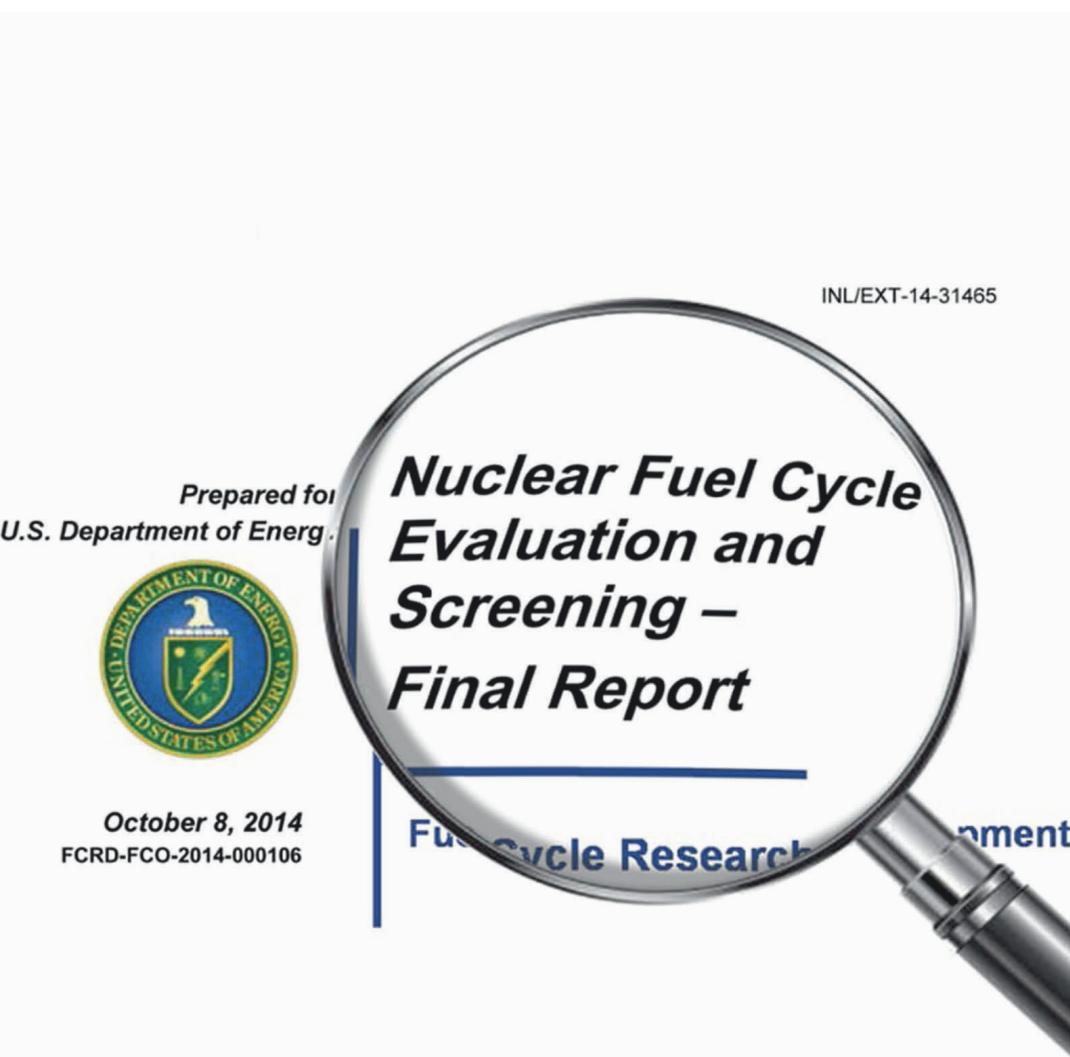




НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ЯДЕРНЫХ
ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ
ОЦЕНКИ: ОБЗОР И ПЕРЕОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ
МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ США



ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ
МИНИСТЕРСТВА
ЭНЕРГЕТИКИ США
ПО ОЦЕНКЕ И ОТБОРУ
ВАРИАНТОВ ЯТЦ

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ
ОЦЕНКИ: КЛЮЧЕВЫЕ
ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ
И ДОПУЩЕНИЯ

ПЕРЕОЦЕНКА
И УТОЧНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОРИГИНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
МЕТОДИК

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

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ: ОБЗОР И ПЕРЕОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ США

Москва
2022

УДК 621.311

ББК 31.4

С 64

С 64 Сопоставление вариантов усовершенствованных ядерных топливных циклов в условиях многокритериальной оценки: Обзор и переоценка результатов исследования Министерства энергетики США. Аналитический отчет / Андрианов А.А., Квятковский С.А., Купцов И.С., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 130 с.

ISBN 978-5-498-00900-1

© 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. 15,11.
Тираж 100 экз. Заказ № 6177.

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

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:

Сопоставление вариантов усовершенствованных ядерных топливных циклов в условиях многокритериальной оценки: Обзор и переоценка результатов исследования Министерства энергетики США.

АВТОРЫ:

Андреанов А.А., руководитель группы разработки АИ и ИИ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

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

Купцов И.С., советник группы разработки АИ и ИИ 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».

РЕФЕРАТ:

В настоящем аналитическом отчете представлены краткий обзор и результаты работы по переоценке выводов широко известного в профессиональной среде исследования Министерства энергетики США по оценке и отбору вариантов усовершенствованных ядерных топливных циклов. Данное исследование проводилось в период с 2011 по 2014 гг. большой группой специалистов – представителей практически всех ключевых ядерных национальных лабораторий США. По объемам цитирования это исследование приближается к междисциплинарному исследованию Массачусетского технологического института «Будущее атомной энергетики» (2003 г.) и легло в обоснование текущей научно-технической политики США в области ядерных технологий и атомной энергетики до 2030 г. В оригинальном исследовании экспертам удалось выявить из 40 первоначально рассмотренных опций 18 перспективных вариантов, требующих поддержки со стороны государства. В настоящем отчете показано, что использование усовершенствованных методов многокритериального анализа позволяет уменьшить этот список до 8 опций. Аналитический отчет подготовлен в рамках Плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» на 2021 г. (п. 4.3.1).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

ядерный топливный цикл, поддержка принятия решений, стратегия атомной отрасли, многокритериальный анализ, анализ неопределенности.

ЦИТИРОВАНИЕ:

Сопоставление вариантов усовершенствованных ядерных топливных циклов в условиях многокритериальной оценки: Обзор и переоценка результатов исследования Министерства энергетики США. / Андреанов А.А., Квятковский С.А., Купцов И.С., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 132 с. – Рус. – Деп. 28.04.2022, № 17-В2022.

TITLE:

Comparison of Advanced Nuclear Fuel Cycle Options using the Multi-Criteria Analysis Framework: Review and Reevaluation of the US Department of Energy Study on Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening.

AUTHORS:

Andrianov A.A., Kvyatkovskiy S.A., Kuptsov I.S., Ptitsyn P.B., Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise “Science and Innovations”, State Atomic Energy Corporation “Rosatom”.

ABSTRACT:

This analytical report provides a brief overview and reconsideration of the findings of a widely acclaimed US Department of Energy study on the nuclear fuel cycle evaluation and screening. This study was carried out between 2011 and 2014 by a large group of specialists-representatives of practically all key USA nuclear national laboratories. In terms of citations, this study is approaching to the MIT inter-disciplinary study «The Future of Nuclear Energy» (2003) and was used to form the basis for the scientific and technical policy in the field of nuclear technology and nuclear energy until 2030 in the USA. In the original study, experts were able to identify from 40 options initially considered the 18 promising options that require government support. This report demonstrates that the use of advanced multi-criteria analysis methods can reduce the list of these 18 promising options to 8 ones. This report was prepared as part of the Rosatom Center for Analytical Research and Developments Action Plan for 2021 (item 4.3.1).

KEYWORDS:

nuclear fuel cycle, strategy of nuclear energy development, multi-criteria decision making, uncertainty analysis, comparative evaluation.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ США ПО ОЦЕНКЕ И ОТБОРУ ВАРИАНТОВ ЯТЦ	11
1.1. Постановка задачи	11
1.2. Организационные вопросы.....	15
1.3. Основные допущения	16
1.4. Основные выводы	17
1.5. Инициативы в продолжение работ по оценке и отбору вариантов ЯТЦ...20	
2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ: КЛЮЧЕВЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ И ДОПУЩЕНИЯ	23
2.1. Список вариантов ЯТЦ	23
2.2. Структуризация критериев	27
2.3. Оценка индикаторов.....	32
2.4. Весовые коэффициенты.....	38
2.5. Одноатрибутивные функции ценности.....	42
2.6. Процедура агрегации	43
2.7. Анализ чувствительности/неопределенности	45
2.8. Комментарии касательно предложенного подхода к оценке и отбору ..	46
3. ПЕРЕОЦЕНКА И УТОЧНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОРИГИНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДИК	49
3.1. Процедура скрининга в контексте многокритериального анализа	49
3.2. Скрининг опций на основе условия Парето-эффективности	52
3.3. Результаты ранжирования для различных допущений и приоритетов... 56	
3.4. Скрининг на основе методов глобального анализа чувствительности/неопределенности	64
3.5. Обсуждение результатов.....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	79
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Реестр и краткое описание содержания отчетных материалов	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Реестр публикаций, ссылающихся на оригинальное исследование	88
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Реестр организаций-участниц исследования и организаций-рецензентов результатов исследования	95

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Значения критериев оценки для рассмотренных в исследовании опций	97
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Краткая характеристика метода агрегации экспертных оценок MAVT.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Краткая характеристика SET Tool.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Краткая характеристика инструментария МАГАТЭ для сравнительного анализа и ранжирования ЯЭС	124

Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening – Final Report

Fuel Cycle Research & Development

Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening – Final Report
October 8, 2014

xv

CONTENTS

EXECUTIVE SUMMARY	v
1. Introduction	1
1.1 Fuel Cycle Evaluation Criteria	2
1.2 Historical Perspective	3
1.3 Use of this Report	4
2. Study Approach, Principles, and Fuel Cycle Analyses	6
2.1 Evaluation and Screening Process	6
2.2 Functional Level Evaluation	7
2.3 Comprehensive Set of Fuel Cycle Options	8
2.3.1 Fundamental Fuel Cycle Characteristics	8
2.4 Evaluation Metrics	11
2.5 Fuel Cycle Analyses	12
2.5.1 Steady-State Analysis and Transition	12
2.5.2 Analysis Examples and Metric Data	13
2.5.3 Treatment of Uncertainties	14
2.5.4 Use of Value Judgments and Scenarios to Identify Promising Options	14
3. Key Results	16
3.1 Identification of Promising Fuel Cycles	18
3.2 Most Promising Fuel Cycles and Their R&D Needs	21
3.3 Additional Potentially Promising Fuel Cycles and Their R&D Needs	23
3.4 Other Potentially Promising Fuel Cycles and Their R&D Needs	24
3.5 Insights about Fuel Cycles	24
3.6 Challenges for Fuel Cycle Development and Deployment	26
4. Conclusions	28
4.1 Questions Pored in the Charter	29
4.2 Use of the Evaluation and Screening Results	29
REFERENCES	30
Glossary	31
Appendix A – Evaluation and Screening Approach	
Appendix B – Comprehensive Set of Fuel Cycle Options	
Appendix C – Evaluation Criteria and Metrics	
Appendix D – Metric Data	
Appendix E – Evaluation Criteria Results	
Appendix F – Scenario Results	
Appendix G – The Evaluation and Screening Team	
Appendix H – Review Comments and Resolution – Independent Review Team and U.S. DOE	





ВВЕДЕНИЕ

В 2011 г. Министерством энергетики США (Управление по ядерной энергии) было инициировано исследование по оценке и отбору вариантов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с учетом приоритетных интересов США в этой области, подготовка к которому в части первичного сбора и обработки данных была начата за несколько лет до этого [1, 2]. В 2014 г. был опубликован итоговый отчет по проекту, который не только получил большую известность в профессиональной среде, но и оказался интересным для более широкой аудитории. По объемам цитирования это исследование приближается к междисциплинарному исследованию Массачусетского технологического института «Будущее атомной энергетики» (2003 г.) и легло в обоснование текущей научно-технической политики США в области ядерных технологий и атомной энергетики до 2030 г.

Несмотря на объем проделанной в рамках исследования работы, после формального завершения проекта в 2014 г. был инициирован новый цикл исследований в развитие предложенного подхода с целью проведения углубленного анализа и устранения выявленных в оригинальном исследовании «белых пятен» и неопределенностей, который продолжается в настоящий момент и имеет целью обеспечение под-

держки принятия управленческих решений в сфере ядерных технологий [3].

В работе над отчетом принимали участие более 40 экспертов из 13 научных организаций и университетов США. Практически все ключевые ядерные национальные лаборатории США, специализирующиеся в вопросах разработки ядерных энерготехнологий и технологий топливного цикла, были задействованы в проекте. Рецензирование работы проводилось независимыми экспертами из 10 организаций – представителями университетской среды, промышленности, некоммерческих организаций.

Основная цель исследования заключалась в том, чтобы сопоставить и идентифицировать на основе многокритериального анализа [4–8] перспективные варианты ЯТЦ, которые могут послужить экономически эффективными альтернативами существующему открытому ЯТЦ с реакторами на тепловых нейтронах. Под этим подразумевалось, что соответствующие варианты обеспечат улучшение показателей безопасности, потребления природных ресурсов, устойчивости к несанкционированному распространению, эффективности обращения с ядерными отходами, но при этом их развертывание не потребует существенной перестройки промышленной инфраструктуры и не приведет к значительному повышению затрат на производство электроэнергии.

В исследовании рассматривался весь топливный цикл от добычи урана/тория до утилизации отработавшего топлива (ОЯТ)/высокоактивных отходов (ВАО). Анализировались разнообразные варианты открытого, частично и полностью замкнутого ЯТЦ с рециклом плутония и/или прочих трансурановых элементов, извлеченных из ОЯТ. Всевозможные варианты ЯТЦ (на первоначальном этапе было рассмотрено 4398 вариантов) были объединены в 40 так называемых «оценочных групп» (EG, от англ. Evaluation Group) в соответствии с их технико-экономическими показателями. Все опции были количественно оценены по набору предложенных критериев оценки с учетом неопределенностей в их значениях (было рассмотрено 27 критериев оценки, из которых только 20 были количественно оценены и непосредственно использовались для проведения скрининга и ранжирования рассматриваемых опций). Агрегация оценок критериев в соответствии с предложенным подходом для различных наборов весовых факторов была проведена с использованием аддитивной модели мультиатрибутивной теории ценности.

В оригинальном исследовании экспертам удалось выявить из 40 первоначально рассмотренных опций 18 перспективных вариантов, требующих поддержки со стороны государства. Наибольшую оценку получили варианты замкнутого ЯТЦ на основе быстрых реакторов или варианты, предполагающие совместную работу тепловых и быстрых реакторов.

Учитывая потенциальный интерес русскоязычной аудитории к результатам выполненного анализа по оценке и отбору вариантов ЯТЦ (в частности, с точки зрения последующей возможной реализации аналогичных инициатив в РФ при сравнении и ранжировании альтернативных вариантов развития национальной ядерной энергетики), в настоящем аналитическом отчете представлены: краткий обзор исследования с акцентом на организационную часть, основные допущения и выводы (глава 1), также рассмотрены особенности процедуры многокритериального анализа, которая была применена для сопоставления и ранжирования вариантов ЯТЦ (глава 2). Отметим, что глава 1 предназначена прежде всего для руководителей, которые пожелают получить общее представление о работе, выполненной американскими экспертами, и ее ключевых выводах, не касаясь при этом технических деталей и особенностей предложенного подхода к оценке и отбору вариантов ЯТЦ. Глава 2, напротив, ориентирована на технических специалистов, которые заинтересованы в ознакомлении с содержательными аспектами и особенностями разработанного аналитического подхода.

Кроме этого, в настоящем отчете приводятся результаты работы по переоценке выводов оригинального исследования (глава 3). Ключевым моментом, который в наибольшей степени повлиял на выводы настоящей работы, стал корректный учет финансовых и экономических рисков, институциональных и инфраструктурных аспектов при проведении многокритериального анализа. Данные аспекты, несмотря на их формальное присутствие в оригинальном исследовании, были по факту исключены из рассмотрения при агрегации оценок критериев с целью ранжирования опций. Показано, что использование усовершенствованных методов многокритериального анализа позволяет уменьшить список из 18 перспективных вариантов, выявленных в оригинальном исследовании, до 8 опций, из которых возможно при необходимости выявить лидеров и аутсайдеров.

В приложениях к настоящему отчету содержится дополнительная информация, раскрывающая основную часть отчета, которая могла

бы оказаться полезной специалистам, желающим познакомиться с содержанием оригинального исследования более подробно и воспользоваться наработками, выполненными в ходе проведения данного исследования.



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY



Pacific Northwest
NATIONAL LABORATORY



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)

