



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАСШИРЕНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



**ОБЩЕМИРОВАЯ
И ОТЕЧЕСТВЕННАЯ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ
БАЗА УРАНА И ПРОГНОЗЫ
ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ**

**ОСОБЕННОСТИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ
ВОВЛЕЧЕНИЯ
НЕТРАДИЦИОННЫХ
И ВТОРИЧНЫХ
ИСТОЧНИКОВ УРАНА**

**ПЛУТЕНИЙ И ТОРИЙ
КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ
РЕСУРСНЫЕ
ИСТОЧНИКИ**

**ВОЗМОЖНОСТИ
ГИБРИДНЫХ РЕАКТОРОВ
«СИНТЕЗ-ДЕЛЕНИЕ»
ПО РАСШИРЕНИЮ
РЕСУРСНОЙ БАЗЫ**



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

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

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАСШИРЕНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Москва
2022

УДК 621.311

ББК 31.4

П 27

П 27 Перспективные источники расширения ресурсной базы атомной энергетики. Аналитический отчёт / Журавлёв И.Б., Квятковский С.А., Птицын П.Б., Сафиканов Д.И. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 150 с.

ISBN 978-5-498-00905-6

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022

Подписано в печать 2.09.2022. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.
Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,44.
Тираж 100 экз. Заказ № 6182.

Отпечатано в ООО «Элефант»:
610040, г. Киров, ул. Мостовая, д. 32/7,
www.hibox.pro

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:

Перспективные источники расширения ресурсной базы атомной энергетики.

АВТОРЫ:

Журавлёв И.Б., руководитель группы ПННТР отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации», кандидат технических наук.

Квятковский С.А., аналитик отдела ЯТЦ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

Птицын П.Б., заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

Сафиканов Д.И., главный специалист отдела ЯТЦ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Белинский Л.Л., старший менеджер проектного офиса «Формирование системы обращения с ОЯТ» Госкорпорации «Росатом».

Иванов К.В., руководитель проектного офиса «Формирование системы обращения с ОЯТ» Госкорпорации «Росатом».

Кармацкий В.И., старший руководитель направления отдела анализа рынков АО «Техснабэкспорт».

Субботин С.А., начальник отдела стратегических исследований (ОСИ) Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики (ККПАЭ) НИЦ «Курчатовский институт».

РЕФЕРАТ:

Данный аналитический отчёт содержит оценки имеющейся традиционной минерально-сырьевой базы урана и её достаточности для обеспечения функционирования мировой и отечественной ЯЭ на длительном временном промежутке на основе различных прогнозных сценариев. Рассматривается возможность расширения ресурсной базы ЯЭ за счёт как вовлечения нетрадиционных и вторичных источников урана, так и использования плутония, тория, а в перспективе гибридных реакторов синтез-деление.

Представленный анализ показывает, что в целом мировых разведанных ресурсов урана достаточно для обеспечения потребностей большинства сценариев развития ЯЭ как минимум до конца этого столетия даже без учёта вовлечения вторичных источников урана, доля которых в обеспечении потребностей ЯЭ будет снижаться в ближне- и среднесрочной перспективе. Использование нетрадиционных источников урана возможно при условии добычи урана в качестве сопутствующего продукта или значительном повышении стоимости урана на мировом рынке.

Кардинальным способом решения задачи расширения ресурсной базы является использование энергетического потенциала ^{238}U и ^{232}Th путём их перевода в делящиеся изотопы Pu и ^{233}U . Темпы сокращения объёмов добываемого природного урана зависят от сочетания используемых типов ядерных реакторов и схем организации перспективного ЯТЦ.

Аналитический отчёт подготовлен в рамках плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» на 2021 год.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

уран, торий, плутоний, гибридный реактор, атомная энергетика, ядерный топливный цикл, ЯТЦ, вторичные источники, нетрадиционные источники, ОГФУ, уран из морской воды, переработка ОЯТ.

ЦИТИРОВАНИЕ:

Перспективные источники расширения ресурсной базы атомной энергетики. / Журавлёв И.Б., Квятковский С.А., Птицын П.Б., Сафиканов Д.И. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 150 с. – Рус. – Деп. 28.04.2022, № 22-В2022.

TITLE:

Promising sources of expanding the resource base of nuclear power.

AUTHORS:

Zhuravlev I.B., Kviatkovskii S.A., Ptitsyn P.B., Safikanov D.I., Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovations», State Atomic Energy Corporation Rosatom.

REVIEWERS:

Belinskij L.L., State Atomic Energy Corporation Rosatom.

Ivanov K.V., State Atomic Energy Corporation Rosatom.

Karmatskiy V.I., TENEX JSC.

Subbotin S.A., National Research Centre «Kurchatov Institute».

ABSTRACT:

This analytical report estimates the existing traditional mineral resource base of uranium and its long-term sufficiency to ensure the functioning of nuclear power plants in the world and in Russia according to various forecast scenarios. The report analyzes the possibility of expanding nuclear power resource base by using unconventional and secondary sources of uranium, as well as plutonium, thorium, and hybrid fusion-fission reactors in the future.

The presented analysis shows that, in general, the world's proven uranium resources are sufficient to meet the needs of nuclear power at least until 2100 in most scenarios of the development, even without involving secondary sources of uranium. The share of secondary sources in meeting the demands of nuclear power will decrease in the near and medium term. The use of unconventional sources of uranium is feasible in case when uranium is extracted as a by-product or if there is a significant increase in the natural uranium price on the world market.

The most promising way to expand the resource base is to use the energy potential of ^{232}Th and ^{238}U by converting them into fissile isotopes of ^{233}U and Pu respectively. The rate of reduction in natural uranium extraction depends on the types of nuclear reactors used and the scheme of the nuclear fuel cycle.

The report was prepared as a part of the Centre of Analytical R&D (CARD) Action Plan 2021.

KEYWORDS:

uranium, thorium, plutonium, hybrid reactor, nuclear power, nuclear fuel cycle, NFC, secondary sources, unconventional sources, depleted uranium, uranium from seawater, spent fuel reprocessing.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. СОВРЕМЕННАЯ СЫРЬЕВАЯ БАЗА УРАНА	9
1.1. Традиционные запасы урана в мире	9
1.2. Добыча урана.....	14
1.3. Производство и потребление урана	16
1.4. Традиционные запасы урана и баланс потребления/производства в России	22
1.5. Краткие выводы к Главе «Современная сырьевая база урана»	27
2. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ УРАНА	29
2.1. Нетрадиционные минеральные источники урана	29
2.1.1. Чёрные сланцы.....	31
2.1.2. Фосфатные породы (фосфориты)	33
2.1.3. Лигнит (бурый уголь)	36
2.1.4. Другие нетрадиционные источники	37
2.2. Добыча урана из морской воды	39
2.3. Вторичные источники урана	44
2.3.1. Складские запасы природного и обогащённого урана	45
2.3.2. Дообогащение отвалов обогатительных производств.....	48
2.3.3. Недоподпитка каскадов разделительных производств (underfeeding)	54
2.3.4. Высокообогащённый уран	54
2.3.5. Регенерированный уран	58
2.4. Краткие выводы к Главе «Нетрадиционные и вторичные источники урана»	62
3. ПЛУТОНИЙ	63
3.1. Свойства плутония применительно к использованию его в ядерной энергетике	64
3.2. Накопленные объёмы плутония в странах мира и России	66
3.3. Варианты использования Pu в составе топлива ядерных реакторов....	72
3.3.1. МОКС-топливо в тепловых реакторах	72
3.3.2. Топливо на основе смеси Pu и обогащённого U.....	74
3.3.3. МОКС-топливо в быстрых реакторах.....	76
3.4. Программы стран по вовлечению плутония в ЯТЦ	79
3.5. Краткие выводы к Главе «Плутоний»	81

4. ТОРИЙ	83
4.1. Свойства тория применительно к использованию его в ядерной энергетике	83
4.2. Сырьевая база тория.....	86
4.2.1. Запасы тория в странах мира	87
4.2.2. Ресурсы тория в России.....	89
4.3. Особенности использования топлива на основе тория	96
4.4. Программы стран по вовлечению тория в ЯТЦ	98
4.5. Краткие выводы к Главе «Торий».....	100
5. ГИБРИДНЫЕ РЕАКТОРЫ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ ^{233}U и ^{239}Pu	103
5.1. Исторический обзор	103
5.2. Нейтронно-физические особенности накопления топлива в бланкете ГТР.....	110
5.3. Существующие проекты и перспективы коммерциализации ГТР	115
5.3.1. Существующие отечественные проекты ГТР.....	115
5.3.2. Проекты гибридных систем в других странах	117
5.3.3. Перспективы коммерциализации ГТР	118
5.4. Краткие выводы к Главе «Гибридные реакторы как дополнительный источник для расширения ресурсной базы ^{233}U и ^{239}Pu »	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	123
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Категории запасов и ресурсов урана согласно международной и отечественной классификации.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Сводная таблица с потенциалом расширения ресурсной базы урана за счёт использования различных нетрадиционных и вторичных источников	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Основные физические свойства U, Pu, Th и их соединений	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Ядерные характеристики основных делящихся и сырьевых изотопов U, Pu, Th	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Графики изменения ядерных сечений изотопов Th, U и Pu в зависимости от энергии нейтронов	144





ВВЕДЕНИЕ

Сегодня уран является основополагающим топливным элементом ядерной энергетики, на которую приходится около 5,3% мировых установленных мощностей электрогенерирующих станций [1]. Порядка 90% из 451 действующего в мире энергоблока используют урановое топливо, а остальные 10% используют его для загрузки ~2/3 активной зоны [2, 3]. В стадии сооружения находятся ещё 55 реакторов, и фактически все они будут использовать топливо на основе урана.

Последние оценки международных агентств и национальных организаций указывают на тенденции к рассмотрению ЯЭ в качестве основы базовой генерации будущих безуглеродных энергосистем. В случае ориентации мирового сообщества на развитие ЯЭ возможна реализация высоких темпов роста установленных мощностей ЯЭ для замещения мощностей на ископаемых видах топлива. Осуществление таких планов в мировом масштабе приведёт к соответствующему глобальному росту потребностей в ядерных материалах, основным из которых в настоящее время является уран.

В этой связи становятся актуальными вопросы оценки достаточности существующих разведанных ресурсов урана с относительно низкой стоимостью добычи, возможности вовлечения нетрадиционных и вторичных источников, а также способности альтернативных топливных

циклов в удовлетворении потребностей как внутреннего российского, так и зарубежного парка реакторов на всём жизненном цикле и в обеспечении требуемого темпа роста установленных мощностей ЯЭ.



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)

