



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 03.03.02 Физика
ООП/ОПОП Физика
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

| Тема работы |
|--|
| Высокотемпературное окисление циркониевого сплава Э110 с защитным покрытием Cr/Mo |

УДК 621.793:669.296:669.26:620.193

Обучающийся

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------------|---------|------|
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|-------------------------|------------------------|---------|------|
| Заведующий ЛПМОБВЭ | Кашкаров Егор Борисович | к.ф.-м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН | Былкова Татьяна Васильевна | к.э.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ООД | Антоневич Ольга Алексеевна | к.б.н | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП/ОПОП, должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Склярова Е.А. | к.п.н., доцент | | |

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

| Код компетенции | Наименование компетенции |
|---|--|
| Универсальные компетенции | |
| УК(У)-1 | Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач. |
| УК(У)-2 | Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений. |
| УК(У)-3 | Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде. |
| УК(У)-4 | Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке. |
| УК(У)-5 | Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах. |
| УК(У)-6 | Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни. |
| УК(У)-7 | Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности. |
| УК(У)-8 | Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций. |
| УК(У)-9 | Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи. |
| Общепрофессиональные компетенции | |
| ОПК(У)-1 | Способен применять естественно-научные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов |
| ОПК(У)-2 | Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов |
| ОПК(У)-3 | Способен использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач. |
| ОПК(У)-4 | Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности. |
| ОПК(У)-5 | Способен использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией. |
| ОПК(У)-6 | Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением |

| | |
|-------------------------------------|--|
| | информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности. |
| ОПК(У)-7 | Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка. |
| ОПК(У)-8 | Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности. |
| ОПК(У)-9 | Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей. |
| Профессиональные компетенции | |
| ПК(У)-1 | Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин |
| ПК(У)-2 | Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта |
| ПК(У)-3 | Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований |
| ПК(У)-4 | Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин |
| ПК(У)-5 | Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований |
| ПК(У)-6 | Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований |
| ПК(У)-7 | Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме |
| ПК(У)-8 | Способность понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования |



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП
_____ Склярова Е.А.
(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

| Группа | ФИО |
|--------|-------------------------------------|
| ОБ91 | Абдульменова Анастасия Владимировна |

Тема работы:

| | |
|--|--|
| Высокотемпературное окисление циркониевого сплава Э110 с защитным покрытием Cr/Mo | |
| <i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i> | |

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|---|
| <p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p> | <p>Объект исследования: циркониевый сплав Э110 с покрытием Cr/Mo</p> <p>Методы исследования: <i>in situ</i> исследование с применением синхротронного излучения, атмосферная печь, установка LOCA345, установка GASPARG, аналитические весы, дифрактометр, оптический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии</p> |
| <p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературных источников. 2. Нанесение защитного Cr/Mo покрытия на подложки из циркониевого сплава Э110 методом магнетронного распыления. 3. Анализ структурно-фазовых преобразований при нагреве образцов с покрытиями методом <i>in situ</i> рентгеновской дифракции. 4. Проведение высокотемпературных испытаний образцов на окисление на воздухе и в потоке водяного пара. |

| | |
|--|---|
| | <p>5. Оценка удельного привеса образцов без покрытия и с покрытиями.</p> <p>6. Изучение структурно-фазового состояния образцов в зависимости от температуры и времени окисления.</p> <p>7. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».</p> <p>8. Раздел «Социальная ответственность».</p> <p>9. Заключение.</p> |
|--|---|

Перечень графического материала
(с точным указанием обязательных чертежей)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

| Раздел | Консультант |
|---|----------------------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Былкова Татьяна Васильевна |
| Социальная ответственность | Антоневич Ольга Алексеевна |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Заведующий ЛПМОБВЭ | Кашкаров Егор Борисович | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению обучающийся:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------------|---------|------|
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна |

| | | | |
|---------------------|-------------|------------------------------|-----------------|
| Школа | ИЯТШ | Отделение школы (НОЦ) | ОЭФ |
| Уровень образования | бакалавриат | Направление/специальность | 03.03.02 Физика |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|---|--|
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | Накладные расходы – 16% Районный коэффициент – 30%. |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | Отчисления во внебюджетные фонды – 30 % |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|--|
| 1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i> | Оценить потенциальных потребителей исследования, проанализировать конкурентных решений, представить SWOT – анализ |
| 2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i> | Представить план этапов работ, определить трудоёмкость и построить календарный график, сформировать бюджет НИ |
| 3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i> | Определить интегральные показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности разработки. Рассчитать сравнительную эффективность проекта |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений. 2. SWOT-анализ. 3. Морфологическая матрица для научно-исследовательской работы. 4. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей. 5. Временные показатели проведения научного исследования. 6. Календарный план-график проведения НИОКР по теме. 7. Материальные затраты. 8. Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ. 9. Баланс рабочего времени. 10. Расчёт основной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды. 11. Бюджет затрат НИ. 12. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. 13. Сравнительная эффективность разработки

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент ОСГН | Былкова Татьяна Васильевна | к.э.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|-------------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | | | |
|---------------------|-------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Группа | | ФИО | |
| 0Б91 | | Абдульменова Анастасия Владимировна | |
| Школа | ИЯТШ | Отделение (НОЦ) | Отделение экспериментальной физики |
| Уровень образования | Бакалавриат | Направление/специальность | 03.03.02. Физика |

Тема ВКР:

Высокотемпературное окисление циркониевого сплава Э110 с защитным покрытием Cr/Mo

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|---|---|
| <p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации | <p><i>Объект исследования:</i> двухслойное покрытие Cr/Mo, нанесенное на циркониевый сплав Э110</p> <p><i>Область применения:</i> атомные электростанции</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 124 м²</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> шлифовально-полировальный станок, ионно-плазменная установка, атмосферная печь, аналитические весы, сканирующий электронный микроскоп, дифрактометр, компьютер</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> шлифовка образцов, нанесение покрытий, высокотемпературное окисление образцов, исследование микроструктуры и элементного состава, измерение привеса образцов</p> |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| <p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018). 2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. 3. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. 4. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования. 5. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. 6. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения). |
| <p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов | <p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов. 2. Опасные производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека. 3. Опасные производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения. <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего. 2. Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде. 3. Вредные производственные факторы, связанные с |

| | |
|---|--|
| | <p>повышенным уровнем ионизирующих излучений</p> <p>4. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: изоляция электропроводов, огнеупорные перчатки.</p> |
| <p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p> | <p>Воздействие на селитебную зону: радиоактивное заражение территории при аварии.</p> <p>Воздействие на литосферу: твердые радиоактивные отходы.</p> <p>Воздействие на гидросферу: сброс охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов; жидкие радиоактивные отходы.</p> <p>Воздействие на атмосферу: выбросы из вентиляционных систем, содержащие низкие концентрации радиоактивных веществ.</p> |
| <p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p> | <p>Возможные ЧС: техногенные аварии (отказ систем безопасности; нарушение контроля и управления цепной ядерной реакции в активной зоне реактора; тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ).</p> <p>Наиболее типичная ЧС: тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ.</p> |
| <p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p> | |

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Антоневич Ольга Алексеевна | к.б.н | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------------|---------|------|
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна | | |



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика
Уровень образования бакалавриат
Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики
Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

| Группа | ФИО |
|--------|-------------------------------------|
| 0Б91 | Абдульменова Анастасия Владимировна |

Тема работы:

| |
|--|
| Высокотемпературное окисление циркониевого сплава Э110 с защитным покрытием Cr/Mo |
|--|

| | |
|--|--|
| Срок сдачи обучающимся выполненной работы: | |
|--|--|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 28.11.22 | Аналитический обзор литературы | 20 |
| 30.01.23 | Проведение экспериментальной части исследования | 25 |
| 20.02.23 | Анализ результатов | 30 |
| 29.05.23 | Социальная ответственность | 10 |
| 29.05.23 | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 10 |
| 30.05.23 | Заключение | 5 |

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Заведующий ЛПМОБВЭ | Кашкаров Е.Б. | к.ф.-м.н. | | |

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Склярова Е.А. | к.п.н., доцент | | |

Обучающийся

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------|---------|------|
| 0Б91 | Абдульменова А.В. | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 117 с., 30 рис., 26 табл., 95 источников, 1 прил.

Ключевые слова: авария с потерей теплоносителя, циркониевый сплав Э110, Cr/Mo покрытие, магнетронное распыление, *in situ* дифракция, высокотемпературное окисление, взаимная диффузия Cr-Zr, барьерный подслоя.

Объектом исследования является циркониевый сплав Э110 с покрытием Cr/Mo.

Цель работы – установление закономерностей взаимной диффузии и высокотемпературной коррозии при окислении циркониевого сплава Э110 с двухслойным покрытием Cr/Mo, осажденным методом магнетронного распыления.

В ходе работы проводились нанесение покрытий методом магнетронного распыления, *in situ* исследование с применением синхротронного излучения, высокотемпературные испытания на окисление на воздухе и в потоке водяного пара, расчет удельных привесов, структурно-фазовый анализ.

В результате работы показано, что барьерный подслоя молибдена подавляет взаимную диффузию между хромом и цирконием при температурах до 1330 °С в течение продолжительного времени. Высокотемпературное окисление протекает с образованием внешнего оксидного слоя Cr₂O₃ и междиффузионных слоев Cr-Mo и Mo-Zr. При температуре 1400 °С происходит активная взаимная диффузия между слоями с образованием эвтектических фаз Mo-Zr-Cr, в результате чего защитные свойства покрытия теряются.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 14 |
| Глава 1. Литературный обзор..... | 16 |
| 1.1 Защитные покрытия для циркониевых сплавов..... | 16 |
| 1.1.1 Покрытия на основе МАХ-фаз..... | 18 |
| 1.1.2 Керамические защитные покрытия..... | 19 |
| 1.1.3 Композитные/многослойные покрытия..... | 21 |
| 1.1.4 Металлические покрытия..... | 24 |
| 1.2 Взаимная диффузия Cr-Zr..... | 28 |
| 1.3 Барьерные подслои для снижения взаимной диффузии Cr-Zr..... | 30 |
| Глава 2. Материалы и методы исследования..... | 34 |
| 2.1 Подготовка образцов..... | 34 |
| 2.2 Нанесение покрытий методом магнетронного распыления..... | 34 |
| 2.3 Высокотемпературные испытания на воздухе..... | 36 |
| 2.4 Высокотемпературные испытания в потоке водяного пара..... | 37 |
| 2.5 Структурно-фазовые исследования образцов..... | 37 |
| Глава 3. Результаты экспериментальных исследований..... | 39 |
| 3.1 Микроструктура исходных покрытий Cr и Cr/Mo..... | 39 |
| 3.2 In situ дифракционные исследования пленок Cr и Cr/Mo..... | 40 |
| 3.3 Закономерности высокотемпературного окисления образцов на воздухе..... | 44 |
| 3.3.1 Удельный привес образцов..... | 44 |
| 3.3.2 Фазовый состав образцов..... | 45 |
| 3.3.3 Микроструктура образцов после окисления..... | 47 |
| 3.3.4 Описание механизмов высокотемпературного окисления циркониевого сплава с покрытиями Cr и Cr/Mo..... | 50 |
| 3.4 Закономерности высокотемпературного окисления образцов в потоке водяного пара..... | 53 |
| 3.4.1 Удельный привес образцов..... | 53 |
| 3.4.2 Фазовый состав циркониевого сплава с Cr/Mo покрытием..... | 57 |

| | |
|--|----|
| 3.4.3 Микроструктура циркониевого сплава с Cr/Mo покрытием после окисления..... | 59 |
| 3.4.4 Описание механизмов высокотемпературного окисления при 1400 °С покрытий Cr/Mo в потоке водяного пара..... | 68 |
| Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 71 |
| 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | 71 |
| 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования | 71 |
| 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений..... | 72 |
| 4.1.3 SWOT-анализ | 74 |
| 4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований | 76 |
| 4.3 Планирование научно-исследовательских работ | 76 |
| 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования..... | 76 |
| 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ..... | 77 |
| 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования..... | 77 |
| 4.4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) | 80 |
| 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования | 84 |
| Глава 5. Социальная ответственность..... | 88 |
| Введение..... | 88 |
| 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 88 |
| 5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства..... | 88 |
| 5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны | 89 |
| 5.2. Производственная безопасность | 90 |
| 5.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов..... | 91 |
| 5.2.2 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека | 92 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3 Производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения | 93 |
| 5.2.4 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего | 93 |
| 5.2.5 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде | 95 |
| 5.2.6 Производственные факторы, связанные с повышенным уровнем ионизирующих излучений | 96 |
| 5.2.7 Производственные факторы, связанные со световой средой..... | 97 |
| 5.3 Экологическая безопасность..... | 97 |
| 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях | 99 |
| 5.4.1 Анализ возможных ЧС | 99 |
| 5.4.2 Наиболее вероятная ЧС..... | 99 |
| Выводы по разделу «Социальная ответственность» | 101 |
| Заключение | 103 |
| Список литературы | 104 |
| Приложение А | 116 |

Введение

Авария на атомной электростанции «Фукусима» в 2011 году показала, что непокрытые циркониевые сплавы (Э110, Э125, Циркалой-2, Циркалой-4 и т.д.) быстро теряют свою целостность при высокотемпературном окислении в водяном паре и возникающего в результате этого взрывоопасного водорода [1–3]. Будущие материалы, должны обеспечивать значительно большее количество времени для устранения последствий проектных аварий типа аварий с потерей теплоносителя [4]. Кроме этого, они должны сохранять характеристики оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) ядерного реактора при нормальной эксплуатации [5].

На данный момент, разработка защитных покрытий для циркониевых оболочек ТВЭЛов – актуальная задача [6–10]. Данная стратегия является краткосрочной и наиболее перспективной с точки зрения внедрения в промышленность, так как не требует значительных изменений в конструкциях ядерного реактора и его элементов [11, 12]. Существует и иная стратегия, заключающаяся в замене циркониевых сплавов на другие материалы, такие как SiC_f/SiC [13], FeCrAl [14], молибденовые сплавы [15] и другие. Однако она является долгосрочной, более дорогостоящей и требует полного отказа от ныне существующих реакторов, обладающих превосходными характеристиками при штатных режимах эксплуатации [16, 17].

Хром привлекает огромное внимание ученых в качестве потенциального материала защитных покрытий для циркониевого сплава [18–21]. Он обладает высокой температурой плавления, подходящему коэффициенту теплового расширения и отличной стойкостью к окислению при высоких температурах [21, 22]. Более того, основным преимуществом выбора Cr является то, что он образует защитный оксидный слой Cr_2O_3 на поверхности циркониевого сплава при высокотемпературном окислении [23].

Данный поверхностный слой является барьером для диффузии кислорода в циркониевый сплав [24].

Тем не менее, при температурах свыше 1200 °С происходит активная взаимная диффузия между Cr и Zr, которая впоследствии может привести к постепенному растрескиванию и разрушению защитного покрытия [25–28]. Соответственно, необходимы промежуточные слои, препятствующие взаимной диффузии хрома и циркония.

В качестве материала, который может эффективно ограничивать образование междиффузионного слоя Cr-Zr в течение длительного времени, рассматривается молибден [28]. Данный материал имеет более высокую температуру образования эвтектики Mo-Zr (1550 °С) в сравнении с Cr-Zr (1332 °С), приемлемое значение сечения захвата тепловых нейтронов (2,48 барн), а также близкое с Cr и Zr значение коэффициента термического расширения [28].

Таким образом, целью настоящей работы является установление закономерностей взаимной диффузии и высокотемпературной коррозии при окислении циркониевого сплава Э110 с двухслойным покрытием Cr/Mo, осажденным методом магнетронного распыления.

Для достижения данной цели, были поставлены следующие задачи.

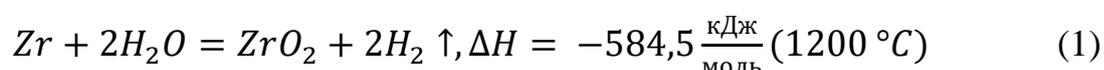
- 1) Нанести защитные Cr и Cr/Mo покрытия на подложки из циркониевого сплава Э110 методом магнетронного распыления.
- 2) Проанализировать структурно-фазовые преобразования при нагреве образцов с покрытиями методом *in situ* рентгеновской дифракции.
- 3) Провести высокотемпературные испытания образцов на окисление на воздухе и в потоке водяного пара.
- 4) Оценить удельный привес образцов без покрытия и с покрытиями.
- 5) Изучить структурно-фазовое состояние образцов в зависимости от температуры и времени окисления.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Защитные покрытия для циркониевых сплавов

В настоящее время циркониевые сплавы активно используются в ядерной энергетике при изготовлении оболочек ТВЭЛов и других элементов активной зоны водо-водяных энергетических реакторов за счёт низкого сечения захвата тепловых нейтронов (0,18 барн), высокой коррозионной и радиационной стойкости при нормальной эксплуатации (360 °С, 18,6 МПа), приемлемых прочностных характеристик при нейтронном облучении [21, 29, 30]. Тем не менее, возможные аварии с потерей теплоносителя (в англ. литературе loss of coolant accident или LOCA) могут привести к повышению температуры активной зоны реактора (~1200 °С) и как следствие частичному или полному окислению циркониевых сплавов вплоть до разрушения оболочек ТВЭЛов [31].

Одним из недавних примеров является авария, произошедшая в марте 2011 года на АЭС Фукусима-1 [32]. Сильное землетрясение с последующим 15-метровым цунами привело к отключению аварийного энергоснабжения, что послужило причиной тяжелой аварии на реакторе с потерей теплоносителя [33]. Остаточное тепловыделение привело к быстрому повышению температуры активной зоны и превратило охлаждающую воду в пар. Известно, что оболочки из циркониевого сплава подвергаются серьезной деградации из-за быстрой реакции с высокотемпературным паром, сопровождающейся выделением большого количества тепла и накоплением в активной зоне взрывоопасного водорода. Тепло, генерируемое в результате пароциркониевой реакции, протекающей при температуре свыше 860 °С в водяном паре, вызывает дополнительный нагрев активной зоны и выделение большого количества водорода [28]:



Накопление водорода в конечном итоге приводит к повреждению защитных оболочек реактора в результате взрыва с выбросом высокорadioактивных продуктов деления в окружающую среду. Данная авария выявила недостатки использования оболочек ТВЭЛов из циркониевых сплавов за счет их значительного окисления при высоких температурах [26].

Учёными рассматриваются несколько вариантов решения данной проблемы. Одним из подходов является замена циркониевых сплавов другими конструкционными материалами, например, сплавами на основе железа, молибдена, композиционных материалов на основе SiC, материалов на основе МАХ-фаз [6, 17, 34–36]. Поскольку, это требует значительных изменений в конструкции ТВЭЛов, то данная стратегия имеет долгосрочную перспективу. Самым быстрореализуемым и простым путём считается применение технологий модифицирования поверхности циркониевых оболочек ТВЭЛов, позволяющих сформировать защитные покрытия, без изменения объемных свойств циркониевых сплавов [12, 26].

Покрытия должны удовлетворять следующим характеристикам: стабильность при нейтронном облучении, стойкость к высокотемпературному окислению в водяном паре, приемлемое значение сечения захвата тепловых нейтронов, адгезионная прочность [28]. Кроме этого, любое покрытие желательно должно содержать, по крайней мере, один из трех элементов (Cr, Al или Si), поскольку они при высокотемпературном окислении на поверхности образуют защитные оксидные слои Cr_2O_3 , Al_2O_3 и SiO_2 , соответственно [8, 26, 37, 38]. Данные оксиды способны обеспечивать потенциальную защиту для циркониевых сплавов, поскольку скорость диффузии кислорода через них достаточно низкая, что позволяет оксидам медленно расти и в конечном итоге образовывать непрерывные защитные диффузионные барьеры для кислорода [8].

1.1.1 Покрyтия на основе МАХ-фаз

МАХ-фазы ($M_{n+1}AX_n$) представляют собой класс слоистых материалов, где М – переходный металл (Ti, Cr, Ta, V и др.), А – металл IIIA и IVA группы периодической таблицы (Al, Si, Ge и др.), X – С или N, $n=1-3$ [39].

Радиационно-стойкие покрытия на основе МАХ-фаз Ti_3SiC_2 , в особенности Al-содержащие $TiAlN$, Ti_2AlC и Cr_2AlC , обладают превосходной стойкостью к окислению при высоких температурах, т.к. образуют плотный защитный оксидный слой Al_2O_3 [37], поэтому они рассматриваются в качестве защитных покрытий. Однако стоит принимать во внимание быструю диффузию элементов «А» (Al и Si) МАХ-фазы в циркониевый сплав с образованием междиффузионного слоя, который может снижать защитные свойства покрытия [28].

В исследовании [40] было получено 2 вида покрытия Cr–Al–C, нанесенных на циркониевый сплав, магнетронным распылением импульсами высокой мощности (в англ. литературе HiPIMS) с использованием мишени на основе Cr_2AlC . Одно из полученных покрытий толщиной 7 мкм впоследствии было отожжено, и его толщина составила 3 мкм. Циркониевый сплав с покрытиями сохранял свои защитные свойства в течение двух часов во влажном воздухе при 1200 °С. Тем не менее, в процессе окисления образовался пористый слой на границе раздела подложка/покрытие в результате диффузии Cr, Al и C внутрь подложки, что отрицательно сказывается на защитных свойствах покрытия (рисунок 1).

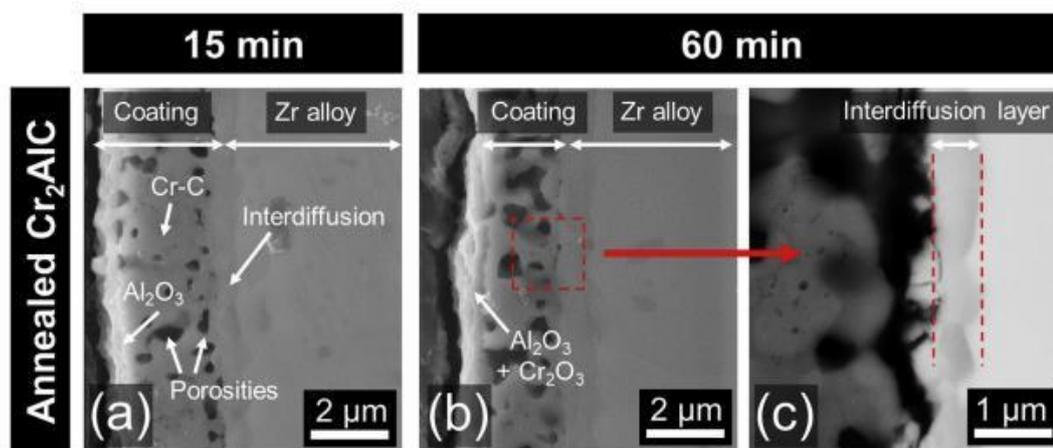


Рисунок 1 – СЭМ изображения поперечных сечений отожженного Cr₂AlC покрытия после окисления при 1200 °С на воздухе в течение 15 мин (a) и 60 мин (b, c) [40]

Также покрытия, содержащие Al (TiAlN и CrAlN), во время выдержки в автоклаве начинают образовывать слой AlO(OH) на поверхности, что отрицательно сказывается на коррозионной стойкости вследствие плохой адгезии. Кроме того, наблюдалось значительное растрескивание и отслаивание покрытий, что приводило к последующему окислению и разрушению покрытий [41, 42].

1.1.2 Керамические защитные покрытия

Различные типы керамических покрытий в частности оксиды, карбиды и нитриды, способные образовывать защитные слои при коррозии и окислении, также могут рассматриваться как защитные покрытия [26].

С целью повышения стойкости циркониевого сплава к высокотемпературному окислению покрытие CrN толщиной 13 мкм было нанесено на подложку из сплава методом катодно-дугового осаждения [38]. Результаты испытаний на окисление на воздухе при температуре 1160 °С показали, что защитное покрытие окислилось до Cr₂O₃. Оксидный слой предотвращал дальнейшую диффузию кислорода в циркониевый сплав, что

привело к стойкости к окислению данной системы. Однако при более высоких температурах наблюдалось растрескивание и локальное разрушение покрытия CrN, связанное с образованием фазы Cr₂N, плотность которого отличается от CrN [43]. На рисунке 2 видно, что после высокотемпературного окисления покрытие является защитным только в областях без локальных разрушений.

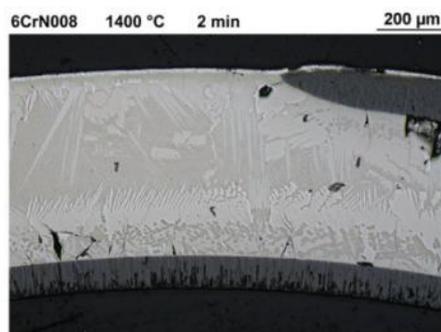


Рисунок 2 – Микроструктура образца, покрытого CrN, после высокотемпературного окисления при 1400 °C [43]

В работе [41] было исследовано коррозионное поведение TiN толщиной 12 мкм нанесенного на циркониевый сплав методом катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (в англ. литературе СА-PVD). Коррозионные испытания в воде при температуре 360 °C и давлении насыщения 18,7 МПа в течение 3 дней показали очень низкое значение удельного привеса у образца с покрытием (1,2 мг/дм²) в сравнении с образцом без покрытия (14,4 мг/дм²). Несмотря на отличную коррозионную стойкость данного покрытия, было показано, что покрытие TiN склонно к диссоциации при облучении ионами Хе⁺ и образованию областей, обогащенных титаном, которая, подобно Zr, приводит к большому выделению взрывоопасного водорода при высокотемпературном окислении [44].

Другим интересным карбидным покрытием является материал на основе кремния SiC, поскольку он образует защитный оксидный слой

SiO₂ при высокотемпературного окислении, а также имеет низкое значение захвата тепловых нейтронов [8]. Однако после испытаний в автоклаве при 350 °С и 200 МПа в течение 24 ч покрытие SiC толщиной 1 мкм полностью исчезло [26].

Покрyтия из Al₂O₃ толщиной 1 мкм были нанесены на циркониевый сплав методом радиочастотного распыления (в англ. литературе radio frequency sputtering) [26]. Несмотря на то, что оксид алюминия является диффузионным барьером для кислорода, было доказано, что Al₂O₃ нестабилен при автоклавных испытаниях (350 °С, 20 МПа), образуя незащищенное соединение AlO(OH) как и в исследованиях [41, 42].

Покрyтие ZrO₂ толщиной 30 мкм было сформировано на циркониевом сплаве методом плазменно-электролитического окисления (в англ. литературе plasma electrolytic oxidation) [45]. Образцы с покрытием показали удельный прирост массы примерно в 1,5 раза меньше, чем образцы без покрытия при выдержке в сверхкритической воде при 500 °С и давлении 25 МПа до 400 ч. Тем не менее, значения удельных привесов от 200 до 350 мг/дм², полученные в результате коррозионных испытаний, считаются слишком высокими для использования в реальных условиях, и в будущем требуется дальнейшее улучшение свойств покрытия [45]. Также, необходимо учитывать очень низкое значение теплопроводности у моноклинной фазы ZrO₂ (1,7 Вт/м·К) [28], что означает, что данный слой будет плохо передавать тепло теплоносителю.

1.1.3 Композитные/многослойные покрытия

Композитные или многослойные покрытия в отличие от однослойных покрытий зачастую демонстрируют лучшую твёрдость, адгезию, стойкость к коррозии [46].

Композитное покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ толщиной 250 мкм было нанесено на циркониевый сплав с использованием технологии высокоскоростного газопламенного напыления (в англ. литературе HVOF) [47]. Исходное покрытие имело множество микропор, которые образовались в процессе распыления (рисунок 3), что является несомненным недостатком данного покрытия, поскольку данные поры являются дополнительными путями диффузии для кислорода в циркониевый сплав.

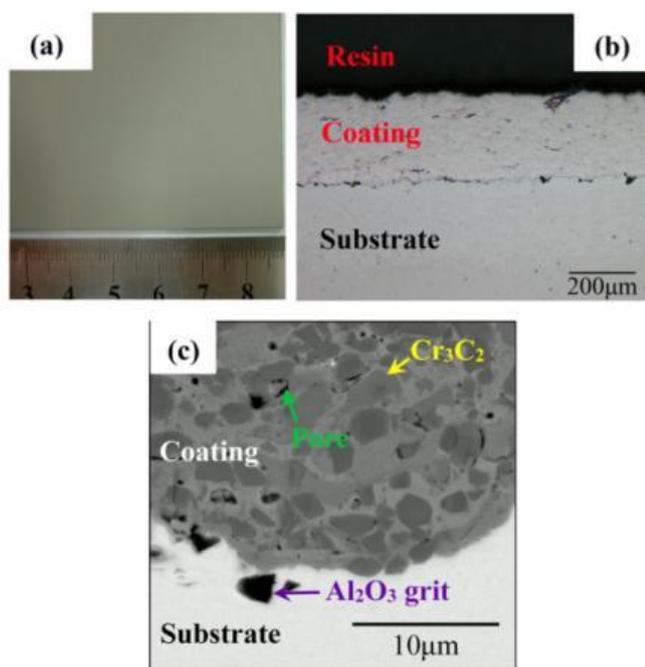


Рисунок 3 – Фотография поверхности покрытия (а), изображение поперечного сечения покрытия (b), увеличенная область поперечного сечения покрытия с микропорами (с) [47]

При воздействии высокотемпературного воздуха покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ продемонстрировало значения удельного привеса меньше на протяжении всего времени окисления до 1000 °С в сравнении с непокрытым сплавом. Однако, коррозионные испытания в сверхкритической воде в течение 72 ч при 400 °С и 10,3 МПа, показали больший удельный прирост массы, чем циркониевый сплав. Ускоренная скорость коррозии подложки, и как

следствие образование оксида циркония на границе раздела, была вызвана биметаллическим эффектом (явление эрозии металлов из-за разности потенциалов между двумя металлами, в данном случае подложка и покрытие). Кроме этого, использование настолько толстого покрытия (250 мкм) на циркониевых оболочках будет сильно невыгодна с экономической точки зрения [28].

Для защиты циркониевых сплавов от высокотемпературного окисления было разработано многослойное покрытие Cr-Zr/Cr/CrN общей толщиной 7 мкм методом вакуумно-дугового распыления [48]. В результате окисления на воздухе при 1100 °С в течение 1 ч образовались оксиды (CrO и Cr₂O₃), которые ограничивали проникновение кислорода вглубь сплава. Тем не менее, при температурах от 1020 до 1100 °С все три слоя, содержащие хром, полностью окислились с образованием плотного многофазового оксидного слоя, содержащего ZrO и ZrO₂ включительно.

Также исследовались нанослойные покрытия CrCN/TiSiCN с общей толщиной 4–6 мкм с различным содержанием углерода и азота в составе, нанесенные на циркониевый сплав методом катодно-дугового осаждения [49]. В покрытиях с высоким содержанием азота (относительно углерода) наблюдались микротрещины, образовавшиеся в результате несоответствия кристаллических решеток CrN и TiN, а также высокое значение удельного привеса при окислении в потоке водяного пара при 1000 °С в течение 95 минут (рисунок 4). В случае покрытий с уменьшенным содержанием азота, появление трещин не наблюдалось, т.к. образовавшиеся фазы в процессе напыления, сняли внутренние напряжения. Кроме этого, покрытие с содержанием углерода к азоту равное одному (C/N = 1) показало наилучшие общие характеристики с точки зрения стойкости к растрескиванию и окислению среди пяти нанослойных покрытий CrCN/TiSiCN. Однако отсутствуют данные о стойкости к окислению при более высоких

температурах и коррозионное поведение при нормальных условиях эксплуатации реактора.

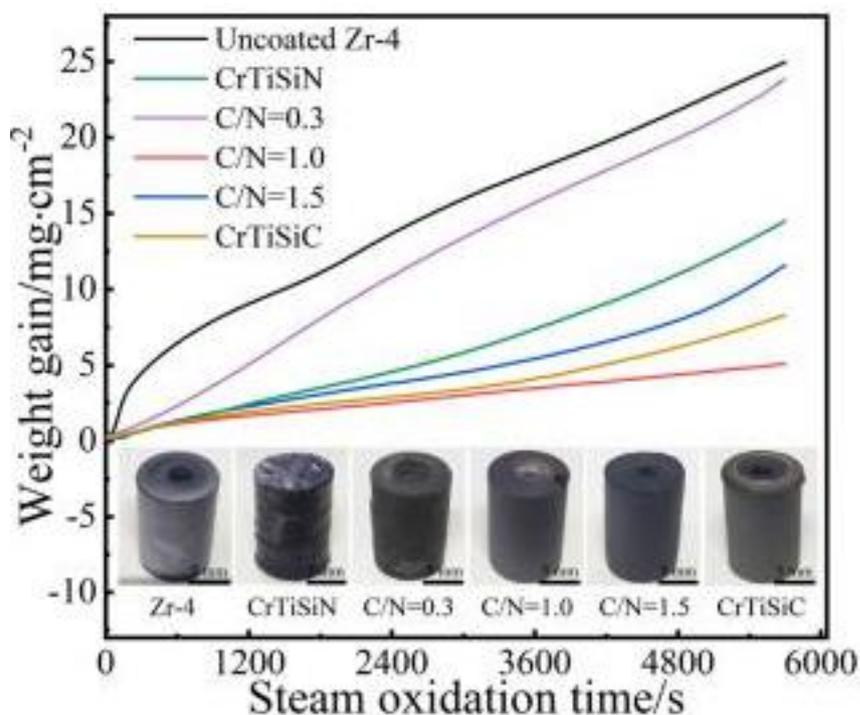


Рисунок 4 – Кривые удельных привесов и внешний вид непокрытого и покрытых образцов после окисления при 1000 °С в течение 95 мин [49]

1.1.4 Металлические покрытия

Покрытия из металлических материалов обычно обладают такими характеристиками, как отличная адгезия, высокая прочность и пластичность, высокая теплопроводность и простота изготовления [50].

Для повышения устойчивости циркониевого сплава в условиях аварии с потерей теплоносителя были получены покрытия FeCrAl толщиной 150 мкм методом плазменного напыления (в англ. литературе plasma spraying process) [51]. Испытания на окисление при температуре 1200 °С в потоке водяного пара в течение 25 минут показали, что образцы с покрытием имели меньший удельный привес, однако после этого времени непокрытый циркониевый сплав имел меньший удельный прирост массы. Более того, в

результате высокотемпературного окисления покрытие разрушилось, и циркониевый сплав значительно окислился. Покрытие перестало выполнять свои защитные свойства из-за взаимной диффузии покрытия и подложки. Стоит также отметить существование низкотемпературной эвтектики Fe-Zr при 900 °С [32]. Кроме этого, значение сечения захвата тепловых нейтронов у сплава FeCrAl хоть и не является критическим (2,43 барн), однако использование толстых покрытий будет сильно снижать нейтронную способность, поскольку огромное число нейтронов будет захватываться покрытием [52].

ZrSi₂ был предложен в качестве защитного покрытия для циркониевого сплава благодаря его стойкости к окислению при высоких температурах, сходству коэффициента теплового расширения с циркониевым сплавом и прекрасным механическим свойствам [53]. Покрытие толщиной 4 мкм было нанесено на подложку методом магнетронного распыления. Коррозионные испытания в пару при 400 °С и 10,3 МПа в течение 72 ч, показали потерю массы образца, что, объясняется образованием летучего гидроксида кремния, и растворимостью диоксида кремния в воде. Также в покрытие после испытаний были обнаружены трещины и поры (рисунок 5).

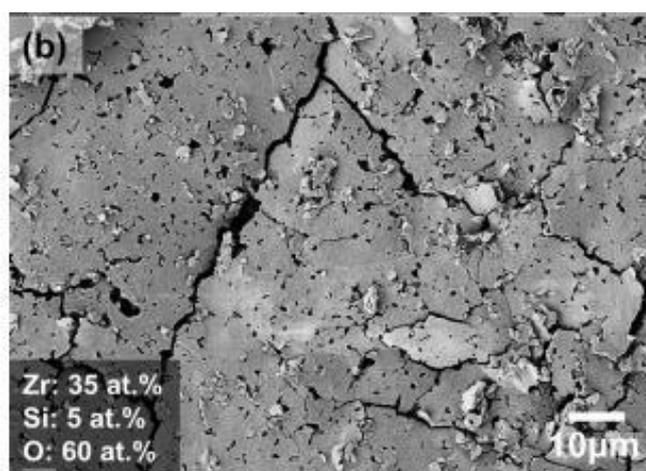


Рисунок 5 – СЭМ изображение поверхности образца после коррозионных испытаний [53]

По сравнению с другими покрытиями хром обладает рядом преимуществ. У него хорошая стойкость к окислению благодаря образованию оксидной пленки Cr_2O_3 на поверхности при окислении и коррозии [23]. Благодаря высокой твердости и хорошей адгезии с подложкой из циркониевого сплава, хром показывает существенно улучшенную износостойкость в сравнении с непокрытым сплавом [24]. Сечение захвата тепловых нейтронов у Cr (2,9 барн) относительно ниже, чем у других альтернативных материалов [21]. Результаты испытаний на ионное и нейтронное облучение показали, что Cr обладает определенной устойчивостью к облучению [8]. Температура образования эвтектики Cr-Zr составляет около 1332 °C, что выше расчетных аварийных температур (~1200 °C) [21]. Кроме этого, схожий коэффициент теплового расширения ($6,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) с цирконием ($5,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и высокий коэффициент теплопроводности (94 Вт/(м·К)) делает хром отличным кандидатом для защитного покрытия циркониевого сплава [26].

Хотя подбор материала для защитного покрытия циркониевых сплавов осуществляется для повышения стойкости к окислению в аварийных условиях, оболочка ТВЭЛа с покрытием также должна обеспечивать безопасность при длительной нормальной эксплуатации [21]. После выдержки при 415 °C и 10 МПа в течение 200 дней удельный прирост массы образца циркониевого сплава с хромовым покрытием (~6 мкм), полученного методом физического осаждения из паровой фазы (в англ. литературе PVD), был ниже ~ в 50 раз, чем у образцов без покрытия [54]. Также авторы исследовали влияние образования трещин в покрытие после осаждения на стойкость к коррозии. Результаты показали, что покрытия обладают определенными свойствами самовосстановления, а трещины оказывают лишь ограниченное и локализованное влияние на общее окисление образца с покрытием (рисунок 6).

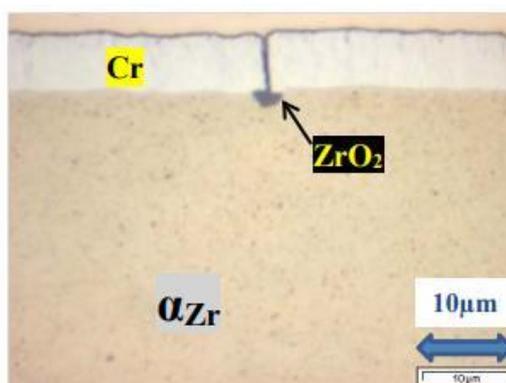


Рисунок 6 – Оптическая фотография образца циркониевого сплава с хромовым покрытием после коррозионных испытаний в автоклаве при 360 °С в течение 60 дней [54]

Для изготовления оболочки ТВЭЛов, устойчивой к высокотемпературному окислению, на циркониевый сплав был нанесен слой хрома толщиной 70 мкм плазменным напылением [51]. После 1-часового воздействия водяным паром при 1200 °С циркониевый сплав с хромовым покрытием показал удельный прирост массы $0,5 \text{ мг/см}^2$, что почти в 83 раза меньше чем у непокрытого образца. После высокотемпературного окисления, на образце образовался защитный оксидный слой Cr_2O_3 толщиной 7 мкм, который обеспечивал защитное состояние циркониевому сплаву и действовал как барьер для диффузии кислорода в циркониевый сплав (рисунок 7).

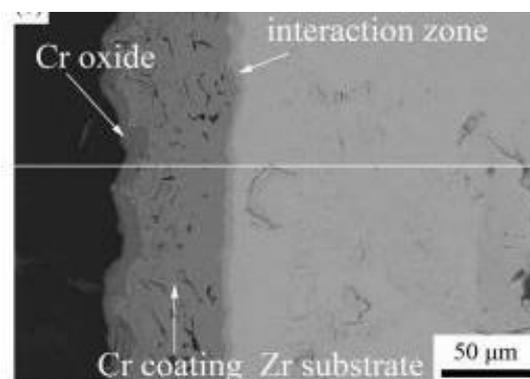


Рисунок 7 – СЭМ изображение поперечного сечения образца, покрытого Cr, с образованием оксидного слоя Cr_2O_3 на поверхности [51]

Что касается более тонких хромовых покрытий, различные испытания на высокотемпературное окисление в пару в диапазоне температур окисления 1000–1300 °С показали, что хромовые покрытия толщиной 12–15 мкм, нанесенные методом физического осаждения из паровой фазы, также значительно повысили стойкость к окислению циркониевого сплава [55].

1.2 Взаимная диффузия Cr-Zr

Эффективность использования покрытий на основе хрома в качестве защиты циркониевых сплавов при штатных режимах эксплуатации (360 °С, 18,6 МПа) и при высокотемпературном окислении в среде водяного пара была продемонстрирована во многих исследованиях [8, 10, 11, 18, 20, 21, 24]. Однако данный материал может потерять свои защитные свойства еще до полного израсходования остаточного покрытия [21]. Это связано с ускоренной диффузией Cr-Zr при высокотемпературном окислении (~1200 °С) и высокой растворимостью Cr в β -Zr [27, 56].

На рисунке 8 представлена схема различных стадий высокотемпературного окисления в водяном пару циркониевого сплава с хромовым покрытием.

На начальном этапе формируется защитный слой Cr_2O_3 на поверхности хромового покрытия. В результате диффузии покрытие хрома расходуется на формирование и рост интерметаллического слоя Cr_2Zr на интерфейсе и твердого раствора хрома в β -фазе циркония под ним [25]. За счёт появления фазы Cr_2Zr , появляются дополнительные пути диффузии для атомов циркония вдоль границ зерен хромового покрытия через слой Cr-Zr.

На следующем этапе кислород, диффундирующий через слои, содержащие хром, взаимодействует с атомами циркония вдоль границ зерен хрома, что ведет к образованию фазы ZrO_2 [27]. Образование данного

соединения способствует дальнейшей диффузии кислорода вглубь циркониевого сплава.

На последнем этапе, в результате образования оксидного слоя ZrO_2 возникает риск растрескивания защитного покрытия и как следствие беспрепятственное проникновение кислорода в циркониевый сплав и резкое его окисление [28].

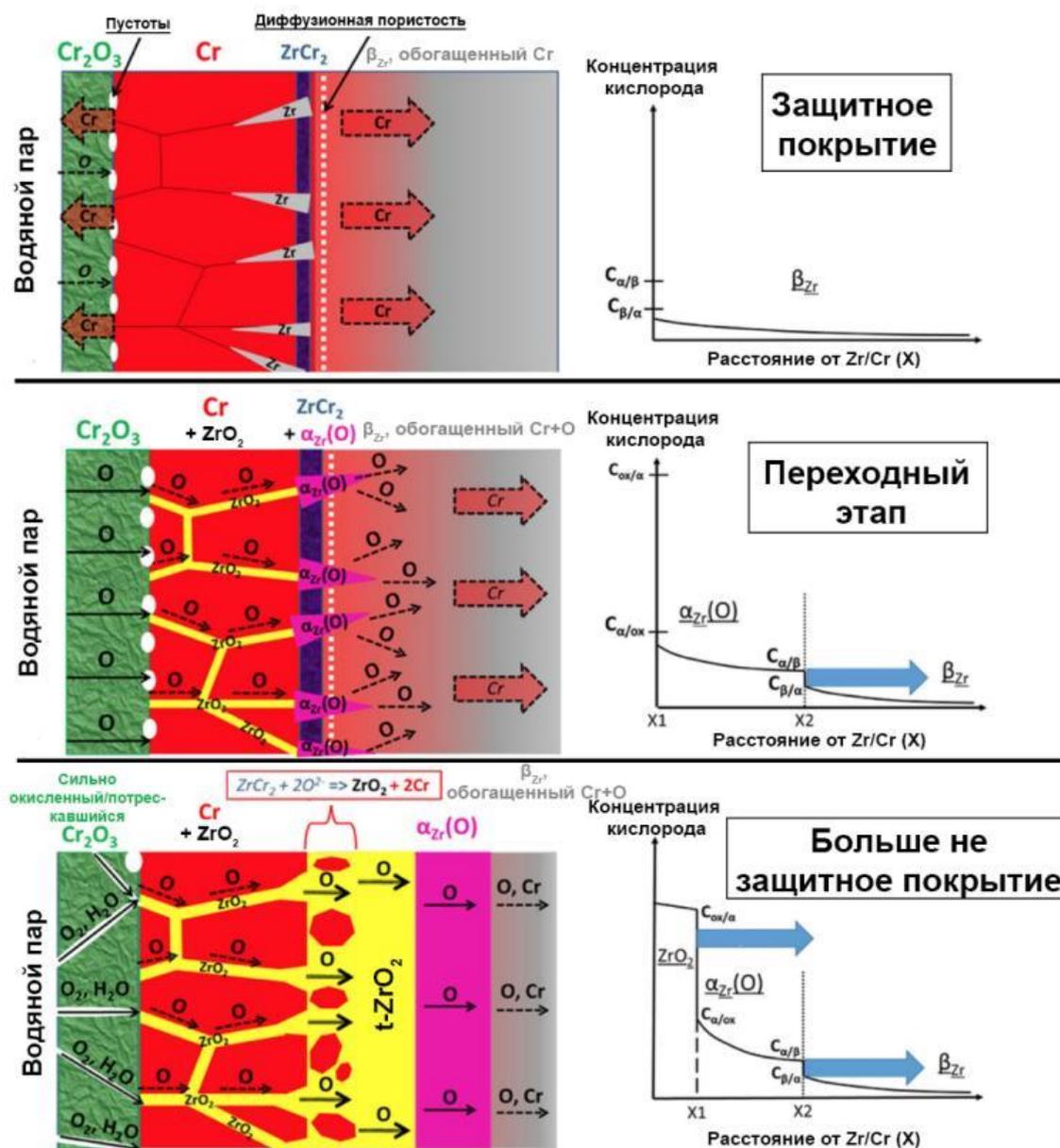


Рисунок 8 – Схема различных стадий высокотемпературного окисления в водяном паре циркониевого сплава с хромовым покрытием [27]

Более того, между хромом и цирконием при высоких температурах наблюдается взаимная диффузия, сопровождающаяся образованием эвтектики Cr-Zr при 1332 °С [25]. Данная температура хоть и является выше расчетных аварийных температур (1200 °С), тем не менее, существует риск возможных запроектных аварий с температурами близкими с температурой образования эвтектики Cr-Zr [21].

1.3 Барьерные подслои для снижения взаимной диффузии Cr-Zr

На сегодняшний момент уже были проведены некоторые исследования, направленные на предотвращение взаимной диффузии Cr-Zr с использованием барьерных подслоев между Cr покрытием и циркониевым сплавом [57–61]. К таким подслоям предъявляется ряд требований [28]. Данное покрытие должно обладать небольшим сечением захвата тепловых нейтронов, чтобы оно не сильно снижало процесс деления. Подслоем должен быть радиационно-стойким, иметь достаточно высокую температуру плавления, формирование возможных эвтектик должно происходить при температурах значительно выше, чем в системе Cr-Zr, коэффициент диффузии должен быть низким по отношению к цирконию, коэффициент термического расширения должен быть схож с цирконием и хромом, а коэффициент теплопроводности должен быть не хуже, чем у циркония.

В одной из работ с использованием плазменного электролитического оксидирования был сформирован промежуточный слой ZrO_2 (толщиной ~6 мкм) между циркониевым сплавом и хромовым покрытием (толщиной ~4 мкм), нанесенным методом катодно-дугового осаждения [59]. Высокотемпературные испытания в среде водяного пара показали, что промежуточный слой ZrO_2 эффективно предотвращал диффузию кислорода и хрома в цирконий в диапазоне температур 900–1100 °С. Однако неизвестно дальнейшее окислительное поведение защитного покрытия при более

высоких температурах. Кроме этого, был предложен подход, основанный на использовании многослойных барьерных покрытий на основе ZrO_2 [58]. Было обнаружено, что окисление в потоке водяного пара при более высоких температурах (1200–1400 °С) ускоряет взаимную диффузию Cr-Zr за счет образования полостей на границе раздела многослойных слоев ZrO_2 /Cr (рисунок 9).

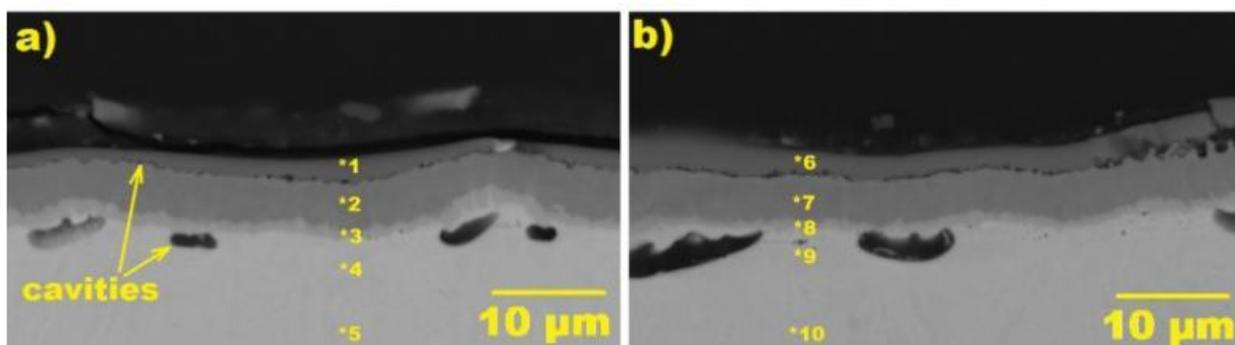


Рисунок 9 – СЭМ изображение поперечного сечения образца с многослойным покрытием ZrO_2 /Cr после окисления при 1200 °С в течение а) 1000 и б) 2000 с [58]

В качестве барьерных покрытий были также предложены толстые двухслойные покрытия CrN/Cr (толщина CrN ~13 мкм, толщина Cr ~25 мкм), нанесенные на циркониевый сплав методом магнетронного распыления [60]. Испытания на высокотемпературное окисление в водяном паре при 1365 °С показали, что образующийся междиффузионный слой ZrN предотвращал взаимную диффузию хрома и циркония, но в течение короткого времени (2 мин). Также при нанесении достаточно толстых керамических покрытий может происходить их растрескивание ввиду разницы в коэффициентах термического расширения в сравнении с хромом и циркониевым сплавом [50]. Поскольку многослойные покрытия могут быть более устойчивыми к разрушению из-за уменьшения макронапряжений в покрытиях [62], то было рассмотрено поведение многослойных покрытий на основе CrN/Cr общей толщиной ~9–10 мкм, нанесенных на циркониевый сплав методом

магнетронного распыления [57], как барьер для подавления Cr-Zr диффузии. Результаты высокотемпературного окисления в потоке водяного пара показали, что при использовании многослойных систем образование междиффузионного слоя Cr-Zr происходило при более высокой температуре, чем при использовании однослойного хромового покрытия. Однако многослойные покрытия давали кратковременный эффект (менее 2 минут при 1330 °С) и впоследствии должны быть улучшены.

Также, для предотвращения взаимной Cr-Zr диффузии использовались многослойные покрытия Cr-CrN/TiSiN-Cr толщиной ~15 мкм, нанесенные на циркониевый сплав методом катодно-дугового осаждения [61]. Испытания на окисление в потоке пара при 1200 °С в течение 25 минут показало, что на границе раздела оксид/нитридного покрытия образовались поры с последующим образованием выпуклостей на поверхности (рисунок 10).

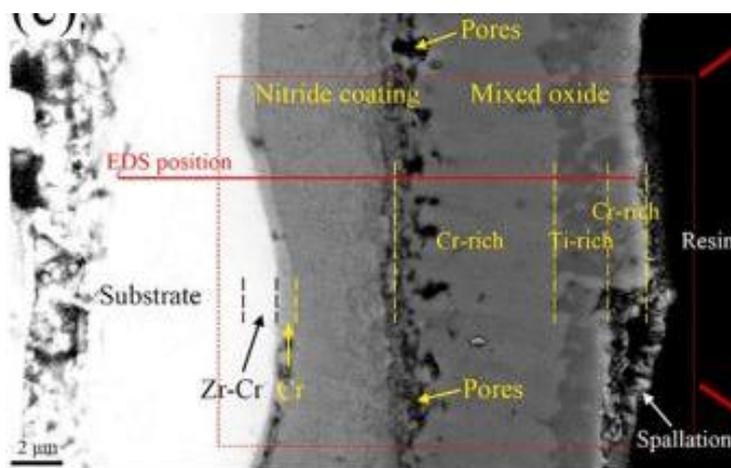


Рисунок 10 – СЭМ изображение поперечного сечения циркониевого сплава с Cr-CrN/TiSiN-Cr покрытием после окисления в потоке пара при 1200 °С в течение 1500 с [61]

Кроме этого, были предприняты попытки использования молибдена в качестве барьерного подслоя, который является одним из наиболее многообещающих материалов для предотвращения взаимной диффузии между Cr и Zr. Он обладает высокой температурой плавления (2623 °С),

приемлемым значением сечения захвата тепловых нейтронов (2,5 барн), низким коэффициентом диффузии в β -Zr в сравнении с Cr, высокой теплопроводностью (139 (Вт/(м·К))), а формирование возможной эвтектики происходит при температуре гораздо выше (1550 °C), чем в системе Cr-Zr [28]. Авторами [23] между защитным покрытием FeCrAl (толщиной более 100 мкм) и циркониевым сплавом для предотвращения их взаимной диффузии при высоких температурах был нанесен толстый слой Mo толщиной 15 мкм методом холодного газодинамического напыления (в англ. литературе cold spray). Было обнаружено, что нанесенный подслоя эффективно предотвращал взаимную диффузию между FeCrAl и циркониевым сплавом при температуре 1200 °C в течение нескольких десятков минут. В работе [63] нанесение промежуточного слоя Mo (толщиной ~12–14 мкм) между циркониевым сплавом и сплавом CrAl (толщиной ~10–13 мкм) методом магнетронного распыления продемонстрировало устойчивость к высокотемпературному окислению до 1300 °C. Однако в обеих работах были использованы толстые покрытия, которые будут сильно снижать экономические аспекты реактора, т.к. сечение захвата тепловых нейтронов играет значимую роль при выборе толщин покрытий [64].

Что касается более тонких покрытий, то группа ученых нанесла промежуточный слой Mo (толщиной 2–5 мкм) между циркониевым сплавом и однослойным хромовым покрытием (толщиной 10–12 мкм) методом физического осаждения из паровой фазы [65]. Испытания на окисление на воздухе при 1100 °C показали, что толщина остаточного хрома уменьшается медленнее в системе Cr/Mo/Zr, чем в системе Cr/Zr в течение 60 мин. Однако не были исследованы кинетика окисления, поведение промежуточных слоев Cr-Mo и Mo-Zr, образующихся после высокотемпературного окисления, а также окислительное поведение в условиях аварии с потерей теплоносителя.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1 Подготовка образцов

Плоские ($15 \times 15 \times 2 \text{ мм}^3$) и трубчатые (наружный диаметр – 9,1 мм, внутренний – 7,9 мм) образцы циркониевого сплава Э110 (основа – Zr, 0,9–1,1 вес.% Nb, 0,06–0,1 вес.% O) использовались в качестве подложек. Предварительно в плоских образцах просверливались круглые отверстия ($\varnothing 2 \text{ мм}$) для их удержания во время испытаний на окисления. После этого образцы шлифовались и полировались с использованием бумаги из карбида кремния (SiC) (P600→P1200→P2500→P4000) на шлифовально-полировальном станке MP-1B (TIME Group Inc., Пекин, Китай). Затем они обезжиривались путем погружения в ультразвуковую ванну с ацетоном в течение 15 мин. Непосредственно перед нанесением покрытий образцы были прокипячены и высушены в парах изопропилового спирта. В экспериментах по осаждению покрытий дополнительно использовались подложки из монокристаллического полированного Si (110).

2.2 Нанесение покрытий методом магнетронного распыления

Нанесение покрытий на образцы осуществлялось на ионно-плазменной установке методом магнетронного распыления. Детальное описание экспериментальной установки, разработанной в Томском политехническом университете, представлено в [66]. Перед осаждением покрытий подложки бомбардировались ионами аргона в течение 20 мин с использованием ионного источника с холловским дрейфом электронов. Параметры ионного тока I , напряжения разряда U и давления аргона P при ионной очистке составили 38 мА, 2,5 кВ, 0,12 Па, соответственно. В камере предварительно был получен остаточный вакуум, составляющий 10^{-3} Па.

В настоящей работе было выполнено осаждение двухслойного покрытия Cr (8 мкм)/Mo (3 мкм), дополнительно получали однослойное покрытие из хрома, толщиной 8 мкм. Хромовое покрытие было получено с использованием мультикатодного магнетронного распыления Cr мишени (Ø90 мм) чистотой 99,95% с источником питания постоянного тока. Выбор режима осаждения покрытия из хрома, основывался на работах [57, 67]. Подслой молибдена осаждали с помощью одиночного магнетронного распыления с источником постоянного тока. В качестве мишени использовался диск из Mo (99,95 %), диаметром 90 мм. Ввиду крепления образцов в держателе при нанесении на них покрытий, часть поверхности образцов не имела защитного покрытия (площадь непокрытой области составляла 5–10 мм²). В процессе нанесения покрытий инфракрасный пирометр Optris CT laser 3MH1CF4 (Optris GmbH, Германия) измерял температуру образцов. Параметры осаждения покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры осаждения Cr и Mo слоев

| Слой | Q , Вт/см ² | $U_{см}$, В | j_n , mA/см ² | t , ч | $T_{макс}$, °C | h , мкм |
|------|--------------------------|--------------|----------------------------|---------|-----------------|-----------|
| Cr | 39 | -50 | 65 | 2,5 | 320 | 8 |
| Mo | 39 | -50 | 55 | 1,6 | 320 | 3 |

Примечание: Q – плотность мощности разряда при осаждении плёнок; $U_{см}$ – потенциал смещения на подложку при осаждении плёнок; j_n – плотность тока на подложку; t – время осаждения пленок; $T_{макс}$ – максимальная температура при осаждении; h – толщина пленки.

Для сравнения поведения образцов с Cr/Mo покрытием при окислении в потоке водяного пара дополнительно использовались образцы с однослойным покрытием из хрома [57].

2.3 Высокотемпературные испытания на воздухе

Высокотемпературное окисление образцов проводилось в атмосферной печи (ATS 3210, Applied Test Systems Inc., Батлер, Пенсильвания, США) при нагреве на воздухе от 500 до 1100 °С со скоростью нагрева ~20 °С/мин и последующей выдержкой в течение 15, 30, 45 и 60 минут. После окисления образцы охлаждались со скоростью ~20 °С/мин до комнатной температуры.

Прирост массы образцов измеряли на аналитических весах CP 124S (Sartorius, Goettingen, Германия) с точностью 10^{-4} г.

Удельный прирост массы образцов с покрытием измеряли до и после испытания на окисление с учетом непокрытой части (области без покрытия в месте крепления подложкодержателя) в соответствии с процедурой, описанной в исследовании [68]:

$$W_{\text{пок}} = \frac{\Delta m_{\text{пок}}}{S_{\text{пок}}}, \quad (1)$$

$$\Delta m_{\text{пок}} = \Delta m - S_{\text{неп}} \cdot W_{\text{Zr}}, \quad (2)$$

где $\Delta m_{\text{неп}}$ – прирост массы части образца с покрытием (в мг), $S_{\text{пок}}$ – площадь части образца с покрытием (в см²), Δm – прирост массы образца (в мг), $S_{\text{неп}}$ – площадь непокрытой части образца (в см²); W_{Zr} – удельный прирост массы циркониевого сплава без покрытия (в мг/см²). На рисунке 11 показан внешний вид циркониевого сплава Э110 с покрытием и непокрытой областью.



Рисунок 11 – Внешний вид циркониевого сплава Э110 с покрытием; в левом нижнем углу непокрытая область

2.4 Высокотемпературные испытания в потоке водяного пара

Высокотемпературные испытания в потоке водяного пара при 1200 °С проводились на установке LOCA345 (ОАО «ВНИИНМ», Москва, Россия). Образцы выдерживались в зоне предварительного нагрева при температуре 300 °С в течение 300 с, затем перемещались в высокотемпературную зону печи и нагревались до 1200 °С со скоростью нагрева 20 °С/с. Отсчет времени окисления начинался с момента нагрева образцов до 1197 °С. Во время испытаний расход пара составлял 4,0 мг/см², а температура образцов поддерживалась на уровне 1200±3 °С. По достижении времени окисления образцы закаливались водой. Продолжительность испытаний составляла 1000 и 2000 с.

Высокотемпературное окисление в водяном паре при более высоких температурах было осуществлено на установке GASPAR (АО «ЛУЧ», Подольск, Россия), состоящей из керамической трубы (Ø28 × 2 мм²), установленной в печи с графитовым нагревателем. В трубку вводился пар с массовым расходом 40 мг/с. В экспериментах образцы помещались в трубу и нагревались со скоростью 33 °С/с. Образцы окислялись при 1330 °С в течение 120, 300 и 720 с. Также было проведено высокотемпературное испытание при 1400 °С в течение 120 с. После окисления образцы отводили в холодную зону печи для охлаждения до температуры 900 °С в паре со скоростью 20 °С/с. По достижении 900 °С образцы закаливали в дистиллированной воде.

2.5 Структурно-фазовые исследования образцов

Микроструктура и элементный состав поперечных шлифов образцов до и после окисления были проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA3 (Tescan, Брно, Чешская Республика)

и приставки для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Хай-Уиком, Великобритания). Также для анализа микроструктуры поперечных шлифов образцов после окисления дополнительно была использована оптическая микроскопия (ОМ) AXIOVERT 200MAT (Zeiss, Йена, Германия). Фазовый состав был исследован методом рентгеновской дифракции на дифрактометре XRD-7000S (Shimadzu, Киото, Япония) в конфигурации Брэгга-Брентано с CuK_α -излучением (длина волны $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) при ускоряющем напряжении 40 кВ и силе тока 30 мА. Для определения фазового состава образцов использовалась база данных PDF4+ 2021 и программное обеспечение Sieve.

Исследования *in situ* структурно-фазовых превращений были проведены на станции «Прецизионная дифрактометрия II» Института ядерной физики СО РАН на канале № 6 синхротронного излучения накопителя электронов ВЭПП-3. Экспериментальные образцы были исследованы при длине волны $1,0084 \text{ \AA}$ в процессе линейного нагрева в вакууме в диапазоне температур 25–1250 °С со скоростью 50 °С/мин. Для *in situ* исследований были специально подготовлены образцы однослойного Cr и двухслойного Cr/Mo покрытий на циркониевом сплаве Э110 с размерами $10 \times 10 \times 0,5 \text{ мм}^3$. Выбор толщин барьерного Mo слоя и защитного Cr покрытия подбирались таким образом, чтобы интенсивности отраженных рентгеновских лучей на дифрактограммах от Zr, Cr и Mo были сопоставимыми. Оценка глубины проникновения излучения при длине волны $1,0084 \text{ \AA}$ показала, что толщины барьерного слоя и защитного покрытия должны составлять 1 мкм. Параметры получения плёнок для *in situ* исследований были такие же, как и контрольных образцов, используемых в тестах на окисление (см. таблица 1).

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В настоящей работе используются метод магнетронного распыления защитных двухслойных покрытий на циркониевый сплав Э110 для повышения безопасности работы водо-водяных энергетических реакторов. Мировое сообщество предлагает большое разнообразие защитных покрытий от высокотемпературного окисления оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов).

В основной части выпускной квалификационной работы были исследованы барьерные свойства и стойкость при высокотемпературном окислении двухслойного покрытия Cr/Mo, нанесенного на циркониевый сплав Э110 методом магнетронного распыления. Актуальность данного научного проекта заключается в повышении безопасности в ядерной энергетике за счет создания защитных покрытий для циркониевых оболочек ТВЭЛов, которые будут обеспечивать безопасность ядерных реакторов при повышенных температурах. Результатами данного исследования заинтересованы предприятия, работа которых связана с ядерной промышленностью.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого были определены 2 конкурента на рынке: однослойное хромовое покрытие (K_1), многослойное Cr/CrN покрытием (K_2). Данные виды покрытий были выбраны в качестве конкурентов, поскольку на сегодняшний день однослойное хромовое покрытие является наиболее перспективным материалом, рассматриваемым в качестве защитного покрытия для циркониевых оболочек ТВЭЛов. Что касается многослойного Cr/CrN покрытия, то оно является улучшением хромового покрытия. В таблице 8 представлена оценочная карта для сравнения разработок.

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспособность | | |
|---|--------------|--------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|
| | | Проект | K_1 | K_2 | Проект | K_1 | K_2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1. Низкое сечение захвата тепловых нейтронов | 0,2122 | 5 | 5 | 4 | 1,061 | 1,061 | 0,8488 |
| 2. Высокая стойкость к окислению | 0,1548 | 5 | 3 | 4 | 0,774 | 0,4644 | 0,6192 |
| 3. Высокая | 0,0214 | 5 | 5 | 5 | 0,107 | 0,107 | 0,107 |

| | | | | | | | |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|--------------|
| радиационная стойкость | | | | | | | |
| 4. Высокая температура плавления | 0,0404 | 5 | 3 | 4 | 0,202 | 0,1212 | 0,1616 |
| 5. Формирование возможных эвтектик при высоких температурах | 0,0244 | 4 | 3 | 5 | 0,0976 | 0,0732 | 0,122 |
| 6. Низкий коэффициент диффузии по отношению к цирконию | 0,1166 | 5 | 3 | 5 | 0,583 | 0,3498 | 0,583 |
| 7. Схожий коэффициент термического расширения с цирконием | 0,0794 | 4 | 5 | 3 | 0,3176 | 0,397 | 0,2382 |
| 8. Высокий коэффициент теплопроводности | 0,1742 | 5 | 5 | 4 | 0,871 | 0,871 | 0,6968 |
| 9. Высокие прочностные характеристики | 0,0788 | 5 | 5 | 4 | 0,394 | 0,394 | 0,3152 |
| 10. Хорошая адгезия с подложкой | 0,0978 | 5 | 5 | 4 | 0,489 | 0,489 | 0,3912 |
| Итого | 1 | 48 | 42 | 42 | 4,8962 | 4,3276 | 4,083 |

Исходя из полученных данных, коэффициент конкурентоспособности самый высокий у разрабатываемого проекта (4,8962). Он обходит конкурентов в значении стойкости к окислению и температуре плавления.

4.1.3 SWOT-анализ

В таблице 9 представлен SWOT-анализ данного проекта.

Таблица 9 – SWOT-анализ

| | | |
|--|---|---|
| | <p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Магнетронное распыление позволяет равномерно напылять покрытия.</p> <p>С2. Напыление металлических покрытий обеспечивает лучшую адгезию чем, например, керамических.</p> <p>С3. Большая часть экспериментов может быть проведена в ближайшие сроки.</p> <p>С4. Малая часть научных групп занимается исследованием данного типа покрытия.</p> <p>С5. Достаточно сведений для того, чтобы уже осуществить проект.</p> | <p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Для полной осведомленности необходимо проводить дополнительные исследования.</p> <p>Сл2. Испытания in situ проходят в другом городе.</p> <p>Сл3. При очистке образцов следует избегать царапин на подложке.</p> <p>Сл4. Для того чтобы улучшить проект, стоит получить дополнительные образцы с другими толщинами покрытий.</p> <p>Сл5. Некоторая часть экспериментов достаточно дорогостоящая.</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Необходимость улучшения безопасности в ядерной промышленности.</p> <p>В2. Запасы органического топлива значительно ограничено в отличие от ядерной энергетики, что позволяет рассматривать</p> | <p>Ядерная промышленность нуждается в более безопасных ядерных реакторах поскольку это наиболее перспективная энергетическая промышленность. В частности это можно осуществить, создав защитные покрытия для циркониевых оболочек ТВЭЛов, к котором</p> | <p>Поскольку ядерная промышленность постоянно совершенствуется и присутствует необходимость в разработке более безопасных ядерных реакторах, заинтересованные стороны проекта будут нуждаться в создании защитных покрытий, поэтому будут предоставлять</p> |

| | | |
|---|---|--|
| <p>атомные электростанции (АЭС) как долгосрочную перспективу.</p> <p>В3. Ядерная промышленность постоянно совершенствуется, поэтому разработка новых покрытий будет всегда актуальна.</p> <p>В4. На данный момент нет альтернативы в данной энергетике.</p> | <p>предъявляется ряд требований. Сильные стороны проекта согласуются с этими требованиями.</p> | <p>финансирование для дополнительных достаточно дорогостоящих исследований, которые возможной будут необходимы для данного проекта.</p> |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Серьезная авария на какой-нибудь АЭС может привести к закрытию всех АЭС.</p> <p>У2. Нахождение конкурентами другого типа покрытия.</p> <p>У3. Многие европейские страны закрывают свои АЭС.</p> <p>У4. Развитие водородной энергетики.</p> <p>У5. Плохая эффективность данного защитного покрытия.</p> | <p>Многие научные группы занимаются разработкой новых защитных покрытий, что может привести к отказу от разрабатываемого проекта, однако в связи с достаточными сведениями для осуществления проекта и сильных его сторон, данную разработку быстрее можно будет внедрить.</p> <p>Что касается, развивающейся водородной энергетики и отказом некоторых стран от АЭС, то поскольку Росатом уже запустил пробные АЭС с хромовыми защитными покрытиями, то видно, что возможные угрозы не снижает нужды в улучшении ядерной энергетики.</p> | <p>Возможные угрозы, связанные с закрытием АЭС могут автоматически привести и к отказу от защитных покрытий. Для того чтобы минимизировать слабости, необходимо еще более четко соблюдать требования, предъявляемые к покрытиям, чтобы заинтересованные стороны были уверены в эффективности разработок более безопасных АЭС. Что касается создания других защитных покрытий, то стоит направить разработку на поиск более дешевых методов исследования.</p> |

4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Для определения возможных альтернатив проведения научного исследования воспользуемся морфологическим подходом. Рассмотрим два варианта исполнения данной научно-исследовательской работы с помощью таблицы 10.

Таблица 10 – Морфологическая матрица для научно-исследовательской работы

| Характеристика | 1 вариант исполнения (выбранный в работе) | 2 вариант исполнения | 3 вариант исполнения |
|---------------------|---|----------------------|----------------------|
| Толщина Cr покрытия | 8 мкм | 6 мкм | 12 мкм |
| Толщина Mo покрытия | 3 мкм | 2 мкм | 4 мкм |

1 вариант исполнения является наиболее рациональным, поскольку данные толщины покрытий самые оптимальные. Если рассматривать 2 вариант исполнения, то данных толщин может быть недостаточно для выполнения заданных свойств покрытия. Что касается 3 варианта исполнения, то покрытия получатся слишком толстые, из-за чего будут ухудшаться характеристики материала. Кроме этого, стоимость нанесения покрытий возрастет.

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Работа выполнялась студенткой (инженер) под руководством научного руководителя (таблица 11).

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № раб | Содержание работ | Должность исполнителя |
|--|-------|--|-------------------------|
| Разработка технического задания | 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель (Р) |
| Выбор направления исследований | 2 | Выбор направления исследований и способа решения задач | Руководитель |
| | 3 | Подбор и изучение материалов по теме | Инженер (И) |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 4 | Составление плана экспериментов | Руководитель Инженер |
| | 5 | Подготовка образцов для экспериментов | Инженер |
| | 6 | Проведение экспериментальных работ | Руководитель Инженер |
| | 7 | Выполнение расчётов | Инженер |
| Обобщение и оценка результатов | 8 | Анализ и обработка полученных результатов | Инженер |
| | 9 | Обсуждение и оценка эффективности результатов | Руководитель Инженер |
| Оформление отчета по НИР | 10 | Составление пояснительной записки | Инженер |
| | 11 | Подготовка к защите | Инженер |

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

В таблице 1 приложения А представлены временные показатели проведения научного исследования для 3 вариантов исполнения (см. таблицу 10).

Анализируя полученные данные, можно понять, что наиболее быстрый вариант исполнения является 1 (126 календарных дней).

4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

В таблице 12 представлен календарный план-график проведения НИОКР по теме научно-исследовательской работы.

Красный – руководитель. Зеленый – инженер. Оранжевый – руководитель и инженер.

Таблица 12 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| № работ | Вид работ | Исполнители | Ткi, кал. дн | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------------------------------------|-------------|--------------|------------------------------------|---|---------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|--------|---|---|---------|---|---|------|
| | | | | Сентябрь | | Октябрь | | | Ноябрь | | | Декабрь | | | Январь | | | Февраль | | | Март |
| | | | | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 1 | Составление ТЗ | Р | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Выбор направления исследований | Р | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Подбор и изучение материалов по теме | И | 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Составление плана экспериментов | Р, И | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Подготовка образцов к эксперименту | И | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Проведение экспериментов | Р, И | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Выполнение | И | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|------|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | расчётов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Анализ и обработка полученных результатов | И | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | Обсуждение и оценка эффективности полученных результатов | Р, И | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Составление пояснительной записки | И | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Подготовка к защите ВКР | И | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Расчет материальных затрат НТИ. В таблице 13 представлен расчет материальных затрат. Затраты на материалы одинаковы для всех исполнений.

Таблица 13 – Материальные затраты

| Наименование | Марка, размер | Количество | Цена за ед., руб | Затраты на материалы, (З _м), руб |
|---------------------|---|------------|------------------|--|
| Подложка | Сплав Э110, 15 × 15 × 2 мм ³ | 12 | 130 | 1560 |
| Шлифовальная бумага | SiC бумага | 40 | 100 | 4000 |
| Ацетон | 0,5 л | 1 | 179 | 179 |
| Изопропиловый спирт | 0,5 л | 1 | 187 | 187 |
| Подложка Si | 65 × 65 × 0,05 мм ³ | 1 | 100 | 100 |
| Мишень молибдена | Круглая, 90 мм | 1 | 40000 | 40000 |
| Мишень хрома | Круглая, 90 мм | 1 | 30000 | 30000 |
| Баллон | Ar | 1 | 6500 | 6500 |
| Итого: | | | | 82526 |

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В таблице 14 представлен расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

| № п/п | Наименование оборудования | Кол-во единиц оборудования | Цена единицы оборудования, тыс.руб. | Амортизация оборудования, тыс.руб. | | |
|--------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------|-------|
| | | | | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп.3 |
| 1. | Ноутбук Asus x541s | 1 | 40 | 3,2 | 3,3 | 3,2 |
| 2. | Ионный источник APEL-IS7CELL | 1 | 100000 | 126 | 95 | 157 |
| Итого: | | | | 129 | 98 | 160 |

Время пользования ноутбука = время проекта.

Время пользования ионным источником: 4 дня (1 исп.), 3 дня (2 исп.), 5 дня (3 исп.).

$$A_{o1} = \frac{C_{пер}}{T_n \cdot 365} \cdot D = \frac{C_{об} + C_{дм}}{T_n \cdot 365} \cdot D = \frac{40 + 6}{5 \cdot 365} \cdot 126 = 3 \text{ тыс. руб.}$$

$$A_{o2} = \frac{C_{пер}}{T_n \cdot 365} \cdot D = \frac{C_{об} + C_{дм}}{T_n \cdot 365} \cdot D = \frac{100000 + 15000}{10 \cdot 365} \cdot 4 = 126 \text{ тыс. руб.}$$

A_o – амортизация оборудования

$C_{пер}$ – первоначальная стоимость оборудования

$C_{об}$ – закупочная цена оборудования

$C_{дм}$ – цена на доставку и монтаж

T_n – срок службы

D – время пользования

Основная заработная плата исполнителей темы. Баланс рабочего времени представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|-----------------------------|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |

| | | |
|--|-----|-----|
| Количество нерабочих дней | | |
| - выходные дни | 104 | 104 |
| - праздничные дни | 14 | 14 |
| Потери рабочего времени | | |
| - отпуск | 24 | 24 |
| - невыходы по болезни | - | - |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223 | 223 |

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p,$$

где Z_b – базовый оклад, руб.;

k_p – районный коэффициент, равный 30% (для Томска).

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$Z_{мр} = Z_b \cdot k_p = 42744 \cdot 1,3 = 55567 \text{ руб}$$

$$Z_{ми} = Z_b \cdot k_p = 16242 \cdot 1,3 = 21115 \text{ руб}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени

научно-технического персонала, раб. дн.

$$Z_{днр} = \frac{Z_{мр} \cdot M}{F_d} = \frac{55567 \cdot 11,2}{223} = 2790$$

$$Z_{дни} = \frac{Z_{ми} \cdot M}{F_d} = \frac{21115 \cdot 11,2}{223} = 1060$$

Расчёт основной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды (30%) приведены в таблицах 16–18.

Таблица 16 – Расчёт основной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды (исп. 1)

| Исполнители | З _б , руб. | k_p | З _м , руб | З _{дн} , руб. | Т _р , раб. дн. | З _{осн} , руб. | З _{внеб} , руб |
|--------------|--------------------------|-------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Руководитель | 42744 | 1,3 | 55567 | 2790 | 20 | 55800 | 16740 |
| Инженер | 16242 | 1,3 | 21115 | 1060 | 81 | 85860 | 25758 |
| Итого | | | | | | 141660 | 42498 |

Таблица 17 – Расчёт основной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды (исп. 2)

| Исполнители | З _б , руб. | k_p | З _м , руб | З _{дн} , руб. | Т _р , раб. дн. | З _{осн} , руб. | З _{внеб} , руб |
|--------------|--------------------------|-------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Руководитель | 42744 | 1,3 | 55567 | 2790 | 20 | 55800 | 16740 |
| Инженер | 16242 | 1,3 | 21115 | 1060 | 85 | 90100 | 27030 |
| Итого | | | | | | 145900 | 43770 |

Таблица 18 – Расчёт основной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды (исп. 3)

| Исполнители | З _б , руб. | k_p | З _м , руб | З _{дн} , руб. | Т _р , раб. дн. | З _{осн} , руб. | З _{внеб} , руб |
|--------------|--------------------------|-------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Руководитель | 42744 | 1,3 | 55567 | 2790 | 21 | 58590 | 17577 |
| Инженер | 16242 | 1,3 | 21115 | 1060 | 82 | 86920 | 26076 |
| Итого | | | | | | 145510 | 43653 |

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: оплата услуг связи и электроэнергии. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = \text{сумма всех затрат} \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}} = 16\%$.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

В таблице 19 представлен бюджет затрат НИИ.

Таблица 19 – Бюджет затрат НИИ

| Наименование статьи | Сумма, руб | | |
|---|------------|--------|---------|
| | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
| Материальные затраты НИИ | 82 526 | 82 526 | 82 526 |
| Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 129 000 | 98 000 | 160 000 |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы | 141660 | 145900 | 145510 |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 42498 | 43770 | 43653 |
| Накладные расходы | 63309 | 59231 | 69070 |
| Бюджет затрат НИИ | 458983 | 429427 | 500759 |

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более)

вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{458983}{500759} = 0,92;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{429427}{500759} = 0,86;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{500759}{500759} = 1.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности. Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставим бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 20.

Таблица 20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Критерии | Весовой коэффициент параметра | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
|------------------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|
| Адгезия покрытия | 0,2 | 5 | 5 | 4 |
| Сечение захвата тепловых нейтронов | 0,2 | 4 | 5 | 3 |
| Защитные свойства покрытия | 0,3 | 4 | 3 | 5 |
| Барьерные свойства покрытия | 0,3 | 4 | 3 | 5 |
| Итого | 1 | 4,2 | 3,8 | 4,4 |

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{\text{р-исп } i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}}$$

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп 1}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}}} = \frac{4,2}{0,92} = 4,6$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{I_{\text{р-исп 2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{3,8}{0,86} = 4,4$$

$$I_{\text{исп.3}} = \frac{I_{\text{р-исп 3}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}}} = \frac{4,4}{1} = 4,4$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность

проекта (см. таблицу 21) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Таблица 21 – Сравнительная эффективность разработки

| № п/п | Показатели | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|-------|---|-------|-------|-------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель разработки | 0,92 | 0,86 | 1 |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,2 | 3,8 | 4,4 |
| 3 | Интегральный показатель эффективности | 4,6 | 4,4 | 4,4 |
| 4 | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1,05 | | 1,05 |

Исходя из данных таблицы 21, можно сделать вывод, что разработка в исполнении 1 (выбранный в научно-исследовательской работе) эффективнее на 5 %.

Глава 5. Социальная ответственность

Введение

В данной работе, объектом исследования является двухслойное покрытие Cr/Mo, нанесенное на циркониевый сплав Э110. Соответственно, перспективной областью применения данной разработки являются атомные электростанции, поскольку для получения энергии в них используются оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) из циркониевого сплава, на которые для повышения безопасности при высоких температурах могут наноситься защитные покрытия.

Результаты данной работы могут быть использованы такими корпорациями как «Росатом» и другими предприятиями, работающими в отраслях атомной энергетики.

Исследование проводилось в лабораторных условиях.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) [72] нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, таким образом, при шестидневной рабочей неделе продолжительность рабочего дня должна составлять не более 7 часов. При работе на условиях неполного рабочего времени оплата труда работника производится пропорционально отработанному им времени или в зависимости от выполненного им объема работ. В целях обеспечения прав и свобод человека и гражданина работодатель и его представители при обработке персональных данных

работника обязаны защищать персональные данные работника от неправомерного их использования, а утрата должна быть обеспечена работодателем за счет его средств в порядке, установленном настоящим Кодексом и иными федеральными законами.

5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны

Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Кроме этого, форму рабочей поверхности различного оборудования следует устанавливать с учетом характера выполняемой работы. Она может быть прямоугольной, иметь вырез для корпуса работающего или углубление для настольных машин и т. д., согласно ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. [73].

Места возможных контактов органов управления с руками и ногами работающего должны быть выполнены из нетоксичных, а в необходимых случаях и из нетеплопроводных и электроизоляционных материалов [74].

Панели пультов управления не должны иметь посторонних элементов, затрудняющих работу оператора (неоправданные функциональным назначением пульта выступы, углубления, разноплоскостность, выступающие элементы наружного крепежа и т.п.) [75]. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать возможность размещения на рабочей поверхности необходимого комплекта оборудования и документов с учетом характера выполняемой работы [76].

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения) [77] без разрешения начальника лаборатории и лица, ответственного за противопожарные мероприятия, запрещается установка лабораторных и

нагревательных приборов, пуск их в эксплуатацию. При работе в химической лаборатории необходимо надевать халат из хлопчатобумажной ткани. Для защиты глаз применяют очки различных типов. Во избежание ожогов, поражений от брызг и выбросов нельзя наклоняться над посудой, в которой кипит какая-либо жидкость. При работе с химическими реактивами в лаборатории должно находиться не менее двух сотрудников. Смешивание или разбавление химических веществ, сопровождающееся выделением тепла, следует проводить в термостойкой или фарфоровой посуде. Лабораторные запасы реактивов должны храниться в специально оборудованных, хорошо вентилируемых, сухих помещениях (складах) согласно разработанной в лаборатории схеме размещения реактивов.

5.2. Производственная безопасность

В процессе исследования общая работа может быть разделена на четыре основных этапа:

- 1) подготовка образцов циркониевого сплава к напылению покрытий (шлифовка);
- 2) осаждение покрытий на циркониевый сплав с помощью ионно-плазменной установки;
- 3) проведение экспериментов с помощью печи, весов, сканирующего электронного микроскопа и дифрактометра;
- 4) обработка полученных результатов на компьютере.

При разработке проектного решения возможно воздействие опасных и вредных факторов таких, которые представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте при выполнении НИР

| № | Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015) | Нормативные документы | | |
|---|---------------------------------------|-----------------------|-------------|-------|
| 1 | Производственные факторы, связанные с | ГОСТ | 12.1.038-82 | ССБТ. |

| | | |
|---|--|---|
| | электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов | Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты |
| 2 | Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека | ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности |
| 3 | Производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения | ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности |
| 4 | Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего | СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» |
| 5 | Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде | ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 |
| 6 | Производственные факторы, связанные с повышенным уровнем ионизирующих излучений | СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009 |
| 7 | Производственные факторы, связанные со световой средой | СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий |

5.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов

При напылении покрытий на циркониевый сплав, а также осуществление экспериментальных работ и их анализе возникает необходимость работы на электрооборудовании, таком как, ионно-плазменная установка, аналитические весы, сканирующий электронный микроскоп, а также компьютер, вследствие чего возникает вероятность прохождения электрического тока через тело человека. Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока проявляются в виде

электротравм (судороги, остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и др.) и заболеваний. Причиной поражения электрическим током в условиях лаборатории могут стать случайное прикосновение к токоведущим частям или появление напряжения на металлических частях оборудования.

Напряжение прикосновения и токи при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать 8 В и 1 мА, соответственно, согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. [78].

Для обеспечения защиты от прямого прикосновения необходимо применение таких технических способов и средств основной защиты, как: изоляция электропроводов, безопасное расположение токоведущих частей по ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [79].

5.2.2 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека

Для проведения высокотемпературных испытаний при 1100 °С образцов циркониевого сплава с покрытием Cr/Mo была использована атмосферная печь. При неправильном обращении данный объект, находящийся при высоких температурах, может вызвать ожоги тканей организма человека.

Конструкция производственного оборудования должна исключать возможность соприкосновения работающего с горячими частями или нахождение в непосредственной близости от таких частей, если это может повлечь за собой травмирование, перегрев работающего. Если назначение производственного оборудования и условия его эксплуатации не могут полностью исключить контакт работающего с горячими его частями, то

эксплуатационная документация должна содержать требование об использовании средств индивидуальной защиты, например огнеупорных перчаток [80].

5.2.3 Производственные факторы, связанные с силами и энергией механического движения

До нанесения покрытий на образцы циркониевого сплава их необходимо отшлифовать и отполировать с использованием специальных бумаг на шлифовально-полировальном станке. Поскольку данные бумаги крепятся к шлифовальному кругу с помощью ободка, то существует риск нанесения им удара при движении по телу работающего при неправильном креплении.

Конструкция производственного оборудования должна исключать выбрасывание предметов (например, инструмента, заготовок), представляющих опасность для работающих согласно ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. [80].

5.2.4 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

При работе атмосферной печи включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит нагрев камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении. При отклонении от норм микроклиматических показателей возможно временное (в течение рабочей смены) снижение работоспособности, без нарушения здоровья. Согласно СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к

обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [81] выполняемые работы относятся к Iб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ Iб представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ Iб

| Период года | Температура воздуха, °С | | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения потока воздуха, м/с | |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|---|
| | Диапазон ниже оптимальных величин | Диапазон выше допустимых величин | | для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более | для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более |
| Холодный | 19,9–20,9 | 23,1–24,0 | 15–75 | 0,1 | 0,2 |
| Теплый | 20,0–21,9 | 24,1–28,0 | 15–75 | 0,1 | 0,3 |

В данном случае, микроклимат в помещении поддерживается: в холодный период года системой центрального водяного отопления, в теплый период года системой кондиционирования воздуха.

В любое время года температура на рабочем месте составляет 20–24°С, влажность воздуха равна 50%, скорость воздуха находится в пределах 0,1–0,3 м/с.

5.2.5 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

При работе в лаборатории с электрооборудованием и работе вентиляционных систем помещения, возникают звуковые колебания в диапазоне слышимых частот, которые способны оказать вредное воздействие на безопасность и здоровья работника.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания [82]. Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные скорректированные по А уровни звука в лаборатории представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные скорректированные по А уровни звука в лаборатории [83]

| Назначение помещений или территорий | Время суток, ч | Для источников постоянного шума | | | | | | | | Для источников непостоянного шума | | |
|-------------------------------------|----------------|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|---|---|---|
| | | Уровни звукового давления дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | | Уровень звука скорректированный по А, L _A , дБ | Эквивалентный скорректированный по А уровень звука L _{Аэкв} , дБ | Максимальный скорректированный по А уровень звука L _{Амакс} , дБ |
| | | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

| | |
|---|-----|
| Помещения лаборатории для проведения Экспериментальных работ | - |
| | 103 |
| | 91 |
| | 83 |
| | 77 |
| | 73 |
| | 70 |
| | 68 |
| | 66 |
| | 64 |
| | 75 |
| | 75 |
| | 90 |

Уровень звука в лаборатории не превышает предельно допустимые уровни.

5.2.6 Производственные факторы, связанные с повышенным уровнем ионизирующих излучений

К источникам ионизирующего излучения (ИИИ) относятся любые вещества или объекты, в том числе устройства, которые испускают или при определенных условиях способны испускать ионизирующее излучение. ИИИ в данной работе является рентгеновский дифрактометр.

Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови и увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение сопротивляемости организма инфекционным заболеваниям и др.

Допустимые уровни доз, которые может получить человек при работе с источниками ионизирующего излучения, составляет 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год [84].

В основу всех мероприятий защитного характера положено главное требование о том, чтобы дозы облучения персонала не превышали допустимых величин. Защита человека от опасного воздействия

ионизирующего излучения осуществляется следующим способом: устройство дистанционного управления, предусмотренное самой установкой в данной работе.

5.2.7 Производственные факторы, связанные со световой средой

При длительной работе в условиях недостаточной освещенности или нарушении параметров световой среды, происходит негативное воздействие на организм человека, такое как: развитие близорукости, головная боль, ухудшение зрения и пр.

Освещенность на поверхности стола должна быть 300–500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [85].

Естественного освещения в лаборатории по условиям зрительной работы, как правило, недостаточно, поэтому на рабочих местах оказывается задействованным искусственное освещение. Оно может быть обеспечено с помощью люминесцентных ламп ЛВ (белого цвета) мощностью 20, 40, 80 Вт.

5.3 Экологическая безопасность

Селитебная зона. Аварии на объектах атомных электростанциях сопровождаются радиоактивным заражением территории. Радиоактивным загрязнением считается, присутствие радиоактивных веществ в количестве, превышающем уровни общего загрязнения 0,4 Бк/см для бета-излучающих радионуклидов (≈ 10 бета-част/см²·мин) и 0,04 Бк/см² для альфа-излучающих радионуклидов (≈ 1 альфа-част/см²·мин) [86]. Таким образом, норма на загрязнения должна быть меньше выше приведенных значений. В превентивном порядке проводятся следующие мероприятия радиационной защиты: разрабатываются и внедряются режимы радиационной

безопасности; создаются и эксплуатируются системы радиационного контроля за радиационной обстановкой на территориях атомных станций и в зонах наблюдения этих станций; разрабатываются планы действий на случай радиационных аварий.

Литосфера. Основное воздействие работы энергоблока на литосферу происходит от захоронения отработавшего ядерного топлива, т.е. твердых радиоактивных отходов.

При этом должны соблюдаться требования нормативных правовых актов, регулирующих отношения в области охраны земельных ресурсов и недр в соответствии с законами [87]. При эксплуатации атомных электростанций должна вестись работа по охране земель от загрязнения.

Гидросфера. Жидкие радиоактивные отходы образуются главным образом на атомных электростанциях, при обработке ядерного топлива. Также может оказывать негативное влияние на гидросферу сброс охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов. Должны соблюдаться требования нормативных актов, регулирующих отношения в области охраны водных ресурсов. Максимально допустимая концентрация свинца в сточной воде составляет $0,25 \text{ мг/дм}^3$ [88].

С целью недопущения превышения концентраций необходимо строгое соблюдение регламентов и повышение уровня очистки стоков, сбрасываемых в гидросферу.

Атмосфера. Источником загрязнения являются газообразные отходы (различного состава радиоактивные газы – от радиоактивных инертных газов до активированных паров воды – собранные в единый бак из различного теплообменного оборудования), прошедшие очистку и фильтрацию, рассеиваемые в атмосфере через вентиляционные трубы.

Должны соблюдаться требования нормативных актов, регулирующих отношения в области охраны атмосферного воздуха [89]. Предельно

допустимая концентрация свинца и его неорганических веществ в атмосферном воздухе составляет 0,001 мг/м³.

На атомных электростанциях разрабатываются и выполняются мероприятия: по организации производственного экологического контроля; по регулированию выбросов в атмосферный воздух при неблагоприятных метеорологических условиях; по проверке эффективности работы газоочистного оборудования.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ возможных ЧС

При эксплуатации проектного решения возможно возникновение следующего вида возможного ЧС: техногенная авария, а именно отказ систем безопасности; нарушение контроля и управления цепной ядерной реакции в активной зоне реактора; тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ. Основными причинами возникновения данного вида аварии являются: отказы технических систем из-за дефектов изготовления и нарушения режимов эксплуатации; ошибочные действия операторов технических систем; внешние негативные воздействия на объекты энергетики.

5.4.2 Наиболее вероятная ЧС

Наиболее вероятная ЧС при эксплуатации проектного решения – это тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ. Возможные причины данной аварии: внешние факторы (наводнение, землетрясение), как результат – авария с потерей теплоносителя (отказ системы охлаждения воды); ошибка персонала предприятия.

Нормативная документация, регулирующая деятельность по предотвращению и минимизации последствия ЧС с выбросами радиации на атомной электростанции (АЭС) представлена следующим документом [90].

Источником ионизирующего излучения выступает ядерное топливо, но при возникновении ЧС все материалы и агрегаты первого контура АЭС, получившие наведенную активность при эксплуатации, будут представлять радиационную опасность.

Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Радиационную оценку эффективности методов защиты от ионизирующего излучения можно провести приблизительно по расстоянию от энергоблока, на котором произошла ЧС, и по мощности этого энергоблока, используя таблицу 25.

Таблица 25 – Рекомендуемые размеры границ зон радиоактивного загрязнения

| Номер зоны, в порядке удаления ее внешней границы от АЭС | Предполагаемый максимальный радиус (км) | |
|--|---|--------------------------------|
| | Тепловая мощность ≥ 1000 МВт | Тепловая мощность < 1000 МВт |
| 1 | 3–5 | |
| 2 | 10–30 | |
| 3 | 100 | 50 |
| 4 | 300 | 100 |

Оценив, в какой зоне, находится убежище, следует сравнить проектные величины радиационного загрязнения для конкретного случая радиационной ЧС и значения допустимых эффективных доз, исходя из выбранного мероприятия по радиационной защите и дозовых коэффициентов для зоны номер 2 [91].

– Укрытие в жилых домах и прочих необорудованных для целей радиационной защиты зданиях. Эффективная доза от почвенной радиации при этом уменьшится на 0,4; от внешнего облучения проходящего мимо облака выброса – на 0,6 и от вдыхания воздуха – на 0,5.

– Укрытие в убежищах и противорадиационных укрытиях. Это приведет к уменьшению эффективной дозы от почвенной радиации на 0,02; от внешнего облучения проходящего мимо облака выброса – на 0,3 и от вдыхания воздуха – на 0,2.

Минимизация радиационных последствий для персонала при ликвидации последствий аварий

Работы по ликвидации последствий аварии, а именно работы по дезактивации оборудования, помещений, строительных конструкций и территории, проводимые в условиях высоких радиационных полей, рекомендуется осуществлять в последовательности и методами, при которых коллективная доза персонала будет минимальна. Рекомендуется до начала выполнения работ разработать мероприятия по минимизации дозовых нагрузок на персонал, осуществляющий ликвидацию последствий аварии, с учетом рекомендаций Руководства по безопасности [90].

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе.

Категория помещения по электробезопасности согласно правилам устройств электроустановок соответствует первому классу – «помещения без повышенной опасности» [92].

Согласно Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал должен обладать II группой допуска по

электробезопасности. Присвоение группы II по электробезопасности производится путем проведения инструктажа, который должен завершаться проверкой знаний в форме устного опроса и (при необходимости) проверкой приобретенных навыков безопасных способов работы или оказания первой помощи при поражении электрическим током [93].

Категория тяжести труда в лаборатории по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» относится к категории Ib (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением) [81].

Категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности – категория Г. Характеристика веществ и материалов, находящихся в помещении: материалы в горячем, раскаленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла [94].

Рассмотренный объект, оказывающий умеренное негативное воздействие на окружающую среду относится к объектам II категории [95].

Заключение

В результате комплексного анализа структурно-фазового состояния циркониевого сплава с Cr (8 мкм)/Mo (3 мкм) покрытием при высокотемпературном окислении и нагреве в вакууме были получены следующие выводы.

1. Применение молибденового барьерного подслоя (толщиной 3 мкм) позволяет подавлять взаимную диффузию хрома и циркония при высокотемпературном окислении на воздухе при 1100 °С в течение не менее 60 мин и в потоке водяного пара при 1200 °С в течение не менее 2000 с, а также при 1330 °С в течение не менее 720 с.

2. Высокотемпературное окисление при 1100–1330 °С приводит к формированию фаз Cr_3Mo и Mo_2Zr на границах раздела «защитное покрытие/барьерный подслей» и «барьерный подслей/циркониевый сплав», соответственно.

3. При окислении на воздухе толщины оксидных слоев однослойного Cr покрытия и покрытий Cr/Mo схожи, что указывает на незначительное влияние Mo подслоя на стойкость к окислению защитного Cr покрытия.

4. Существенная диффузия молибдена в циркониевый сплав при 1400 °С указывает на потерю барьерных свойств осажденного подслоя.

5. Впервые предложен механизм окисления циркониевого сплава с Cr/Mo покрытием при окислении в потоке водяного пара при 1400 °С.

Список литературы

1. Su H., Wu X., Wu L., Zhao S., Zhong Y., Ning Z., Liu N., Yang J. Effect of Nb content on microstructure, mechanical property, high-temperature corrosion and oxidation resistance of CrNb coatings for accident tolerant fuel cladding // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2023. – Vol. 110, No. 106010. – P. 1–17.
2. Terrani K. A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 501. – P. 13–30.
3. Qiu B., Wang J., Deng Y., Wang M., Wu Y., Qiu S. Z. A review on thermohydraulic and mechanical-physical properties of SiC, FeCrAl and Ti₃SiC₂ for ATF cladding // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 52, No. 1. – P. 1–13.
4. Ott L. J., Robb K. R., Wang D. Preliminary assessment of accident-tolerant fuels on LWR performance during normal operation and under DB and BDB accident conditions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – Vol. 448, No. 1–3. – P. 520–533.
5. Wagih M., Spencer B., Hales J., Shirvan K. Fuel performance of chromium-coated zirconium alloy and silicon carbide accident tolerant fuel claddings // *Annals of Nuclear Energy*. – 2018. – Vol. 120. – P. 304–318.
6. Terrani K. A., Zinkle S. J., Snead L. L. Advanced oxidation-resistant iron-based alloys for LWR fuel cladding // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – Vol. 448, No. 1–3. – P. 420–435.
7. Tang C., Große M., Ulrich S., Klimenkov M., Jäntschi U., Seifert H. J., Stüber M., Steinbrück M. High-temperature oxidation and hydrothermal corrosion of textured Cr₂AlC-based coatings on zirconium alloy fuel cladding // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 419, No. 127263. – P. 1–15.

8. Chen H., Wang X., Zhang R. Application and development progress of Cr-based surface coatings in nuclear fuel element: I. selection, preparation, and characteristics of coating materials // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, No. 9. – P. 1–25.
9. Wang X., Liao Y., Xu C., Guan H., Zhu M., Gao C., Jin X., Pang P., Du J., Liao B., Xue W. Steam oxidation behavior of ZrO₂/Cr-coated pure zirconium prepared by plasma electrolytic oxidation followed by filtered cathodic vacuum arc deposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 883, No. 160798. – P. 1–13.
10. Steinbrück M., Stegmaier U., Große M., Czerniak L., Lahoda E., Daum R., Yueh K. High-temperature oxidation and quenching of chromium-coated zirconium alloy ATF cladding tubes with and w/o pre-damage // *Journal of Nuclear Materials*. – 2022. – Vol. 559, No. 153470. – P. 1–15.
11. Kim H. G., Kim I. H., Jung Y. I., Park D. J., Park J. Y., Koo Y. H. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 531–539.
12. Rebak R. B. *Accident-Tolerant Materials for Light Water Reactor Fuels*. – Elsevier, 2020.
13. Kim D., Lee H.-G., Park J. Y., Kim W.-J. Fabrication and measurement of hoop strength of SiC triplex tube for nuclear fuel cladding applications // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 458. – P. 29–36.
14. Yamamoto Y., Pint B. A., Terrani K. A., Field K. G., Yang Y., Snead L. L. Development and property evaluation of nuclear grade wrought FeCrAl fuel cladding for light water reactors // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 467. – P. 703–716.
15. Cheng B., Chou P., Kim Y. J. Evaluations of Mo-alloy for light water reactor fuel cladding to enhance accident tolerance // *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*. – 2016. – Vol. 2, No. 5. – 1–6.

16. Cheng B., Kim Y. J., Chou P. Improving accident tolerance of nuclear fuel with coated Mo-alloy cladding // Nuclear Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 48, No. 1. – P. 16–25.
17. Bragg-Sitton S. Development of advanced accident-tolerant fuels for commercial LWRs // Nuclear News. – 2014. – Vol. 57, No. 3. – P. 83–91.
18. Hu X., Dong C., Wang Q., Chen B., Yang H., Wei T., Zhang R., Gu W., Chen D. High-temperature oxidation of thick Cr coating prepared by arc deposition for accident tolerant fuel claddings // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 519. – P. 145–156.
19. Idarraga-Trujillo I., Flem M. L. E., Brachet J. C., Saux M. L. E., Hamon D., Muller S., Vandenberghe V., Tupin M., Papin E., Monsifrot E., Billard A., Schuster S. Assessment at CEA of coated nuclear fuel cladding for LWRs with increased margins in LOCA and beyond LOCA conditions // LWR Fuel Performance Meeting, Top Fuel 2013. – Charlotte, USA: American Nuclear Society, 2013. – P. 860–867.
20. Yeom H., Maier B., Johnson G., Dabney T., Lenling M., Sridharan K. High temperature oxidation and microstructural evolution of cold spray chromium coatings on Zircaloy-4 in steam environments // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 526, No. 151737. – P. 1–11.
21. Yang J., Steinbrück M., Tang C., Große M., Liu J., Zhang J., Yun D., Wang S. Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 895, No. 162450 – P. 1–23.
22. Duan Z., Yang H., Satoh Y., Murakami K., Kano S., Zhao Z., Shen J., Abe H. Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Vol. 316. – P. 131–150.
23. Park D. J., Kim H. G., Jung Y., Park J. H., Yang J. H., Koo Y. H. Behavior of an improved Zr fuel cladding with oxidation resistant coating under

loss-of-coolant accident conditions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 482. – P. 75–82.

24. Brachet J. C., Idarraga-Trujillo I., Le Flem M., Le Saux M., Vandenberghe V., Urvoy S., Rouesne E., Guilbert T., Toffolon-Masclet C., Tupin M., Phalippou C., Lomello F., Schuster F., Billard A., Velisa G., Ducros C., Sanchette F. Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 517. – P. 268–285.

25. Yang J., Stegmaier U., Tang C., Steinbrück M., Große M., Wang S., Seifert H. J. High temperature Cr-Zr interaction of two types of Cr-coated Zr alloys in inert gas environment // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 547, No. 152806. – P. 1–10.

26. Tang C., Stueber M., Seifert H. J., Steinbrueck, M. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings // *Corrosion Reviews*. – 2017. – Vol. 35, No. 3. – P. 141–165.

27. Brachet J. C., Rouesne E., Ribis J., Guilbert T., Urvoy S., Nony G., Toffolon-Masclet C., Le Saux, M., Chaabane N., Palancher H. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: Kinetics and process // *Corrosion Science*. – 2020. – Vol. 167, No. 108537. – P. 1–15.

28. Kashkarov E., Afornu B., Sidelev D., Krinitcyn M., Gouws V., Lider A. Recent advances in protective coatings for accident tolerant Zr-based fuel claddings // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – P. 1–32.

29. Charit I., Murty K. L. Creep behavior of niobium-modified zirconium alloys // *Journal of Nuclear Materials*. – 2008. – Vol. 374, No. 3. – P. 354–363.

30. Allen T. R., Konings R. J. M., Motta, A. T. Corrosion of zirconium alloys // *Comprehensive nuclear materials*. – 2012. – Vol. 5. – P. 49–68.

31. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C., Ott L. J., Snead L. L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – Vol. 448, No. 1-3. – P. 374–379.

32. Ko J., Kim J. W., Min H.W., Kim Y., Yoon Y. S. Review of Manufacturing Technologies for Coated Accident Tolerant Fuel Cladding // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Vol. 561, No. 153562. – P. 1–24.
33. Hirano M., Yonomoto T., Ishigaki M., Watanabe N., Maruyama Y., Sibamoto Y., Sibamoto Y., Watanabe T., Moriyama K. Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident: Fukushima NPP accident related // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2012. – Vol. 49, No. 1. – P. 1–17.
34. Yueh K., Terrani K. A. Silicon carbide composite for light water reactor fuel assembly applications // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – Vol. 448, No. 1–3. – P. 380–388.
35. Dryepontd S., Unocic K. A., Hoelzer D. T., Massey C. P., Pint B. A. Development of low-Cr ODS FeCrAl alloys for accident-tolerant fuel cladding // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 501. – P. 59–71.
36. Azevedo C. Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors // Engineering Failure Analysis. – 2011. – Vol. 18, No. 8. – P. 1943–1962.
37. Tallman D. J., Anasori B., Barsoum M. W. A critical review of the oxidation of Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 and Cr_2AlC in air // Materials Research Letters. – 2013. – Vol. 1, No. 3. – P. 115–125.
38. Meng C., Yang L., Wu Y., Tan J., Dang W., He X., Ma X. Study of the oxidation behavior of CrN coating on Zr alloy in air // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 515. – P. 354–369.
39. Zhou Y., Xiang H., Hu C. Extension of MAX phases from ternary carbides and nitrides (X = C and N) to ternary borides (X = B, C, and N): A general guideline // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – P. 803–822.
40. Ougier M., Michau A., Lomello F., Schuster F., Maskrot H., Schlegel M. L. High-temperature oxidation behavior of HiPIMS as-deposited Cr–Al–C and annealed Cr_2AlC coatings on Zr-based alloy // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – Vol. 528. – P. 151855.

41. Alat E., Motta A. T., Comstock R. J., Partezana J. M., Wolfe D. E. Ceramic coating for corrosion (c3) resistance of nuclear fuel cladding // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 281. – P. 133-143.
42. Daub K., Van Nieuwenhove R., Nordin H. Investigation of the impact of coatings on corrosion and hydrogen uptake of Zircaloy-4 // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 467. – P. 260-270.
43. Krejčí J., Kabátová J., Manoch F., Kočí J., Cvrček L., Málek J., Krum S., Šutta P., Bublíková P., Halodová P., Namburi H. K., Ševeček M. Development and testing of multicomponent fuel cladding with enhanced accidental performance // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 52, No. 3. – P. 597–609.
44. Tunes M. A., Da Silva F. C., Camara O., Schön C. G., Sagás J. C., Fontana L. C., Donnelly S. E., Greaves G., Edmondson P. D. Energetic particle irradiation study of TiN coatings: are these films appropriate for accident tolerant fuels? // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 512. – P. 239–245.
45. Hui R., Cook W., Sun C., Xie Y., Yao P., Miles J., Olive R., Li J., Zheng W., Zhang L. Deposition, characterization and performance evaluation of ceramic coatings on metallic substrates for supercritical water-cooled reactors // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 205, No. 11. – P. 3512–3519.
46. Stueber M, Holleck H, Leiste H, Seemann K, Ulrich S, Ziebert C. Concepts for the design of advanced nanoscale PVD multilayer protective thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 483, No. 1–2. – P. 321–333
47. Jin D., Yang F., Zou Z., Gu L., Zhao X., Guo F., Xiao P. A study of the zirconium alloy protection by Cr_3C_2 -NiCr coating for nuclear reactor application // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 287. – P. 55–60.
48. Kuprin A. S., Belous V. A., Voyevodin V. N., Bryk V. V., Vasilenko R. L., Ovcharenko V. D., Reshetnyak E. N., Tolmachova G.N., V'yugov P. N. Vacuum-arc chromium-based coatings for protection of zirconium

alloys from the high-temperature oxidation in air // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 400–406.

49. Li H., Ma D., Wang H., Yun D., Hao Z., Deng J., Zhang R., Li, Z. Microstructure and oxidation behavior of CrCN/TiSiCN nano-multilayer coatings on Zircaloy in high-temperature steam // *Corrosion Science*. – 2023. – Vol. 211. – P. 110883.

50. Tang C., Stüber M., Seifert H. J., Steinbrück M. Metallic and Ceramic Coatings for Enhanced Accident Tolerant Fuel Cladding // *Comprehensive Nuclear Materials*, 2nd ed.; Konings, RJM, Stoller, RE, Eds. – 2019. – P. 490–514.

51. Wang Y., Zhou W., Wen Q., Ruan X., Luo F., Bai G., Qing Y., Zhu D., Huang Z., Zhang Y., Liu T., Li R. Behavior of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 344. – P. 141–148.

52. Mustafa S. S. Investigation of the safety features of advanced PWR assembly using SiC, Zr, FeCrAl and SS-310 as cladding materials // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 17403.

53. Yeom H., Lockhart C., Mariani R., Xu P., Corradini M., Sridharan K. Evaluation of steam corrosion and water quenching behavior of zirconium-silicide coated LWR fuel claddings // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 499. – P. 256–267.

54. Schuster F., Lomello F., Billard A., Velisa G., Monsifrot E., Bischoff J., Brachet J. C. et al. On-going studies at CEA on chromium coated zirconium based nuclear fuel claddings for enhanced accident tolerant LWRs fuel // *TopFuel 2015-Reactor Fuel Performance Meeting*. – 2015.

55. Brachet J. C., Guilbert T., Lesaux M., Rousselot J., Nony G., Toffolon-Maslet C., Schuster F., Palanchar H., Bischoff J., Augereau J., Pouillier E. Behavior of cr-coated m5 claddings during and after high temperature steam oxidation from 800c up to 1500c // *Topfuel 2018*. – Topfuel 2018, 2018.

56. Yang J., Shang L., Sun J., Bai S., Wang S., Liu J., Yun D., Ma D. Restraining the Cr-Zr interdiffusion of Cr-coated Zr alloys in high temperature environment: A Cr/CrN/Cr coating approach // *Corrosion Science*. – 2023. – Vol. 214. – P. 111015.
57. Sidelev D. V., Ruchkin S. E., Syrtanov M. S., Kashkarov E. B., Shelepov I. A., Malgin A. G., Polunin K. K., Mokrushin A. A. Protective Cr coatings with CrN/Cr multilayers for zirconium fuel claddings // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 433, No. 128131. – P. 1–11.
58. Sidelev D. V., Ruchkin S. E., Shelepov I. A., Saburov N. S., Malgin A. G., Polunin K. K., Stoykov K. V., Mokrushin A. A. Protective Cr Coatings with ZrO₂/Cr Multilayers for Zirconium Fuel Claddings // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – P. 1–17.
59. Wang X., Guan H., Liao Y., Zhu M., Xu C., Jin X., Liao B., Xue W., Zhang Y., Bai G., Wang R. Enhancement of high temperature steam oxidation resistance of Zr–1Nb alloy with ZrO₂/Cr bilayer coating // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 187, No. 109494. – P. 1–12.
60. Krejčí J., Ševeček M., Kabátová J., Manoch F., Kočí J., Cvrček L., Málek J., Krum S., Šutta P., Bublíková P. Experimental behavior of chromium-based coatings // *Proceedings of the TopFuel*. – Prague, Czech Republic: 30 September – 04 October, 2018. – P. 1–13.
61. Liu J., Hao Z., Cui Z., Ma D., Lu J., Cui Y., Li C., Liu W., Xie S., Huang P., Bai G., Yun D. Investigation of the oxidation mechanisms of superlattice Cr-CrN/TiSiN-Cr multilayer coatings on Zircaloy substrates under high-temperature steam atmospheres // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 192, No. 109782. – P. 1–14.
62. Musil J. Flexible hard nanocomposite coatings // *RSC Advances*. – 2015. – Vol. 5, No. 74. – P. 60482–60495.
63. Zhu C., Li P., Chen C., Tian J., Zeng S., Meng Y., Shen H., Han X., Zhang H. Microstructure evolution and oxidation behavior of bi-layer CrAl-Mo

coated Zircaloy-4 in steam at 1200 °C and 1300 °C // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 208, No. 110632. – P.1–11.

64. Younker I., Fratoni M. Neutronic evaluation of coating and cladding materials for accident tolerant fuels // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 88. – P. 10–18.

65. Michau A., Ougier M., Guilbert T., Bischoff J., Pouillier E., Maskrot H. Interlayers for Cr-coated nuclear fuel claddings // NuMat2020-The Nuclear Materials Conference. – 2020.

66. Sidelev D. V., Kashkarov E. B., Syrtanov M. S., Krivobokov V. P. Nickel-chromium (Ni–Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 369. – P. 69–78.

67. Sidelev D. V., Poltronieri C., Bestetti M., Krinitcyn M. G., Grudin V. A., Kashkarov E. B. A comparative study on high-temperature air oxidation of Cr-coated E110 zirconium alloy deposited by magnetron sputtering and electroplating // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 433, No. 128134. – P. 1–13.

68. Kashkarov E. B., Sidelev D. V., Rombaeva M., Syrtanov M. S., Bleykher G. A. Chromium coatings deposited by cooled and hot target magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // Surface and Coatings Technology. – 2020. Vol. 389, No. 125618. – P. 1–9.

69. Anders A. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518, No. 15. – P. 4087–4090.

70. Zinkevich M., Mattern N. Thermodynamic assessment of the Mo-Zr system // Journal of phase equilibria. – 2002. – Vol. 23, No. 2. – P. 156–162.

71. Kashkarov E. B., Sidelev D. V., Syrtanov M. S., Tang C., Steinbrück M. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating

thickness and microstructure // Corrosion Science. – 2020. – Vol. 175, No. 108883.
P. 1–9.

72. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

73. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

74. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

75. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.

76. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

77. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).

78. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

79. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

80. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

81. СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

82. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

83. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.

84. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009.

85. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

86. МУ 2.6.5.032-2017. Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

87. Федеральный закон от 11.07.2011 г. № 190-ФЗ.

88. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 N 644 (ред. от 30.11.2021) «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

89. Постановление Правительства РФ от 26.06.2018 N 731 "О нормативах допустимых выбросов радиоактивных веществ и нормативах допустимых сбросов радиоактивных веществ, а также о выдаче разрешений на выбросы радиоактивных веществ, разрешений на сбросы радиоактивных веществ.

90. РБ-094-14 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «минимизация радиационных последствий для населения и персонала при ликвидации последствий аварий на энергоблоках атомных электростанций разных типов. Методика оптимизации мер по защите населения и территорий».

91. ГОСТ Р 42.4.02-2015 Гражданская оборона. Режимы радиационной защиты на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению.

92. ПУЭ. Правила устройства электроустановок.

93. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 N 903н (ред. от 29.04.2022) «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок».

94. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

95. Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 N 2398 (ред. от 07.10.2021) «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».

Приложение А

Таблица 1 – Временные показатели проведения научного исследования

| Названия работы | Трудоемкость работ | | | | | | | | | Исполнители | | | Длительность работ в рабочих днях T_{pi} | | | Длительность работ в календарных днях T_{ki} | | |
|--|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|-------------|--------|--------|--|--------|--------|--|--------|--------|
| | t_{min} , чел-дни | | | t_{max} , чел-дни | | | $t_{ож}$, чел-дни | | | | | | | | | | | |
| | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
| Составление и утверждение технического задания | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | Р | Р | Р | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 2 | 2 | 2 |
| Выбор направления исследований и способа решения задач | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | Р | Р | Р | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 4 | 4 | 4 |
| Подбор и изучение материалов по теме | 30 | 30 | 30 | 45 | 45 | 45 | 36 | 36 | 36 | И | И | И | 36 | 36 | 36 | 53 | 53 | 53 |
| Составление плана экспериментов | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | Р, И | Р, И | Р, И | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 1 | 1 | 1 |
| Подготовка образцов для экспериментов | 3 | 3 | 3 | 7 | 7 | 7 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | И | И | И | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 7 | 7 | 7 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------------|------------|
| Проведение экспериментальных работ | 25 | 24 | 26 | 35 | 34 | 36 | 29 | 28 | 30 | Р, И | Р, И | Р, И | 14,5 | 14 | 15 | 21 | 20 | 22 |
| Выполнение расчетов | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | И | И | И | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 3 | 3 | 3 |
| Анализ и обработка полученных результатов | 15 | 17 | 15 | 17 | 19 | 17 | 15,8 | 17,8 | 15,8 | И | И | И | 15,8 | 17,8 | 15,8 | 23 | 26 | 23 |
| Обсуждение и оценка Эффективности результатов | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | Р, И | Р, И | Р, И | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 2 | 2 | 2 |
| Составление пояснительной записки | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3,4 | 4,4 | 3,4 | И | И | И | 3,4 | 4,4 | 3,4 | 5 | 7 | 5 |
| Подготовка к защите | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3,4 | 4,4 | 3,4 | И | И | И | 3,4 | 4,4 | 3,4 | 5 | 7 | 5 |
| Итого: | | | | | | | | | | | | | | | | 126 | 132 | 127 |