю ²⁰⁸Pb-ТВС

t(Np,Am), мм	Pu, кг/год	²³⁸ Pu/Pu, %	²³⁶ Pu/Pu, ppm	Pu/(Np,Am), %
12	7.98	98.7	146.7	0.97
20	6.99	98.6	22.4	2.35
25	6.46	98.1	5.87	3.39
30	6.22	97.5	3.27	4.70
36	5.97	96.6	1.92	6.51

²³⁸Pu повышается с 83–84% до 97–98%, а доля ²³⁶Pu снижается с 1.8–1.9 ppm до ~1.3 ppm.

2. Замена природного свинца на радиогенный в окружении центральной ТВС несколько увеличивает (примерно на 4%) темп наработки плутония, но ухудшает изотопный состав, снижая долю ²³⁸Pu и повышая долю ²³⁶Pu.

3. Добавление Am-фракции МА к Np-фракции снижает темп наработки плутония (примерно на 10%). Причина в том, что уменьшение доли Np-фракции в стартовом материале не компенсируется вкладом Am-фракции в наработку плутония через более длинную цепочку изотопных переходов. Использование смешанной (Np,Am)-фракции МА вместо Np-фракции слабо меняет изотопный состав плутония.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты расчетов, позволивших оценить возможность крупномасштабной наработки плутония с изотопным составом, пригодным для РИТЭГ, в энергетическом легководном реакторе типа ВВЭР-СКД при использовании нептуниевой и америциевой фракций МА в качестве стартового материала.

Предложена мультифизическая модель взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов активной зоны реактора. Рассмотрены варианты окружения центральной ТВС со стартовым материалом одним и двумя слоями сборок, содержащих природный или радиогенный свинец. Показана принципиальная возможность наработки плутония, пригодного для РИТЭГ по содержанию ²³⁸Pu и ²³⁶Pu, с темпом на уровне 4–7 кг/год. Двухслойное окружение цен-

Таблица 10. Сравнение результатов первой и второй серии расчетов

	Параметр	Один слой Pb-ТВС	Один слой ²⁰⁸ Pb-ТВС	Два слоя Pb-ТВС	Два слоя ²⁰⁸ Pb-ТВС
Np-ТВС	t(Np), мм	80	80	35	35
	Pu, кг/год	4.49	4.66	6.87	7.13
	²³⁸ Pu/Pu, %	84.0	83.1	97.8	97.7
	²³⁶ Pu/Pu, ppm	1.82	1.91	1.25	1.93
(Np,Am)-ТВС	t(Np,Am), мм	80	80	36	36
	Pu, кг/год	4.04	4.20	5.76	5.97
	²³⁸ Pu/Pu, %	84.8	84.0	96.7	96.6
	²³⁶ Pu/Pu, ppm	1.75	1.81	1.28	1.92

тральной ТВС свинцовыми сборками предпочтительнее однослойного по темпу наработки плутония и по его изотопному составу. Вовлечение Ам-фракции в дополнение к Np-фракции МА снижает темп наработки плутония (примерно на 10%) при незначительном изменении его изотопного состава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда, проект № 22-22-00287.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Daily C.R., McDuffee J.L. // Nucl. Technol. 2020. V. 2006. P. 1182.
2. 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. 2008. IAEA.
3. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины. Справочник. 1991. Москва: Энергоатомиздат.
4. Абагян Л.П., Базаянц Н.О., Николаев М.Н. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. 1981. Москва: Энергоатомиздат.
5. Лапин А.С. и др. // Ядерная энергетика. 2020. № 2. С. 93.
6. Международный форум “Поколение IV”. https://ru.frwiki.wiki/wiki/Forum_international_G%C3%A9n%C3%A9ration_IV.
7. Деев В.И., Круглов А.Б., Маслов Ю.А. и др. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета). 2015. Москва: НИЯУ МИФИ.
8. Баранав Ю.Д., Глебов А.П., Кириллов П.Л. и др. // Тр. конф. МНТК-2011. 2011. <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-028.pdf>.
9. Ryzhov S.B., Mohov V.A., Nikitenko M.P., et al. Proc. 5th Intl. Symp. Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSCWR-5). 2011. P. 76.
10. Кузьмин А.М., Шмелев А.Н., Ансэ В.А. Моделирование физических процессов в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах. 2015. Москва: Издательский дом МЭИ.
11. Интернет-программа WaterSteamPro Calculator. www.wsp.ru/ru.

Application of Minor Actinides for the Large-Scale Production of ^{238}Pu in a Supercritical Light-Water Reactor

A. N. Shmelev¹, N. I. Geraskin¹, V. A. Apse¹, V. B. Glebov¹, *, G. G. Kulikov¹, and E. G. Kulikov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: vbglebov@mephi.ru

Received May 2, 2023; revised May 11, 2023; accepted May 15, 2023

Abstract—The paper analyzes a possibility for large-scale production of high-purity plutonium suitable for radioisotope thermo-electrical generators (RITEG) of spacecrafts in a light-water power reactor with supercritical coolant parameters. Neptunium and americium fractions of minor actinides from trans-uranium radioactive wastes were used as the starting materials. The starting materials were placed in central fuel assembly (FA) of the reactor core. It was shown that significant plutonium amounts with low content of ^{236}Pu (below 2 ppm) and high content of ^{238}Pu (above 80%) could be produced in central (Np,Am)-FA surrounded by the assemblies filled up with natural or radiogenic lead. These assemblies play a role of a protective barrier against high-energy fission neutrons emitted by the neighboring UO_2 -FA which are able to increase content of ^{236}Pu through threshold $^{237}\text{Np}(n,2n)^{236}\text{Pu}$ reaction. The paper presents numerical evaluations for production rates of the RITEG-suitable plutonium in central (Np,Am)-FA surrounded by such protective lead-containing assemblies.

Keywords: plutonium-236, plutonium-238, radioisotope thermo-electrical generators, light-water power reactor with supercritical coolant parameters