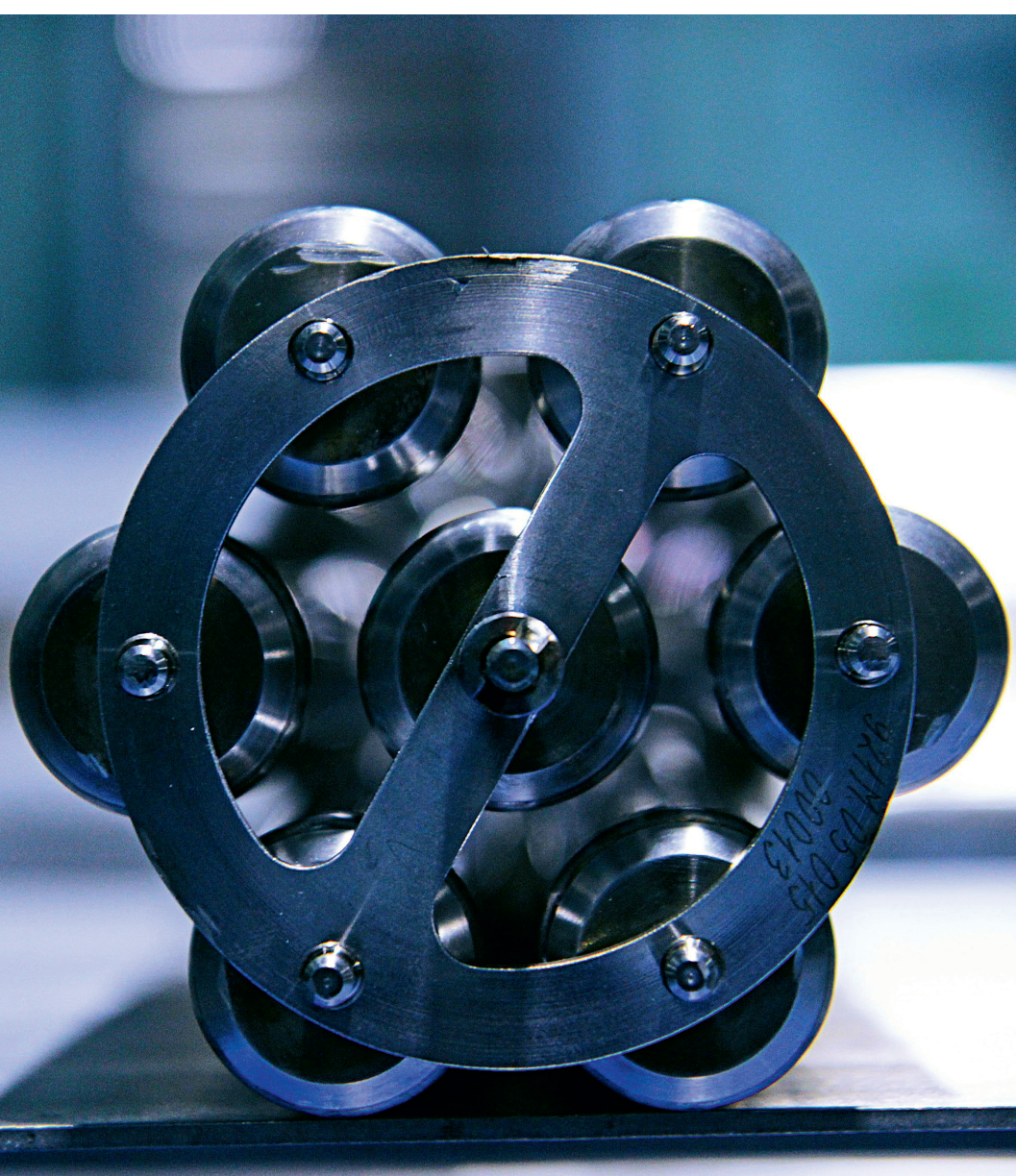




НАУКА  
И ИННОВАЦИИ  
РОСАТОМ

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**УРАН-ПЛУТОНИЕВОЕ ТОПЛИВО: ИСТОРИЯ,  
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ,  
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**



**РЕТРОСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ  
ЗАРУБЕЖНЫХ  
И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОДХОДОВ  
К ВОВЛЕЧЕНИЮ  
ПЛУТОНИЯ В ЯТЦ**

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ  
И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ВОВЛЕЧЕНИЯ ПЛУТОНИЯ  
В ЯТЦ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАН-  
ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА  
В РАМКАХ НАЦИОНАЛЬНЫХ  
ПРОГРАММ**

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

# УРАН-ПЛУТОНИЕВООЕ ТОПЛИВО: ИСТОРИЯ, ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Москва  
2024

УДК 621.039.54

ББК 31.4

У 68

У 68 Уран-плутониевое топливо: история, технико-экономические оценки, перспективные области применения. Аналитический отчет / Вахрушин А.Ю., Квятковский С.А., Коновалов И.И., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2024. – 128 с.

ISBN 978-5-498-01093-9

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2024.

Подписано в печать 31.08.2024. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,88.

Тираж 180 экз. Заказ № 8807.

Отпечатано в ООО «Элефант»:

610000, г. Киров, ул. Ленина, зд. 26

[www.hibox.pro](http://www.hibox.pro)

**НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:**

Уран-плутониевое топливо: история, технико-экономические оценки, перспективные области применения.

**АВТОРЫ:**

**Вахрушин А.Ю.**, Государственная корпорация «Росатом», частное учреждение «Наука и инновации», отраслевой Центр аналитических исследований и разработок, г. Москва, Российская Федерация.

**Квятковский С.А.**, Государственная корпорация «Росатом», частное учреждение «Наука и инновации», отраслевой Центр аналитических исследований и разработок, г. Москва, Российская Федерация.

**Коновалов И.И.**, Государственная корпорация «Росатом», частное учреждение «Наука и инновации», отраслевой Центр аналитических исследований и разработок, г. Москва, Российская Федерация.

**Птицын П.Б.**, Государственная корпорация «Росатом», частное учреждение «Наука и инновации», отраслевой Центр аналитических исследований и разработок, г. Москва, Российская Федерация.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Володин Д.А.**, АО «ТВЭЛ»;  
**Тарасов Б.А.**, АО «ВНИИНМ».

**РЕФЕРАТ:**

В данном отчете рассмотрены различные аспекты использования Pu в составе топлива ядерных реакторов. Проведен анализ зарубежного и отечественного опыта разработки, изготовления и использования U-Pu топлива, научно-технических и экономических аспектов вовлечения Pu в ЯТЦ, а также последних изменений в подходах к обращению с Pu и внедрению U-Pu топлива.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

уран-плутониевое топливо, МОКС, СНУП, РЕМИКС, плутоний, ЗЯТЦ, реакторный плутоний, оружейный плутоний, радиотоксичность, переработка ОЯТ, экономика.

**TITLE:**

Uranium-plutonium fuel: history, technical and economic assessments, promising areas of application.

**AUTHORS:**

**Vahrushin A.Yu., Konovalov I.I., Kviatkovskii S.A., Ptitsyn P.B.** Centre for Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovations», State Atomic Energy Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation.

**REVIEWERS:**

**Volodin D.A.**, TVEL JSC;  
**Tarasov B.A.**, VNIINM JSC.

**ABSTRACT:**

This report provides the overview of various aspects of the Pu uses in a nuclear reactor fuel. An analysis of foreign and domestic experience in the development, production and use of U-Pu fuel, scientific, technical and economic aspects of the involvement of Pu in the nuclear fuel cycle, as well as the recent changes in approaches to the management of Pu and the introduction of U-Pu fuel were carried out.

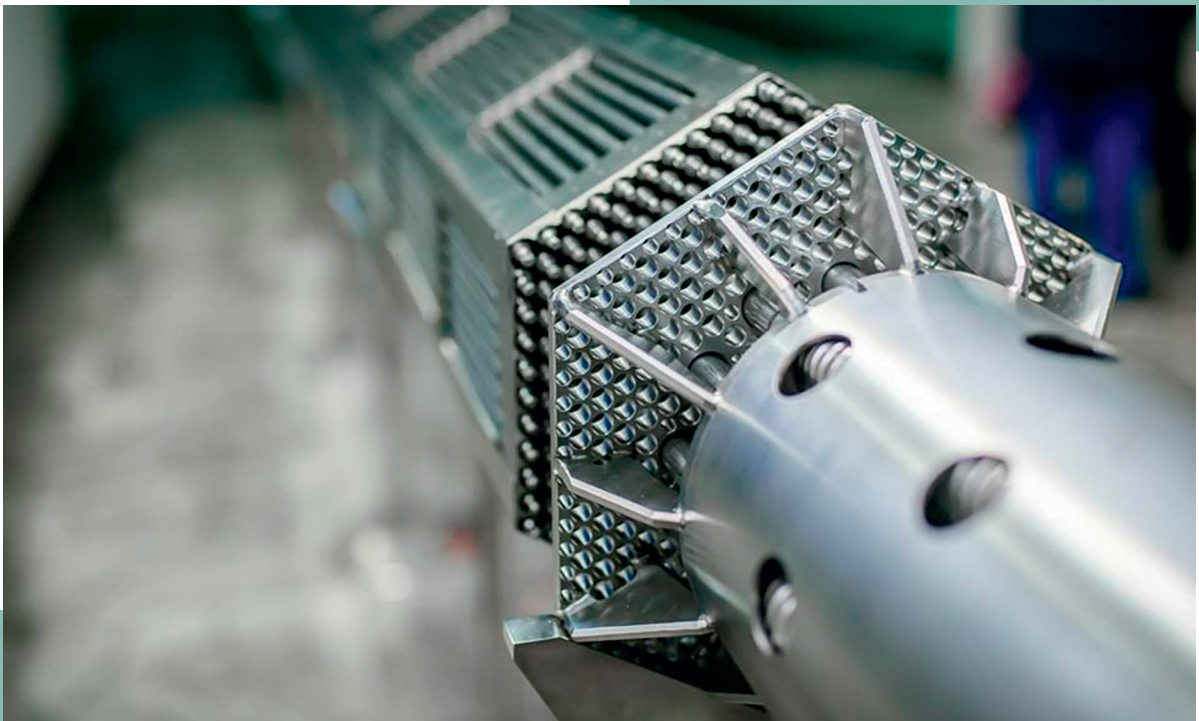
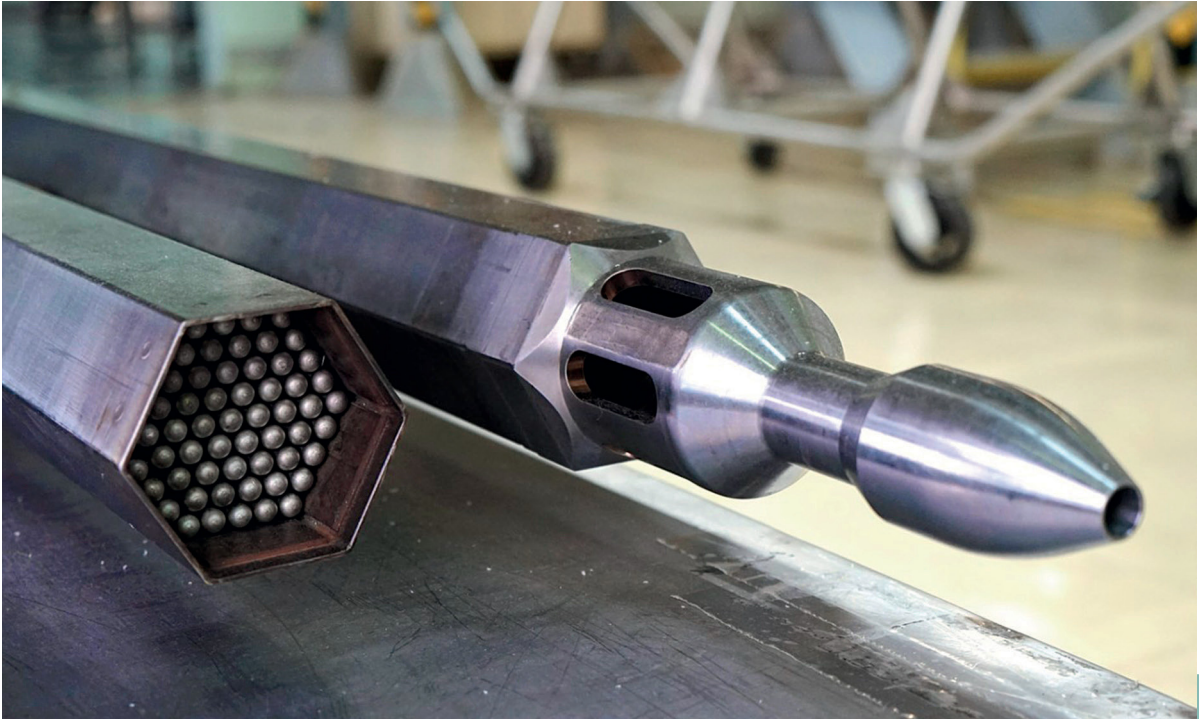
**KEYWORDS:**

uranium-plutonium fuel, MOX, SNUP, REMIX, plutonium, closed nuclear fuel cycle, weapons-grade plutonium, reactor-grade plutonium, radiotoxicity, spent nuclear fuel, reprocessing, economics.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>7</b>
<b>1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1.</b> Открытие плутония и развитие программ по его производству .....	9
<b>1.2.</b> Первый этап использования плутония в атомной энергетике .....	13
<b>1.3.</b> Ретроспектива вовлечения плутония в ЯТЦ и его накопление.....	18
<b>1.4.</b> Классификация плутония .....	26
<b>1.5.</b> Политические аспекты вовлечения плутония в ЯТЦ.....	30
<b>2. СВОЙСТВА ПЛУТОНИЯ И УРАНА</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1.</b> Свойства изотопов урана .....	35
<b>2.2.</b> Свойства плутония и его изотопов .....	40
<b>2.2.1.</b> Физико-химические свойства плутония.....	40
<b>2.2.2.</b> Нейтронно-физические характеристики изотопов плутония .....	42
<b>2.2.3.</b> Радиологические свойства изотопов плутония .....	53
<b>3. ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛУТОНИЯ В СОСТАВЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> .....	<b>59</b>
<b>3.1.</b> Оксидное уран-плутониевое топливо .....	59
<b>3.2.</b> Металлическое уран-плутониевое топливо.....	65
<b>3.3.</b> Неоксидное керамическое уран-плутониевое топливо .....	66
<b>3.3.1.</b> Нитридное уран-плутониевое топливо.....	66
<b>3.3.2.</b> Карбидное уран-плутониевое топливо.....	70
<b>3.4.</b> Сравнение характеристик различных типов топлива.....	72
<b>4. ПЕРЕРАБОТКА ОЯТ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ПЛУТОНИЯ</b> .....	<b>75</b>
<b>4.1.</b> Гидрометаллургические технологии.....	77
<b>4.2.</b> Пирохимические технологии .....	80
<b>4.3.</b> Комбинированные технологии .....	81

<b>5. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОВЛЕЧЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В ЯТЦ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА.....</b>	<b>85</b>
<b>5.1. Конкуренентоспособность ЯЭ.....</b>	<b>85</b>
<b>5.2. Экономические оценки завершающей стадии ЯТЦ.....</b>	<b>92</b>
<b>6. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ В РАМКАХ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ.....</b>	<b>97</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>111</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>113</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>123</b>





## ВВЕДЕНИЕ

---

В настоящее время международными агентствами прогнозируется значительное увеличение установленных мощностей ЯЭ к середине века [1, 2], связанное с тем, что ЯЭ рассматривается в качестве одной из основных технологий, позволяющих достичь декарбонизации национальных энергосистем и обеспечить устойчивые поставки недорогой электроэнергии.

Также на международном уровне указывается важная роль ЯЭ в выполнении целей устойчивого развития [3], принятых государствами – членами ООН в 2015 г., не только в части борьбы с изменением климата и генерации чистой энергии, но и в построении рациональных моделей потребления ресурсов.

В полной мере реализация имеющегося потенциала ЯЭ возможна в случае замыкания ЯТЦ, что позволит снизить потребление природных



ресурсов и одновременно обеспечить рост установленных мощностей ядерной генерации, а также уменьшить количество и опасность накопленных отходов благодаря переработке ОЯТ и повторному использованию регенерированных материалов, основными из которых являются U и Pu.

Если U является стандартным топливным материалом, используемым в основной части ядерных реакторов, то применение Pu в настоящее время ограничено как рядом технических, так и политических причин.

При этом подход России (а также ряда других ядерных стран) всегда отличался тем, что Pu рассматривался на национальном уровне как уникальный топливный ресурс будущего.

В связи с этим актуальными видятся рассмотрение и анализ зарубежного и отечественного опыта разработки, изготовления и использования U-Pu топлива, научно-технических и экономических аспектов вовлечения Pu в ЯТЦ, а также последних изменений в подходах к обращению с Pu и внедрению U-Pu топлива.

Данный аналитический отчет является логическим развитием серии отчетов, посвященных различным направлениям развития топлива ядерных реакторов (толерантное топливо; топливо для АСММ; топлива ИР) [4, 5], и продолжает рассмотрение вопросов замыкания ЯТЦ, затронутых в отчетах ЦАИР по перспективам внедрения быстрых натриевых реакторов, расширению ресурсной базы ЯЭ, обращению с ОЯТ и утилизации МА [6–9].

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)

