

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ НАРАБОТКИ $^{238}\text{Pu}$ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР-1000

А.Н. Шмелев\*, Н.И. Гераскин\*, В.А. Апсэ\*, Г.Г. Куликов\*\*,  
Е.Г. Куликов\*, В.Б. Глебов\*

\* НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

\*\* Госкорпорация «Росатом»

119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 24



Приведены расчетные оценки принципиальной возможности крупномасштабной наработки  $^{238}\text{Pu}$  в активной зоне энергетического реактора типа ВВЭР-1000. Предлагается использовать Np-фракцию младших актинидов из состава трансурановых радиоактивных отходов в качестве стартового материала. Облучательное устройство с  $\text{NpO}_2$ -ТВЭлами размещается в центре активной зоны реактора. Варьирование шага решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭлов и окружение облучательного устройства слоем тяжелого замедлителя применяется с целью создания оптимальных спектральных условий для крупномасштабной (~ 3 кг/г.) наработки кондиционного плутония с требуемым изотопным составом (не менее 85%  $^{238}\text{Pu}$  и не более 2 ppm  $^{236}\text{Pu}$ ). Плутоний такого изотопного состава пригоден для использования в качестве теплового источника в радиоизотопных термоэлектрических генераторах и в кардиостимуляторах. Показано, что расчетные масштабы наработки  $^{238}\text{Pu}$  в энергетическом реакторе типа ВВЭР значительно превосходят имеющиеся масштабы его наработки в исследовательских реакторах.

**Ключевые слова:**  $^{238}\text{Pu}$ , радиоизотопные термоэлектрические генераторы, облучательное устройство, реакторы типа ВВЭР-1000.

**Для цитирования:** Шмелев А.Н., Гераскин Н.И., Апсэ В.А., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Глебов В.Б. Оценка возможности крупномасштабной наработки  $^{238}\text{Pu}$  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>

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изотоп плутония  $^{238}\text{Pu}$  характеризуется периодом полураспада  $T_{1/2} = 87,7$  лет. Эта величина, с одной стороны, сравнительно небольшая для того, чтобы можно было говорить о мощном удельном тепловыделении (~ 570 Вт/кг), а с другой стороны, до-

статочно значительная для того, чтобы можно было говорить о том, что тепло будет выделяться в течение продолжительного времени.

Эти свойства делают изотоп плутония  $^{238}\text{Pu}$  ценным источником тепловой и электрической энергии для использования в радиоизотопных термоэлектрических генераторах (РИТЭГ) космических аппаратов и в кардиостимуляторах [1].

Вместе с тем, имеющиеся в настоящее время в России и мире мощности по его наработке недостаточны и не покрывают растущие годовые потребности [2, 3]. В основном, этот изотоп нарабатывается в исследовательских реакторах.

Следует отметить, что задача наработки  $^{238}\text{Pu}$  сопряжена с необходимостью соблюдения ряда требований (например, NASA) по его пригодности для космических РИТЭГ – содержание  $^{238}\text{Pu}$  – не менее 85%, доля  $^{236}\text{Pu}$  – не более 2 ppm [4], усложняет решение исходной задачи. Целью данного исследования является оценка возможности создания оптимальных спектральных условий в облучательном устройстве (ОУ) для крупномасштабной наработки плутония, пригодного для РИТЭГ, путем подбора шага решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛов и окружения ОУ слоем тяжелого замедлителя.

По нашим предварительным оценкам замена семи урановых ТВС в центре активной зоны ВВЭР-1000 на семь сборок облучательного устройства приведет к падению мощности реактора на уровне 5%. Однако эта потеря, вероятно, может быть хотя бы частично компенсирована наработкой килограммовых количеств  $^{238}\text{Pu}$ , стоимость которого оценивают в 4000\$ за грамм [5]. Тем не менее, авторы понимают необходимость дальнейшего обоснования безопасности реактора при его двухцелевом режиме работы.

## МЕТОДЫ

### Способ наработки $^{238}\text{Pu}$

Предлагается размещение облучательного устройства в центре активной зоны реактора ВВЭР-1000 (рис. 1). Основные параметры реактора ВВЭР-1000 и ТВС следующие [6]:

- тепловая мощность реактора – 3200 МВт;
- число ТВС в активной зоне реактора – 163;
- топливо – диоксид обогащенного урана (4.4%  $^{235}\text{U}$ ), плотность – 10.7 г/см<sup>3</sup>;
- оболочка ТВЭЛов – сплав 99%Zr-1%Nb, плотность – 6.5 г/см<sup>3</sup>;
- теплоноситель – легкая вода, плотность – 0.73 г/см<sup>3</sup>;
- размер гексагональной ТВС «под ключ» – 23.4 см;
- диаметр топливной таблетки – 7.57 мм;
- диаметр центрального отверстия – 1.40 мм;
- толщина зазора между топливом и оболочкой – 0.075 мм;
- толщина оболочки – 0.65 мм;
- шаг треугольной решетки ТВЭЛов – 12.75 мм;
- высота топливного столба – 353 см.

Облучательное устройство представляет собой конфигурацию из семи ТВС реактора ВВЭР-1000. В центре ОУ располагается стандартная ТВС реактора ВВЭР-1000, в которой диоксид обогащенного урана заменен на двуокись нептуния  $\text{NpO}_2$  (рис. 2). Именно нептуний является наиболее подходящим стартовым материалом для наработки  $^{238}\text{Pu}$  [7]. А конфигурация и состав шести ТВС, окружающих ее, подбирались таким образом, чтобы усилить темп наработки  $^{238}\text{Pu}$  в  $\text{NpO}_2$ -ТВС.

Предпочтительный спектр (область резонансов  $^{237}\text{Np}$ ) формируется путем гетерогенной структуры ОУ, т.е. вокруг ТВС с  $^{237}\text{Np}$  размещаются ТВС, содержащие замедлитель с большим атомным весом и малым поглощением нейтронов (Pb, Bi, Pb-Bi эвтектика, радиогенный свинец,  $^{208}\text{Pb}$ ) (рис. 3).

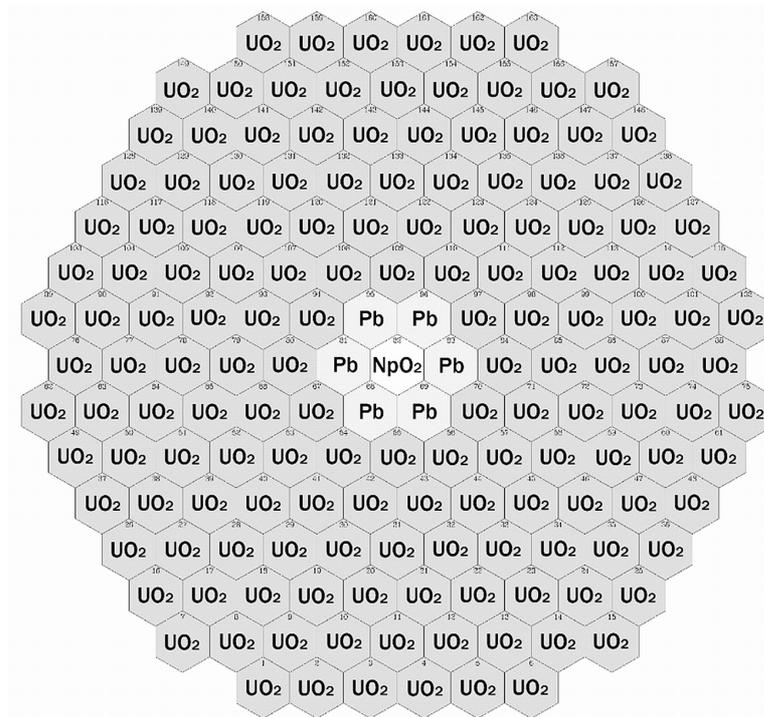


Рис. 1. Размещение облучательного устройства в активной зоне реактора ВВЭР-1000

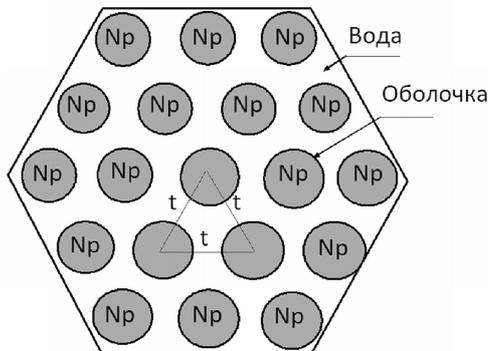


Рис. 2. ТВС со стартовым материалом в форме  $NpO_2$  ( $t$  – шаг треугольной решетки Np-стержней)

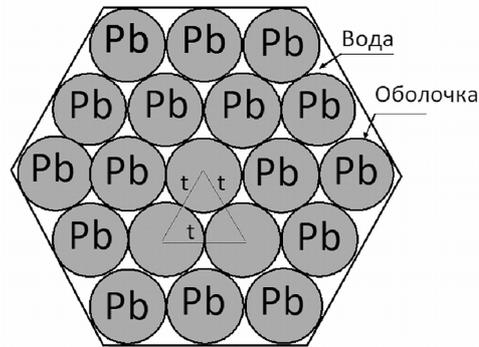


Рис. 3. ТВС с тяжелым свинцовым замедлителем ( $t$  – шаг треугольной решетки твэлов)

Для формирования предпочтительного спектра особенно эффективно применение  $^{208}Pb$ , который характеризуется предельно малым поглощением нейтронов и, следовательно, позволяет повысить плотность потока нейтронов в мишенном материале. Его применение тем самым ускоряет наработку целевого нуклида. Использование  $^{208}Pb$  открывает и другие важные преимущества, включая увеличение Доплер-эффекта и среднего времени жизни мгновенных нейтронов.

Предварительные расчеты показали, что гетерогенная конфигурация ОУ позволяет создать в реакторе обширную область с высоким потоком нейтронов, а также с предпочтительным для облучения  $^{237}Np$  спектром нейтронов. Как следствие, при таком способе имеется возможность для эффективной и масштабной наработки  $^{238}Pu$  высокой кондиции.

### Математическая модель

Для проведения нейтронно-физических расчетов использовалась компьютерная программа TIME26 [8], рассматривающая радиальные модели ядерных установок в 26-групповом диффузионном приближении. Константное обеспечение программы основано на библиотеке оцененных ядерных данных БНАБ [9], которая обрабатывается вспомогательной программой АРАМАКО-С1 для подготовки заблокированных микросечений в каждой зоне ядерной установки.

Геометрическая модель активной зоны реактора ВВЭР-1000 представляла собой систему из 8 кольцевых слоев гексагональных ТВС, отделенной от корпуса реактора слоем воды (рис. 4).

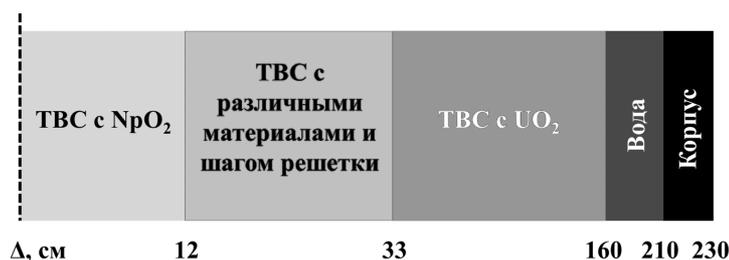


Рис. 4. Радиально-кольцевая модель реактора ВВЭР-1000

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В начальном варианте № 1 все 163 ТВС были стандартными  $UO_2$ -ТВС реактора ВВЭР-1000 (облучательное устройство отсутствует). Следующие варианты учитывали наличие ОУ, т.е. центральная  $NpO_2$ -ТВС окружалась слоем из шести соседних ТВС, в состав которых входили следующие материалы:

- вариант № 2 – слой стандартных  $UO_2$ -ТВС;
- вариант № 3 – слой легкой воды;
- вариант № 4 – стержни из природного свинца в Zr-Nb-оболочке;
- вариант № 5 – стержни из  $^{208}Pb$  в Zr-Nb-оболочке.

Причиной введения стержней из  $^{208}Pb$  в вариант №5 были два важных обстоятельства. Изотоп свинца  $^{208}Pb$  характеризуется очень слабым поглощением нейтронов и способностью смещать спектр замедляющихся нейтронов в резонансную область, что может повысить темп наработки  $^{238}Pu$  в центральной  $NpO_2$ -ТВС.

Для вариантов № 2–5 были просчитаны параметры, характеризующие темп наработки и изотопный состав плутония в центральной  $NpO_2$ -ТВС. Расчеты проводились в условиях неизменного шага треугольной решетки твэлов в ТВС – 12.75 мм. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Параметры наработки плутония в облучательном устройстве реактора ВВЭР-1000

№ варианта	Темп наработки плутония, кг Pu/г.	Доля $^{238}Pu/Pu$ , %	Доля $^{236}Pu/Pu$ , ppm
1	3.50	1.5	0
2	3.92	99.5	158
3	1.11	99.6	51
4	3.76	99.5	21.4
5	4.24	99.3	21.3

Видно, что помещение  $\text{NpO}_2$ -ТВС в активную зону реактора без свинцового окружения приводит к наработке плутония с большой долей нежелательного  $^{236}\text{Pu}$ . Помещение воды в ТВС-окружения (вариант 3) приводит к резкому снижению интенсивности наработки  $^{238}\text{Pu}$ . А помещение свинцового замедлителя в ТВС окружения значительно улучшило показатели по темпу наработки плутония и по его изотопному составу. Однако все рассмотренные варианты не удовлетворили ограничению по доле  $^{236}\text{Pu}$  в плутонии, так как их доли оказались заметно выше допустимых 2 ppm.

Очевидно, что доля  $^{236}\text{Pu}$  в плутонии может быть снижена за счет смягчения спектра нейтронов в центральной  $\text{NpO}_2$ -ТВС, т.е. за счет уменьшения скорости  $^{237}\text{Np}$  (n,2n)  $^{236}\text{Pu}$ -реакции. Для этого были просчитаны варианты центральной  $\text{NpO}_2$ -ТВС, в которых увеличен шаг треугольной решетки  $\text{NpO}_2$ -стержней с соответствующим увеличением доли воды в ТВС. Это должно привести к смягчению спектра облучения стартового материала.

Кроме этого рассматривалось влияние шага тесной решетки свинцовых стержней в Рb-ТВС на показатели нарабатываемого плутония. Для шага решетки  $\text{NpO}_2$ -стержней, равного 12.75 мм, в табл. 2 показано изменение темпа наработки и изотопного состава плутония с ростом шага Рb-стержней. Полученные результаты показали слабое влияние шага решетки свинцовых стержней на показатели нарабатываемого плутония. Поэтому в целях сокращения избыточных расчетных данных было принято решение проводить дальнейшие расчеты с неизменным шагом решетки Рb-стержней 40 мм.

Таблица 2

**Темп наработки и изотопный состав плутония с ростом шага Рb-стержней**

	Шаг решетки Рb-стержней, мм			
	12.75	20	30	40
Масса Pu, кг	3.76	3.83	3.87	3.89
Доля $^{238}\text{Pu}$ , %	99.5	99.2	99.2	99.2
Доля $^{236}\text{Pu}$ , ppm	21.4	21.1	20.9	20.8
Pu / Np, %	0.78	0.79	0.80	0.80

В таблице 3 показано изменение темпа наработки и изотопного состава плутония с ростом шага  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ при окружении шестью Рb-ТВС.

Видно, что с увеличением шага нептуниевых ТВЭЛОВ (т.е. увеличения доли воды) содержание  $^{236}\text{Pu}$  падает до требуемой нормы (2 ppm). Доля  $^{238}\text{Pu}$  также несколько

Таблица 3

**Темп наработки и изотопный состав плутония с ростом шага решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ. Окружение шестью Рb-ТВС**

	Шаг решетки $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ, мм			
	12.75	20	30	47
Количество стартового материала Np, кг	484	197	87.5	35.6
Масса Pu, кг	3.89	3.59	3.15	2.45
Доля $^{238}\text{Pu}$ , %	99.2	98.2	96.0	91.6
Доля $^{236}\text{Pu}$ , ppm	20.8	7.5	3.6	1.9

снижается, оставаясь, тем не менее, выше нормы по качеству нарабатываемого плутония (доля  $^{238}\text{Pu}$  более 85%).

В силу особенно привлекательных свойств  $^{208}\text{Pb}$  были проведены расчеты вариантов дизайна ОУ, в которых центральная  $\text{NpO}_2$ -ТВС окружена шестью  $^{208}\text{Pb}$ -ТВС. В расчетах варьировались шаги решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ (12.75 мм / 20 мм / 30 мм / 44 мм/). В силу незначительного влияния изменение шага решетки  $^{208}\text{Pb}$ -стержней не рассматривалось. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Темп наработки и изотопный состав плутония с ростом шага решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ. Окружение шестью  $^{208}\text{Pb}$ -ТВС**

	Шаг решетки $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ, мм			
	12.75	20	30	44
Количество стартового материала $\text{Np}$ , кг	484	197	87.5	40.7
Масса $\text{Pu}$ , кг	4.47	4.16	3.70	3.06
Доля $^{238}\text{Pu}$ , %	99.1	97.9	95.2	91.0
Доля $^{236}\text{Pu}$ , ppm	20.8	7.0	3.3	1.9

Видно, что при переходе к  $^{208}\text{Pb}$  для варианта широкой решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ масса наработанного плутония увеличивается на 25%, а удельная наработка повышается на 9%. При этом качество  $^{238}\text{Pu}$  как для природного свинца, так и для  $^{208}\text{Pb}$  удовлетворяет критерию – доля  $^{236}\text{Pu} \leq 2$  ppm.

На рисунке 5 показана зависимость удельной наработки плутония (на единицу массы загружаемого нептуния) от увеличения шага нептуниевых ТВЭЛОВ в вариантах использования природного свинца и  $^{208}\text{Pb}$  в ТВС окружения. Очевиден значительный рост (в восемь и более раз) удельной наработки плутония с ростом шага  $\text{Np}$ -решетки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных выше результатов по расчету наработки  $^{238}\text{Pu}$  позволяет сделать следующие выводы.

1. Отсутствие замедлителя вокруг  $\text{Np}$ -мишени приводит к наработке плутония с очень большой долей нежелательного изотопа  $^{236}\text{Pu}$  (превышение допустимой величины в 60 раз).

2. Помещение воды вместо ТВС-окружения (вариант 3 дизайна ОУ) приводит к четырехкратному снижению интенсивности наработки  $^{238}\text{Pu}$ , хотя и значительно понижает долю  $^{236}\text{Pu}$ .

3. Прослойка из  $^{208}\text{Pb}$  пропускает существенно больше мягких нейтронов, стимулируя этим накопление плутония в ОУ. В результате замена  $\text{Pb}$  на  $^{208}\text{Pb}$  приводит к повышению накопления плутония в ОУ до 4.24 кг/г. при той же доле  $^{236}\text{Pu}$ .

4. Помещение свинцового окружения  $\text{NpO}_2$ -ТВС поддерживает интенсивную наработку плутония и одновременно значительно снижает долю нежелательного  $^{236}\text{Pu}$ . Однако доля этого изотопа остается выше допустимой ~ 10 раз.

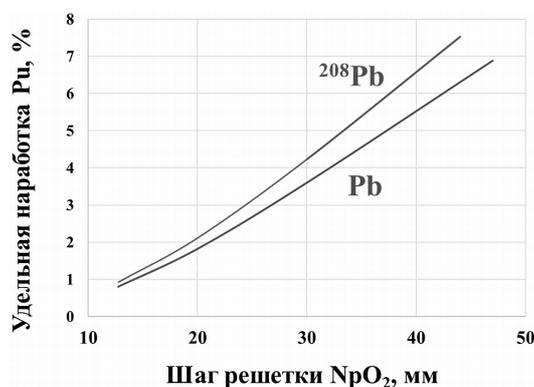


Рис. 5. Удельная наработка плутония при увеличении шага нептуниевых ТВЭЛОВ в вариантах использования природного свинца и  $^{208}\text{Pb}$  в ТВС окружения

5. Увеличение шага тесной решетки свинцовых стержней (слой 2 радиальной модели) по сравнению с стандартным шагом  $h=12.75$  мм слабо влияет на показатели нарабатываемого плутония. Это обстоятельство позволило вести дальнейшие расчеты с неизменным шагом решетки свинцовых стержней.

6. Принципиально важную роль играет увеличение доли воды в  $\text{NpO}_2$ -ТВС. При этом содержание  $^{236}\text{Pu}$  падает до требуемой нормы (2 ppm), а доля  $^{238}\text{Pu}$  остается в пределах нормы по качеству нарабатываемого плутония (доля  $^{238}\text{Pu}$  более 85%).

7. С увеличением доли воды в  $\text{NpO}_2$ -ТВС наблюдается значительный рост (в восемь и более раз) удельной наработки плутония. Это приводит к тому, что даже при сокращении количества стартового материала с 484 до 35.6 кг наработка плутония в ОУ сокращается лишь в 1.6 раза. При этом плутоний становится кондиционным (доля  $^{236}\text{Pu}$  менее 2 ppm). Переход от природного свинца к  $^{208}\text{Pb}$  приводит к дальнейшему повышению на 9% его удельной наработки.

8. В случае прослойки из природного свинца наилучшие параметры плутония достигаются при шаге решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ в 47 мм. При этом накапливается 2.35–2.45 кг плутония, содержащего 91.6–91.9%  $^{238}\text{Pu}$  и 1.9–2 ppm  $^{236}\text{Pu}$ .

9. В случае прослойки из  $^{208}\text{Pb}$  наилучшие параметры плутония достигаются при шаге решетки  $\text{NpO}_2$ -ТВЭЛОВ в 44 мм. При этом накапливается 2.88–3.06 кг плутония, содержащего 91.0–91.3%  $^{238}\text{Pu}$  и 1.9–2 ppm  $^{236}\text{Pu}$ .

### **Благодарность**

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

### **Литература**

1. Пустовалов А.А., Гусев В.В., Панкин М.И., Сметанников В.П. Состояние, области применения и перспективы использования РИТЭГ на плутонии-238 для исследования планет Солнечной системы // Тезисы международной конференции «Ядерная энергетика в космосе-2005». – М.: НИКИЭТ, 2005. – С. 14.
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](https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/09/f26/Final_Startup_Plan_for_Plutonium238.pdf) (дата доступа 20.07.2023).
3. Alexander Austin, Young H. Lee, Brian K. Bairstow. Nuclear and Emerging Technologies for Space. American Nuclear Society Topical Meeting Richland, WA, February 25-28, 2019.
4. Daily C.R., McDuffee J.L. Design studies for the optimization of  $^{238}\text{Pu}$  production in  $\text{NpO}_2$  targets irradiated at the High Flux Isotope Reactor. Nuclear Technology. 2020, vol. 206, pp. 1182-1194; DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1674594>.
5. The VVER today: Evolution, Design, Safety. Электронный ресурс: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf> (дата доступа 10.11.22).
6. Shmelev A.N., Geraskin N.I., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Apse V.A., Glebov V.B. The problem of large-scale production of plutonium-238 for autonomous energy sources // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1689. Issue 111. Paper No. 012030; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012030>.
7. Кузьмин А.М., Шмелев А.Н., Ансэ В.А. Моделирование физических процессов в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
8. Janis. Nuclear Energy Agency. Электронный ресурс: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_39910/janis](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis) (дата доступа 10.11.22).

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.

**Авторы**

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор

E-mail: [shmelan@mail.ru](mailto:shmelan@mail.ru)

Гераскин Николай Иванович, доцент

E-mail: [nigeraskin@mephi.ru](mailto:nigeraskin@mephi.ru)

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС

E-mail: [apseva@mail.ru](mailto:apseva@mail.ru)

Куликов Геннадий Генрихович, главный эксперт

E-mail: [gegkulikov@rosatom.ru](mailto:gegkulikov@rosatom.ru)

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент,

E-mail: [egkulikov@mephi.ru](mailto:egkulikov@mephi.ru)

Глебов Василий Борисович, с.н.с.

E-mail: [vbglebov@mephi.ru](mailto:vbglebov@mephi.ru)

UDC 621.039.8

## **Assessment of the Possibility for Large-Scale $^{238}\text{Pu}$ Production in a VVER-1000 Power Reactor**

Shmelev A.N.\*, Geraskin N.I.\*, Apse V.A.\*, Kulikov G.G.\*\*, Kulikov E.G.\*, Glebov V.B.\*

\* МЭФИ

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

\*\* State Atomic Energy Corporation ROSATOM

24 Bolshaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

### ABSTRACT

The paper presents the estimates for the possibility for large-scale production of  $^{238}\text{Pu}$  in the core of a VVER-1000 power reactor. The Np-fraction of minor actinides extracted from transuranic radioactive waste is proposed to be used as the starting material. The irradiation device with  $\text{NpO}_2$  fuel elements is installed at the reactor core center. The  $\text{NpO}_2$  fuel lattice pitch is varied and the irradiation device is surrounded by a heavy moderator layer to create the best possible spectral conditions for large-scale production (~ 3 kg/year) of conditioned plutonium with the required isotopic composition (not less than 85% of  $^{238}\text{Pu}$  and not more than 2 ppm of  $^{236}\text{Pu}$ ). Plutonium with such isotopic composition can be used as the thermal source in thermoelectric radioisotope generators and in cardiac pacemakers. It has been demonstrated that the estimated scale of the  $^{238}\text{Pu}$  production in a VVER-type power reactor exceeds considerably the existing scale of its production in research reactors.

**Key words:**  $^{238}\text{Pu}$ , thermoelectric radioisotope generators, irradiation device, VVER-1000 reactors.

**For citation:** 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  $^{238}\text{Pu}$  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).

### REFERENCES

1. *Pustovalov A.A., Gusev V.V., Pankin M.I., Smetannikov V.P.* Current state, application areas and prospects for future use of radioisotope thermoelectric generators (RTG) on plutonium-238 for planetary investigations of the Solar system. Proceedings of the International Conference Nuclear power in Space. Moscow. NIKIET, 2005, p. 14 (in Russian).

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](https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/09/f26/Final_Startup_Plan_for_Plutonium238.pdf) (accessed July 20, 2023).

3. *Alexander Austin, Young H. Lee, Brian K. Bairstow*. Nuclear and Emerging Technologies for Space. American Nuclear Society Topical Meeting Richland, WA, February 25-28, 2019.

4. *Daily C.R., McDuffee J.L.* Design studies for the optimization of  $^{238}\text{Pu}$  production in  $\text{NpO}_2$  targets irradiated at the High Flux Isotope Reactor. *Nuclear Technology*. 2020, vol. 206, pp. 1182-1194; DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1674594>.

5. The VVER today: Evolution, Design, Safety. Available at: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf> (accessed July 20, 2023).

6. *Shmelev A.N., Geraskin N.I., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Apse V.A., Glebov V.B.* The problem of large-scale production of plutonium-238 for autonomous energy sources. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1689, issue 111, paper No. 012030; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012030>.

7. *Kuz'min A.M., Shmelev A.N., Apse V.A.* Simulation of physical processes in power nuclear reactors on fast neutrons. Moscow. MPEI Publishing House, 2015.

8. Janis. Nuclear Energy Agency. Available at: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_39910/janis](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis) (accessed July 20, 2023).

### Authors

Anatoly N. Shmelev, Professor

E-mail: [shmeln@mail.ru](mailto:shmeln@mail.ru)

Nikolay I. Geraskin, Assistant Professor

E-mail: [nigeraskin@mephi.ru](mailto:nigeraskin@mephi.ru)

Vladimir A. Apse, Head of the Scientific and Research Sector

E-mail: [apseva@mail.ru](mailto:apseva@mail.ru)

Gennady G. Kulikov, Chief Expert

E-mail: [gegkulikov@rosatom.ru](mailto:gegkulikov@rosatom.ru)

Evgeny G. Kulikov, Assistant Professor

E-mail: [egkulikov@mephi.ru](mailto:egkulikov@mephi.ru)

Vasily B. Glebov, Senior Researcher

E-mail: [vbglebov@mephi.ru](mailto:vbglebov@mephi.ru)