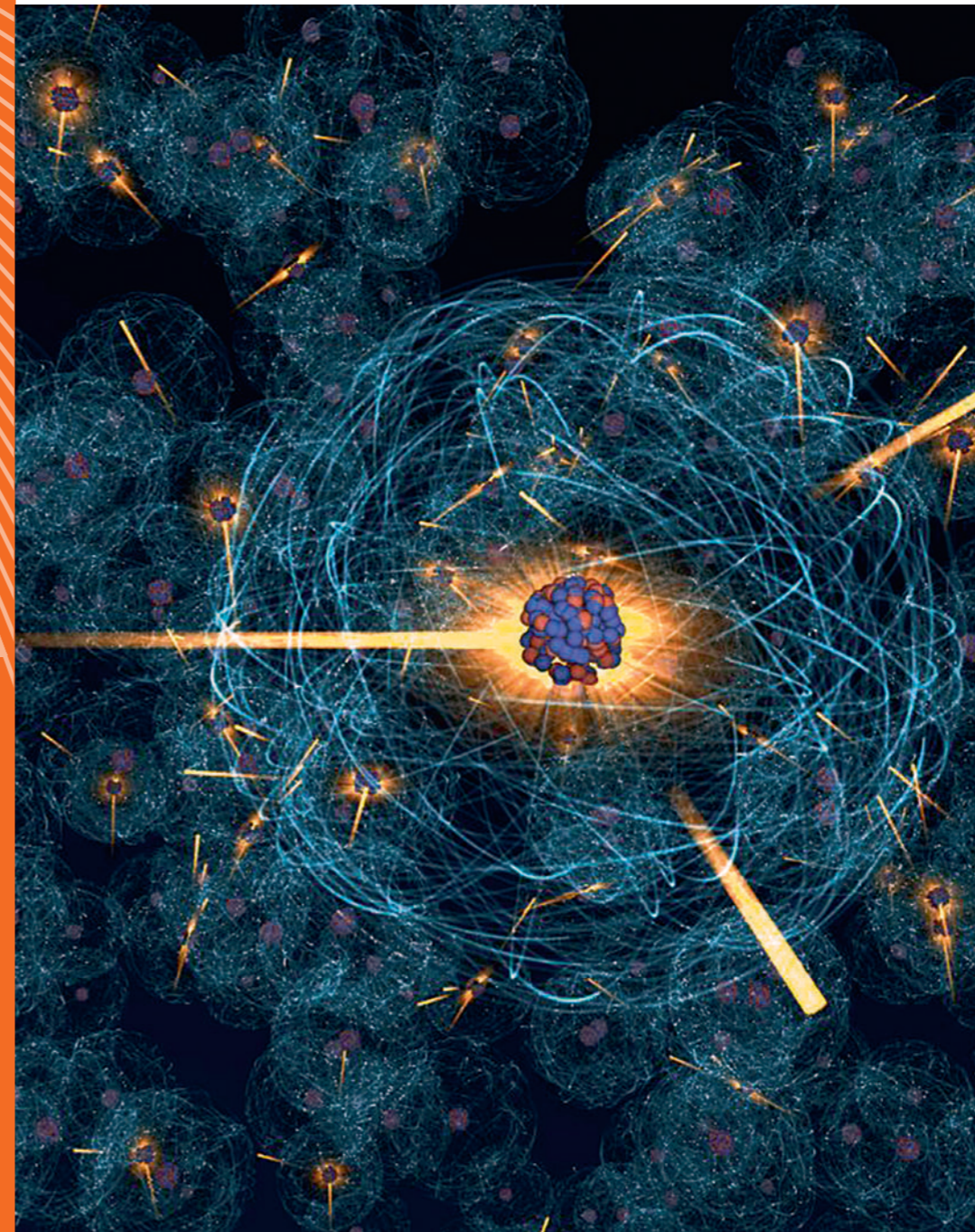




НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ



**ОБЗОР ПОДХОДОВ
К ТРАНСМУТАЦИИ МА
В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ**

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
НАПРАВЛЕНИЯ
ТРАНСМУТАЦИИ МА**

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ
ОЦЕНКА И СРАВНЕНИЕ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ
ТРАНСМУТАЦИИ МА**

**АНАЛИЗ УРОВНЯ
ГОТОВНОСТИ РОССИЙСКИХ
ТЕХНОЛОГИЙ
ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ
И РАЗДЕЛЕНИЯ МА**

Государственная корпорация
по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований
и разработок

Москва
2021

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований и разработок

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ

Москва
2021

УДК 621.039

ББК 31.4

П 27

П 27 Перспективные технологии утилизации минорных актинидов. / Андрианов А.А., Архангельский Н.В., Журавлёв И.Б., Квятковский С.А., Птицын П.Б.; М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 102 с.

ISBN 978-5-498-00804-2

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021

Подписано в печать 20.08.2021. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура «Rosatom». Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,86.

Тираж 150 экз. Заказ № 6298.

Отпечатано в ООО «Элефант»:

610040, г. Киров, ул. Мостовая, д. 32/7,

www.hibox.pro

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:

Перспективные технологии утилизации минорных актинидов.

АВТОРЫ:

Андреанов А.А., Руководитель группы разработки АИ и ИИ, Центр аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

Архангельский Н.В., Аналитик группы ПННТР Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации», кандидат технических наук.

Журавлёв И.Б., Руководитель группы приоритетных направлений НТР, Центр аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

Квятковский С.А., Аналитик отдела ЯТЦ, Центр аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

Птицын П.Б., Заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Троянов В.М., Научный руководитель АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Хаперская А.В., Старший менеджер Проектного офиса «Формирование системы обращения с ОЯТ», Госкорпорация «Росатом».

РЕФЕРАТ:

В данном аналитическом исследовании детально рассмотрены ядерно-физические свойства основных изотопов МА, влияющие на способы дальнейшего обращения с ними (длительное хранение, трансмутация, захоронение), приведены как теоретические основы трансмутации МА в ядерных реакторах, так и описание результатов расчётных исследований, выполненных различными иностранными и международными научными коллективами, целью которых было изучение возможностей утилизации МА в действующих и перспективных ядерных энергетических установках. Кроме того, приведено описание реакторных экспериментов по трансмутации МА.

Особое внимание уделено анализу отечественных вариантов обращения с МА. Представлена информация с описанием результатов расчётных и экспериментальных работ, на основе которой подготовлены данные и проведены многокритериальная оценка и сравнение вариантов трансмутации МА в быстрых реакторах с натриевым или свинцовым теплоносителем, ЖСР с двумя типами топливной соли и в гибридных системах с термоядерным источником нейтронов. Применение многокритериального подхода позволило представить комплексную оценку для каждой из опций, провести их сравнение и дать рекомендации.

Аналитический отчёт подготовлен в рамках Плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (ЦАИР) на 2019–2020 гг. (п. 4.10).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

трансмутация, минорные актиниды, БН, БРЕСТ, ЖСР, ГТР, многокритериальная оценка, сравнительный анализ, переработка ОЯТ, фракционирование МА.

ЦИТИРОВАНИЕ:

Перспективные технологии утилизации минорных актинидов. / Андреанов А.А., Архангельский Н.В., Журавлёв И.Б., Квятковский С.А., Птицын П.Б.; М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 108 с. – Рус. – Деп. 21.05.21, № 35-В2021.

TITLE:

Advanced Reactor Technologies for Minor Actinides Utilization.

AUTHORS:

Andrianov A.A., Arkhangelsky N.V., Zhuravlev I.B., Kviatkovskii S.A., Ptitsyn P.B., Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovation», SC ROSATOM.

REVIEWERS:

Troyanov V.M., JSC IPPE.

Khaperskaya A.V., State Atomic Energy Corporation Rosatom.

ABSTRACT:

This analytical study described in detail main nuclear physical properties of minor actinides which affect to the subsequent handling with them (long-term storage, transmutation or geological disposal). Presented theoretical bases of minor actinides transmutation in various types of nuclear reactors and the results of calculative studies performed by national and international research teams. The description of experiments on minor actinides transmutation in nuclear reactors is presented.

Special attention is given to the comparison and analysis of domestic options of minor actinides transmutation. A description of national programs, calculative researchs and experimental studies in this area is presented. Carried out of multicriteria assessment and comparison of minor actinides transmutation options in fast reactors with sodium or lead coolants, in a two type of molten salt reactors, and in a hybrid thermonuclear reactor. Application of a multicriteria approach made it possible to present a comprehensive assessment for each of the transmutation options, compare them and make recommendations.

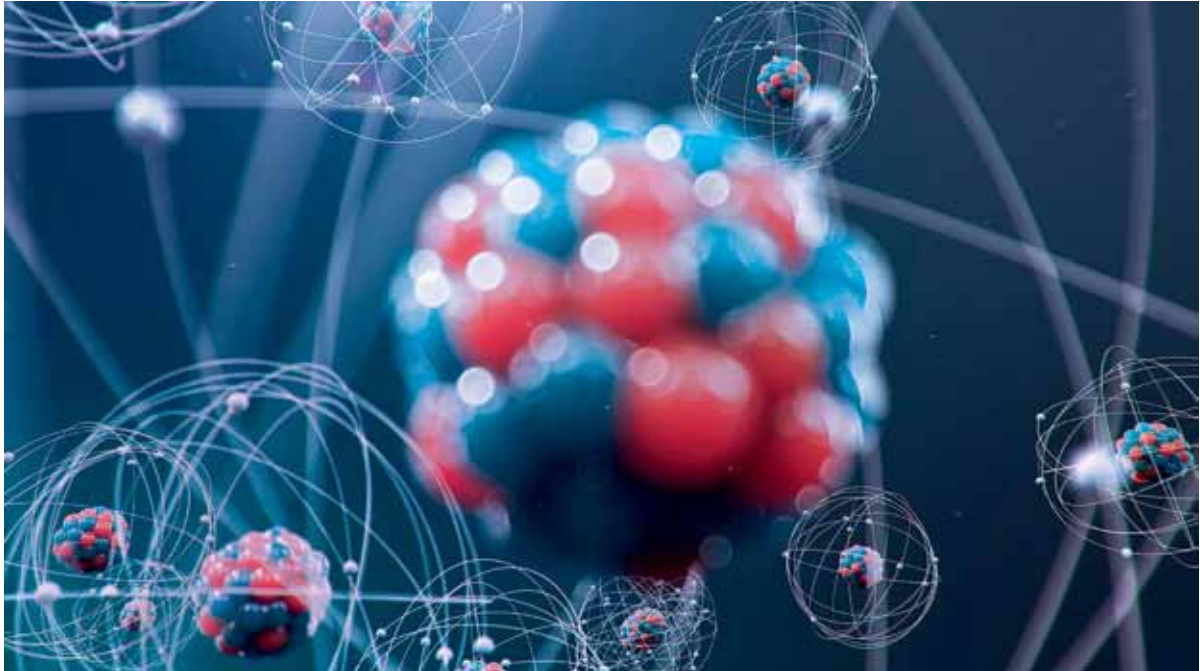
KEY WORDS:

transmutation, minor actinides, BN, BREST, molten salt reactor, hybrid thermonuclear reactor, multicriteria assessment, comparative analysis, SNF reprocessing, minor actinides separation.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ.....	9
1.1. Минорные актиниды и их влияние на обращение с ОЯТ.....	9
1.2. Теоретическое обоснование трансмутации МА.....	15
1.3. Выводы.....	19
2. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УТИЛИЗАЦИИ МА В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ.....	21
2.1. Возможность утилизации МА в действующих ядерных реакторах.....	22
2.1.1. Утилизация МА в реакторах типа LWR.....	22
2.1.2. Утилизация МА в тяжеловодных реакторах.....	23
2.1.3. Утилизация МА в высокотемпературных реакторах с тепловым спектром нейтронов.....	23
2.1.4. Утилизации МА в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем.....	25
2.2. Утилизация МА в перспективных ядерных реакторах.....	29
2.2.1. Утилизация МА в быстрых критических реакторах со свинцовым теплоносителем.....	29
2.2.2. Утилизации МА в жидкосолевых реакторах (ЖСР).....	30
2.2.3. Утилизации МА в электроядерных установках.....	32
2.3. Выводы.....	33
3. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ МА.....	35
3.1. Утилизация МА в быстрых твердотопливных реакторах.....	36
3.1.1. Утилизация МА в реакторе БН.....	36
3.1.2. Утилизация МА в реакторе со свинцовым теплоносителем.....	41
3.2. Утилизация МА в реакторе ЖСР.....	45
3.3. Утилизация МА в гибридных реакторах с термоядерным источником нейтронов.....	47
3.4. Выводы.....	53
4. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТРАНСМУТАЦИИ МА.....	55
4.1. Отбор критериев и методика сравнения технологий.....	56
4.2. Результаты оценок и их анализ.....	66
4.3. Анализ на чувствительность и неопределённость.....	70
4.4. Выводы.....	73

5. ПЕРЕРАБОТКА И ХРАНЕНИЕ	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	81
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	95
ПРИЛОЖЕНИЕ В	99





ВВЕДЕНИЕ

Проблема накопления ОЯТ и РАО становится всё более актуальной для мировой ядерной энергетики. С момента запуска первого энергетического реактора и до настоящего времени с АЭС мира суммарно было выгружено более 400 тыс. тонн ОЯТ [1, 2], содержащего в среднем 1% Pu и 0,1% МА. Около трети от этого объёма ОЯТ направлено на переработку, но только часть выделенного Pu и регенерированного U повторно используются для производства свежего ядерного топлива, а МА и ПД направляются в пункты временного хранения. Это означает, что общемировой объём накопленных МА составляет порядка 400 тонн, из которых 300 тонн содержатся в составе ОЯТ и примерно 100 тонн находятся в выделенной форме. Если рассматривать данный вопрос только в отношении России, то к настоящему моменту накоплено порядка ~5 тонн выделенных МА из переработанного ОЯТ реакторов ВВЭР-440, около ~10 тонн находятся в составе ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и ещё порядка ~10 тонн – в ОЯТ реакторов РБМК-1000. По прогнозным оценкам, в России за время эксплуатации ВВЭР до 2100 года может быть накоплено ~188 тонн МА [3].

Одним из условий достижения устойчивого развития ЯЭ является минимизация отходов, которые не должны быть бременем для будущих поколений. Радикальное сокращение объёмов МА, содержащихся в ОЯТ

энергетических реакторов, возможно за счёт их трансмутации – перевода долгоживущих радиоактивных изотопов в короткоживущие или стабильные при их облучении в ядерных реакторах. Однако различие свойств МА, характеристик различных типов ядерных реакторов и способов трансмутации требует как проведения комплексной оценки и выбора путей обращения с отдельными нуклидами – ^{237}Np , Am, Cm, так и ответа на общий вопрос об актуальности задачи по трансмутации МА.



С полными версиями аналитических отчетов отраслевого Центра аналитических исследований и разработок можно ознакомиться на следующих ресурсах:

1. Портал отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)



2. Раздел отраслевого Центра аналитических исследований и разработок на портале «Страна Росатом» (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)

