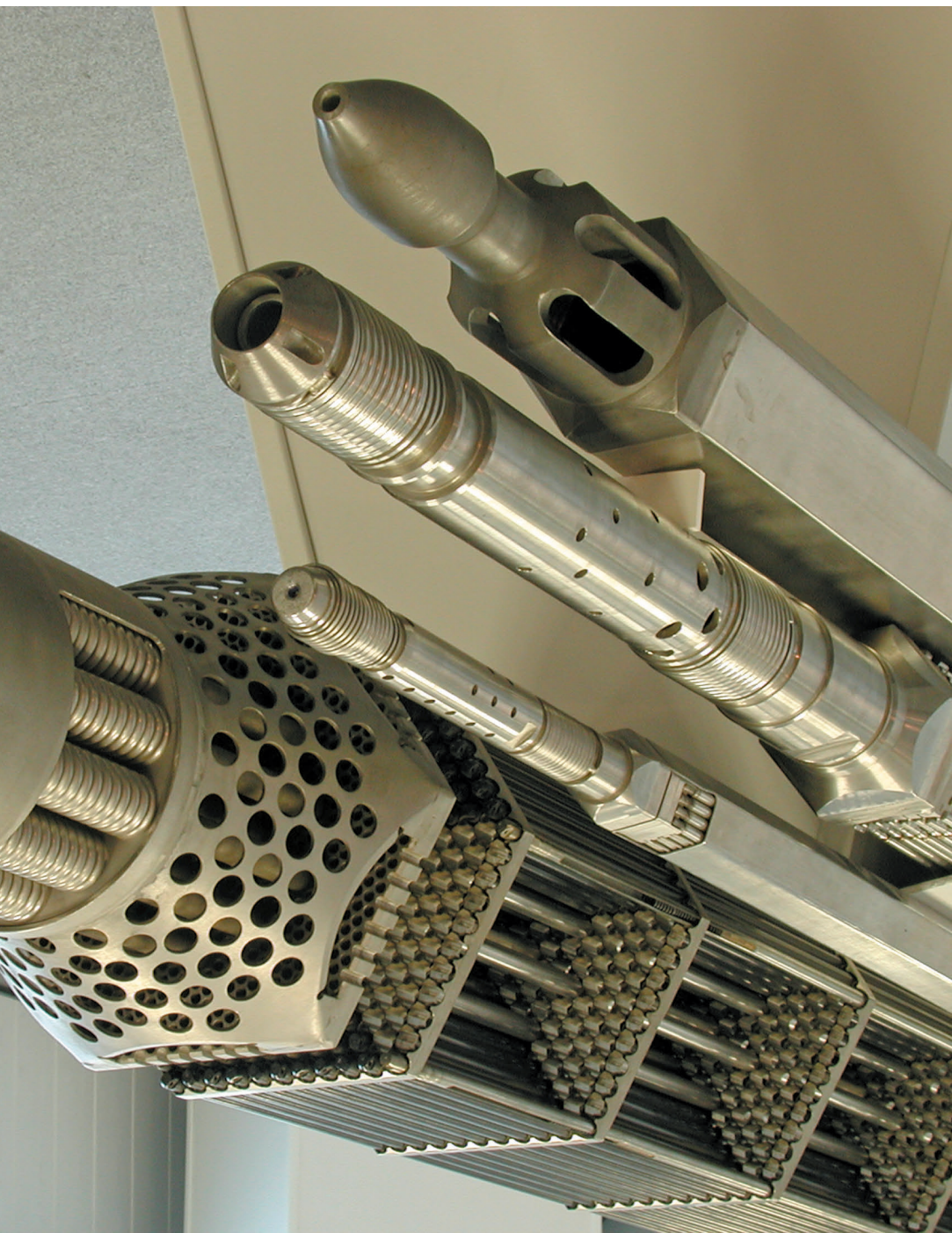




НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**ТОПЛИВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ С
ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К АВАРИЯМ: НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ,
НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ**



**РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
Zr В КАЧЕСТВЕ
КОНСТРУКЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА АКТИВНОЙ
ЗОНЫ РЕАКТОРОВ
С ВОДЯНЫМ
ОХЛАЖДЕНИЕМ**

**ПРИНЯТЫЕ МИРОВОМ
СООБЩЕСТВОМ КРИТЕРИИ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
РЕАКТОРОВ – МИФ
ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?**

**ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И
ЗАРУБЕЖНЫХ РАЗРАБОТОК
ПО ПОВЫШЕНИЮ
СТОЙКОСТИ ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ К
АВАРИЙНОМУ ПЕРЕГРЕВУ**

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

ТОПЛИВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К АВАРИЯМ: НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ, НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

Москва
2022

УДК 621.311

ББК 31.47

К 64

К 64 Топливо энергетических водо-водяных реакторов с повышенной устойчивостью к авариям: научные аспекты, направления исследований и текущее состояние. Аналитический отчет / Коновалов И.И., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 72 с.

ISBN 978-5-498-00902-5

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

Подписано в печать 02.09.2022. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.
Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,44.
Тираж 100 экз. Заказ № 6179.

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

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:

Топливо энергетических водо-водяных реакторов с повышенной устойчивостью к авариям: научные аспекты, направления исследований и текущее состояние.

АВТОРЫ:

Коновалов И.И., советник 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».

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Тарасов Б.А., ведущий научный сотрудник АО «ВНИИНМ», главный специалист Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ.

Никулин С.А., заведующий кафедрой Национального Исследовательского Технологического Университета МИСиС, доктор технических наук, профессор.

РЕФЕРАТ:

Объектом аналитического отчета являются направления исследований и текущее состояние разработок топлива энергетических водо-водяных реакторов с повышенной стойкостью к авариям. Рассмотрены физико-химические особенности циркония как основного конструкционного материала активной зоны водо-водяных ядерных реакторов. Дан анализ отечественных и зарубежных подходов к повышению стойкости тепловыделяющих элементов в аварийных условиях и достигнутый уровень разработок на конец 2021 года. Исходя из современного уровня знаний и технологий, определены перспективные направления повышения стойкости тепловыделяющих элементов в аварийных условиях. Аналитический отчет подготовлен в рамках плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (ЦАИР) на 2021 год.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Энергетические ядерные реакторы, тепловыделяющий элемент, устойчивый к авариям, ядерное топливо, оболочечные материалы, статус разработок.

ЦИТИРОВАНИЕ:

Топливо энергетических водо-водяных реакторов с повышенной устойчивостью к авариям: научные аспекты, направления исследований и текущее состояние. / Коновалов И.И., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 72 с. – Рус. – Деп. 28.04.2022, № 19-В2022.

TITLE:

Fuel of power water-water reactors with enhanced resistance to accidents: scientific aspects, research directions and current state.

AUTHORS:

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

REVIEWERS:

Tarasov B.A., VNIINM, JSC, National Research Nuclear University «MEPhI».

Nikulin S.A., National University of Science and Technology «MISIS».

ABSTRACT:

The analytical report describes the research directions and current state of fuel development for power water-water reactors with increased resistance to accidents. The physicochemical features of zirconium as the main structural material for the core of power nuclear reactors are considered. The analysis of domestic and foreign approaches to increasing the resistance of fuel elements in emergency conditions and the achieved level of development at the end of 2021 is given. Based on the current level of knowledge and technology, promising directions for increasing the resistance of fuel elements in accident conditions have been identified.

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

KEYWORDS:

Power nuclear reactors, accident-tolerant fuel element, nuclear fuels, cladding materials, development status.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКОНИЯ КАК ОСНОВНОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ	7
1.1. Свойства Zr	7
1.2. Zr как конструкционный материал водо-водяных реакторов	8
1.3. Риски, связанные с применением Zr	9
2. АВАРИИ НА АЭС, СВЯЗАННЫЕ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ ЦИРКОНИЯ	13
2.1. Причины и последствия аварий с протеканием паро-циркониевой реакции в энергетических реакторах	13
2.2. Принятые мировым сообществом критерии безопасности ядерного топлива	16
3. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК В РОССИИ	17
3.1. Текущее состояние разработок	18
3.2. Направления совершенствования материалов твэлов	20
3.2.1. Научные исследования	20
3.2.2. Технологические исследования	27
3.2.3. Реакторные испытания	29
4. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК ЗА РУБЕЖОМ	31
4.1. Текущее состояние разработок	32
4.2. Направления совершенствования материалов твэлов	32
4.2.1. Научные исследования	32
4.2.2. Технологические исследования	34
4.2.3. Реакторные испытания	39
5. АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОЗДАНИЯ ТОПЛИВА, УСТОЙЧИВОГО К АВАРИЯМ	47
5.1. Топливо типа ADOPT	48
5.2. Модификация поверхности и покрытия на циркониевых оболочках	49
5.3. Замена Zr оболочек на другие сплавы	52
5.4. Замена Zr оболочек на SiC/SiC композит	54
5.5. Новое топливо	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	61
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	65
ПРИЛОЖЕНИЯ	67



ВВЕДЕНИЕ

Основным конструкционным материалом элементов активной зоны (АЗ) энергетических водо-водяных реакторов (ВВЭР, PWR, BWR) является цирконий.

При нормальных условиях эксплуатации сплавы Zr, разработанные в стране и за рубежом, обеспечивают работоспособность элементов активной зоны водо-водяных реакторов.

Однако в аварийном режиме, связанном с нарушением теплоотвода и приводящем к перегреву циркониевых элементов АЗ, прежде всего оболочек твэлов, проблемой становится паро-циркониевая реакция.

Термин «топливо, устойчивое к авариям» (от англ. ATF – Accident Tolerant Fuel) появился после аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 году, на которой произошла паро-циркониевая реакция с выделением большого количества водорода с последующим взрывом образовавшейся «гремучей» смеси на нескольких блоках АЭС.

Позже этот термин за рубежом был преобразован в EATF (от англ. Enhanced Accident Tolerant Fuel), или топливо с повышенной устойчивостью к авариям. Это связано с тем, что физико-химические свойства Zr без использования специальных технологических приемов в принципе не могут обеспечить устойчивость топлива к авариям при перегревах выше некоторой критической температуры в паровой среде.

Использование топлива ATF и технологий обращения с РАО, обеспечивающих минимальное воздействие на окружающую среду, как следует из последних документов Европейской комиссии, является основным фактором признания атомной энергетики как «зеленой».



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)

