

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to be the name of the author, Dmitriy Mikhailovich Khorokhorin.

Хорохорин Дмитрий Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛОВ И СВАРНЫХ ШВОВ ОТ
ЧАСТИЦ МОКС-ТОПЛИВА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: **Хан Валерий Алексеевич**
доктор технических наук

профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»;
ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,

Официальные оппоненты: **Кабанов Андрей Михайлович**
доктор физико-математических наук

главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,

Юдин Николай Александрович
доктор технических наук, старший научный сотрудник

профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,

Защита диссертации состоится «25» апреля 2023 г. в «15:00» на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.01 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина 43, ауд. 122.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского 53а и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «__» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.01
кандидат физико-математических наук



Е.Б. Кашкаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной мировой атомной промышленности стоит задача вывода из эксплуатации объектов атомной энергетики, введенных с 1960-х годов и выработавших свой ресурс в настоящее время. При этом требуется утилизация радиоактивных отходов (РАО), образующихся в результате использования объектов ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). РАО образуется во многих технологических процессах. Например, в результате переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) образуются высокоактивные композиции, содержащие, в том числе, уран, плутоний, минорные актиноиды. Также, при производстве традиционного топлива для атомных электростанций (АЭС) на основе диоксида урана накапливается обедненный гексафторид урана.

Для снижения количества РАО и увеличения эффективности ЯТЦ, реализуются технологии по вовлечению в ядерное топливо большего количества изотопов. Например, использование быстрых нейтронов в ядерном реакторе позволяет воспроизводить ядерное горючее, вовлекать долгоживущие актиноиды при получении тепловой и электрической энергии.

Вовлечение в ЯТЦ большего числа изотопов, основную долю которых составляют высокоактивные актиноиды, требует дополнительных мероприятий по радиационному контролю и применению новых технологических решений с высокой степенью автоматизации. Промышленное производство в России уран-плутониевого мокс-топлива началось с 2015 года. Использование высокоактивного плутония в топливе, может вызывать сильное поверхностное α -загрязнение технологического оборудования, тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и тепловыделяющих сборок при попадании частиц необлученного топлива на их поверхность. Находящиеся на поверхностях изделий, технологического оборудования или в воздухе микрочастицы уран-плутониевого топлива повышают дозовую нагрузку на персонал. Контроль поверхностного загрязнения α -активных радионуклидов осложняется малым пробегом α -частицы в воздушной атмосфере. Поэтому невозможно проводить непрерывный дистанционный контроль поверхностного загрязнения.

Производство мокс-топлива сопровождается попаданием микрочастиц оксидов урана и плутония на поверхность трубки ТВЭЛ. В зоне загрузки трубки ТВЭЛ топливными таблетками α -загрязнение максимально и осложняется фиксацией частиц топлива в сварочном шве при сварке заглушки и трубки. Существующий метод сухой дезактивации – тканевая протирка, не удаляет фиксированные оксидные частицы с поверхности и из сварного шва ТВЭЛ. Поэтому актуальны исследования новых методов дезактивации ТВЭЛ от микрочастиц оксидного уран-плутониевого топлива.

Степень разработанности темы

Лазерные технологии внедряются в атомную промышленность. Начиная с 1985 года, мощное лазерное излучение используется при фрагментировании и переработке ОЯТ. Известны методы удаления радиоактивных микрочастиц с твердых поверхностей воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения. Применение лазерного излучения для очистки поверхностей от радиоактивного

загрязнения активно исследуется с 1995 года в США, Канаде, Японии, Франции, России. Существенный вклад в изучении вопросов лазерной дезактивации внесли российские и зарубежные ученые, такие как В.П. Вейко, М. Afzal, P. Delaporte, F. Champonnois, M. Sentis, T. Hirabayashi, Y. Kameo, A.J. Potiens и другие. Начиная с 2009 года, исследователи из Индии А. Kumar, J.P. Nilaya, D.J. Biswas, R.V. Bhatt публикуют результаты лазерной дезактивации стали, а в 2017 году предложили использовать лазерное излучение для дезактивации поверхности твэлов. В этой работе приводятся результаты исследований по удалению радиоактивных микрочастиц с трубки твэла излучением неодимового лазера, которые удерживаются на поверхности только за счет сил адгезии. Учитывая особенность конструкции твэлов зарубежного исполнения, остаются неисследованными вопросы лазерной дезактивации наиболее загрязненных областей поверхности твэла (сварочных швов) от фиксированного загрязнения.

Процессы взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом при лазерной очистке поверхности и способы оптимизации процесса лазерной дезактивации рассматриваются с 2000-х годов такими учеными как Б.С. Лукьянчук, Л.Я. Минько, J.V. Heroux, E. Sacher, M. Meunier, Jong Myung Lee и другими. Тем не менее, остается неизученной область непрерывного контроля качества лазерной дезактивации поверхности. Также, с внедрением новых топливных композиций и технологий в ЯТЦ, требуется изучение вопросов применения лазерного излучения к новым материалам для оптимизации процесса поверхностной дезактивации.

Объект исследования – поверхность и сварной шов твэла с мокс-топливом реактора БН-800.

Предмет исследования – физико-химические процессы, протекающие при лазерной дезактивации поверхности и сварного шва твэла от оксидных частиц актиноидов и лантаноидов.

Целью работы является разработка метода лазерной очистки от радиоактивного загрязнения поверхности твэлов с мокс-топливом.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Изучить физико-химические процессы, протекающие при воздействии лазерного излучения на поверхность стальной пластины ЧС-68, в которой содержатся микрочастицы UO_2 , PuO_2 и SeO_2 .

2. Разработать бесконтактный метод контроля полноты очистки от радиоактивного загрязнения поверхности твэлов с мокс-топливом.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем.

1. Впервые определен диапазон интенсивностей импульсов миллисекундной длительности неодимового лазера, позволяющий очистить сталь ЧС-68 от частично утопленных в поверхность металла микрочастиц SeO_2 и недостаточный для увеличения шероховатости поверхности с глубиной впадины профиля не более 20 мкм, регламентируемой ТУ на поверхность твэла.

2. Впервые показано, что при облучении импульсами CO_2 -лазера длительностью 50 нс и интенсивностью 25 МВт/см² микрочастицы UO_2 и PuO_2 диаметром 0,5 мкм нагреваются до точки кипения, а ThO_2 и стали - нет.

3. Показана возможность использования среды с максимальным пробегом α -частиц в автоматизированной камере контроля общего α -загрязнения поверхности твэла для уменьшения порога измерения.

4. Показано, что при лазерной абляции поверхности стали ЧС-68, находящейся под слоем воды или в газовой среде, миллисекундными импульсами неодимового лазера, амплитуда интенсивности импульсов рассеянного излучения пропорциональна количеству микрочастиц CeO_2 , частично утопленных в поверхностный слой металла.

5. Установлено, что при лазерной абляции поверхности стали ЧС-68 частота электромагнитной волны, излучаемой плазмой лазерного пробоя, пропорциональна количеству полупроводниковых микрочастиц CeO_2 , частично утопленных в поверхностный слой металла.

6. Впервые показано, что постоянное магнитное поле с индуктивностью 30-180 мТл влияет на распределение по размерам дисперсных частиц, образующихся при охлаждении парогазовой смеси, содержащей оксидные частицы, как за счет увеличения скорости формированию ядер конденсации, так и интенсификации роста микрочастиц.

Теоретическая значимость результатов исследований состоит в следующем.

1. Проанализированы и обобщены известные результаты по лазерной абляции металлической мишени, которые использованы при анализе данных, получаемых при лазерной очистке поверхности твэлов от частично утопленных в металл радиоактивных микрочастиц UO_2 и PuO_2 .

2. Систематизированы данные по лазерному пробоя для мишени, находящейся под слоем воды. Выводы по результатам анализа подтверждены экспериментально при лазерной абляции миллисекундными импульсами неодимового лазера поверхности стали ЧС-68, находящейся под слоем воды.

3. Проанализированы и обобщены известные данные по влиянию слабого постоянного магнитного поля на фазовый переход при охлаждении низкотемпературной плазмы. Полученные закономерности успешно использованы для анализа процесса конденсации паров UO_2 и PuO_2 .

Практическая значимость результатов исследования состоит в следующем.

1. Результаты экспериментальных исследований по лазерной абляции стали ЧС-68 от частично утопленных в металл полупроводниковых микрочастиц CeO_2 могут быть использованы при разработке технологии лазерной дезактивации сварного шва твэлов с мокс-топливом.

2. Результаты моделирования нагрева микрочастиц UO_2 и PuO_2 , ThO_2 и стали диаметром 0,5 мкм при облучении импульсами CO_2 -лазера длительностью 50 нс и интенсивностью 25 МВт/см² могут быть использованы при разработке технологии лазерной дезактивации сварного шва твэлов с мокс-топливом.

3. Испытана камера объемом 5,9 л измерительного блока для автоматизированного контроля α -загрязнения поверхности твэлов различного исполнения, которая при минимальном расходе гелия 33 л/ч позволяет до 2,8 раз уменьшить порог измерения.

4. Бесконтактные методы контроля полноты лазерной очистки от

микрочастиц CeO_2 , расположенных в приповерхностном слое сплава ЧС-68, могут быть использованы при разработке технологии лазерной дезактивации сварного шва твэлов с мокс-топливом, а также в лазерных технологиях обработки металла.

5. Разработанная модель роста дисперсных частиц в слабом постоянном магнитном поле вносит вклад в теорию нуклеации. Результаты исследования парамагнитного воздействия постоянного магнитного поля 30-180 мТл на пары парамагнитных веществ при их охлаждении, могут быть использованы при разработке технологии дезактивации сварного шва твэлов с мокс-топливом лазерными импульсами миллисекундной длительности.

Методология и методы диссертационного исследования

Методология работы на предварительном этапе включает моделирование физико-химических процессов, возникающих при дезактивации поверхности твэлов, с последующим наблюдением результатов на оригинальных экспериментальных установках.

Контроль α -загрязнения поверхностей осуществляли прямым измерением активности и методом гамма-спектрометрии. Газовые потоки в измерительной камере изучали с использованием математического моделирования, а для определения состава газа использовали масс-спектрометрический метод. Теплофизические процессы, протекающие при воздействии лазерного излучения на металл и полупроводниковые оксидные частицы, исследовали с помощью физико-математического моделирования. Результат воздействия лазерного излучения на металл и полупроводниковые оксидные частицы, а также изменение размеров частиц, полученных в результате абляции, исследовали с применением сканирующей электронной и оптической микроскопии. Анализ элементного состава продуктов абляции определялся с помощью энергодисперсионного анализатора сканирующего электронного микроскопа. Рассеяние лазерного излучения исследовали при помощи оптической спектрометрии.

На защиту выносятся следующие **научные положения**.

1. Импульсное излучение Nd-лазера миллисекундной длительности в диапазоне интенсивностей 17-27 кВт/см^2 позволяет полностью удалять микрочастицы CeO_2 , находящиеся в поверхностном слое стали ЧС-68 толщиной до 20 мкм, путем преимущественного их испарения при лазерном нагреве.

2. Импульсное излучение CO_2 -лазера длительностью более 50 нс и интенсивностью более 25 МВт/см^2 позволяет очищать с коэффициентом дезактивации до 5,33 поверхностный слой стали ЧС-68 толщиной менее 20 мкм от микрочастиц UO_2 и PuO_2 диаметром не более 0,5 мкм, путем их селективного испарения.

3. Длительность рассеянных лазерных импульсов, регистрируемых при лазерной абляции микрочастиц CeO_2 , находящихся в поверхностном слое металла, пропорциональна количеству микрочастиц подвергающихся ионизации, при облучении как в газовой, так и в жидкой фазах.

4. Постоянное магнитное поле с индукцией 30-180 мТл увеличивает скорость нуклеации паров путем интенсификации триплет-синглетного перехода, при лазерной абляции мишени миллисекундными импульсами, что увеличивает до 1,5 раз энергию лазерного импульса, попадающего на мишень.

5. Пороговое значение для автоматизированного контроля α -загрязнения поверхности твэла при лазерной дезактивации в камере проходного типа объемом 5,9 л уменьшается в 2,8 раз при замене воздушной атмосферы на гелиевую, за счет увеличения длины пробега α -частиц до 12 см.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечена использованием современной измерительной аппаратуры и специализированного программного обеспечения, общепризнанных методик измерений, а также воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, проводимых при идентичных условиях. Аналитически и экспериментально подтверждено соответствие полученных результатов с работами идентичного характера других авторов на ряде выбранных объектов в области использования лазерного излучения для обработки поверхности, при различных условиях, и взаимодействия лазерного излучения с веществом. Измерительное оборудование, используемое в исследованиях, было калибровано. Исследования лазерных кратеров и продуктов абляции проведены с помощью электронного микроскопа в Томском региональном центре коллективного пользования и профилометра в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, обученными специалистами по утвержденным методикам.

Специальность диссертации

Выбор специальности диссертации 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики в отрасли физико-математических наук, обусловлен тем, что в ней: приводятся результаты математического моделирования процесса нагрева дисперсных частиц в поле лазерного излучения на основе полученных зависимостей (1) и (2); предложено математическое описание (см. формулы (3) и (4)) процесса изменения скорости нуклеации паров, при лазерной абляции мишени миллисекундными импульсами, за счет интенсификации триплет-синглетного перехода в постоянном магнитном поле; апробированы новые методы непрерывного контроля полноты лазерной дезактивации трубок твэлов; созданы оригинальные экспериментальные установки для разработки метода лазерной дезактивации твэлов, соответствующие паспорту выбранной специальности.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке методик и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций их практического использования, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались в г. Москва, Томск, Снежинск, Северск на следующих научных сессиях и конференциях:

- IV Международная научная конференция «Изотопы: технологии, материалы и применение», г. Томск, 30 октября – 3 ноября 2017 года;
- IX Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, г. Томск, 17 октября – 19 октября 2018 года;
- V Международная научная конференция «Изотопы: технологии, материалы и применение», г. Томск, 29 октября – 2 ноября 2018 года;

- Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Физико-химические и изотопные технологии в науке, промышленности и медицине», г. Томск, 30 сентября – 04 октября 2019 года;
- 14-й Международный форум по стратегическим технологиям (IFOST-2019), г. Томск, 14 – 17 октября 2019 года;
- X Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине», г. Томск, 9 – 11 сентября 2020 года;
- VI Международная научная конференция «Изотопы: технологии, материалы и применение», г. Томск, 26 – 29 октября 2020 года;
- XXVII конференция Аэрозоли Сибири, г. Томск 23-24 ноября 2020 года;
- Научная сессия НИЯУ МИФИ «Инновационные ядерные технологии», г. Снежинск, 22 – 23 декабря 2020 года;
- Научная сессия НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий», г. Северск, 12 – 16 апреля 2021 года;
- Молодежная научно-практическая конференция «Материалы и технологии в атомной энергетике», г. Москва, АО «ВНИИНМ», 22-23 июня 2022 года.

Публикации.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 33 печатные работы, включая 6 статей: 5 в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК РФ (из которых 4 статьи имеют англоязычный вариант в журналах, индексируемых в базе данных Scopus) и 1 в журнале, индексируемом в базе данных Scopus. Получены 2 патента РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 4 таблицы, 54 формулы, 172 источника цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость исследования, обозначены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор теоретических и экспериментальных работ по производству ядерного топлива для АЭС, контроля радиоактивного загрязнения на предприятиях ЯТЦ, методов дезактивации радиоактивного загрязнения. Проанализированы существующие и разрабатываемые методы очистки твэлов от поверхностного α -загрязнения. Подробно рассмотрено использование лазерного излучения для очистки поверхностей, в том числе на предприятиях ЯТЦ, для вывода из эксплуатации объектов атомной энергетики. Рассмотрены последние исследования в области физико-химических процессов, протекающих при лазерной абляции, распространения лазерного излучения через атмосферный аэрозоль и парогазовое облако при лазерном пробое.

Во второй главе приведены результаты разработки метода автоматизированного контроля общего поверхностного загрязнения твэлов при лазерной дезактивации в условиях ужесточения требований для существующих и

новых проектов уран-плутониевого топлива. Рассмотрен метод автоматизированного контроля снимаемого α -загрязнения поверхности твэлов. Проведена оценка эффективности дезактивации твэла тканевой протиркой.

Технология производства твэлов с уран-плутониевым топливом, заключается в загрузке трубки топливным столбом, при этом микрочастицы топлива неизбежно попадают на торец трубки. Поэтому загрязнение твэла, представляет из себя частицы топлива, находящиеся не только на поверхности трубки, но и включенные на различную глубину по объему всего сварочного шва заглушки твэла. В области механического взаимодействия топливных таблеток с торцом твэла наблюдается наибольшее загрязнение и имеет пиковый характер. На остальной поверхности трубки твэла наблюдается монотонное распределение активности. Поэтому проводится дезактивация внешней поверхности твэла, с последующим контролем снимаемого (нефиксированного) и общего α -загрязнения поверхности твэлов.

В обеспечении перспективных требований к поверхностному загрязнению уран-плутониевого топлива, требуется разработка новых методов контроля общего α -загрязнения. Используемые в технологическом процессе по производству мокс-топлива радионуклиды излучают α -частицы, пробег которых в воздухе не превышает 2,5 см. Поэтому создание стационарной автоматизированной установки контроля поверхностного загрязнения твэла с требуемой точностью измерения и производительностью, затруднено. Для обоснования возможности создания такой установки, а также изучения процессов образования поверхностного загрязнения и распространения α -частиц, собрана установка, в которой источник и детектор α -частиц, находится в едином герметичном боксе. Это позволяет контролировать состав газовой смеси, в которой распространяются α -частицы. В качестве источника α -частиц выбран ^{239}Pu активностью $A=3,4$ кБк, так как при производстве мокс-топлива этот изотоп вносит основной вклад в поверхностное α -загрязнение.

Экспериментально определены величина потока α -частиц на разных расстояниях от детектора и максимальное расстояние, которое проходит α -частица в воздушной среде и смеси гелия с воздухом. Экспериментальные результаты приведены на рис. 1. Максимальное расстояние на котором удается регистрировать α -частицы в воздушной среде составляет 2,5 см. В атмосфере гелия пробег α -частиц достигает 12 см, при этом пороговое значение для измерения поверхностного загрязнения, уменьшается до 2,8 раз. Полученная величина пробега α -частиц позволяет формировать измерительный блок для автоматизированного контроля α -загрязнения поверхности.

При апробации разрабатываемого метода, в качестве объектов измерения использовали имитаторы твэлов. Для одновременного контроля загрязнения твэла по всему диаметру трубки, в боксе измерительного стенда (камере) расположено две пары детекторов. Результаты исследований показали, оптимальное использование камеры проходного типа (рис. 2) с технологическим окном для беспрепятственного перемещения твэла во время измерения. Во время перемещения твэла, в камере изменяется концентрация гелия, вызванная его утечкой и разбавлением воздуха. Поэтому необходима непрерывная подача гелия в бокс для создания заданной концентрации газовой смеси.

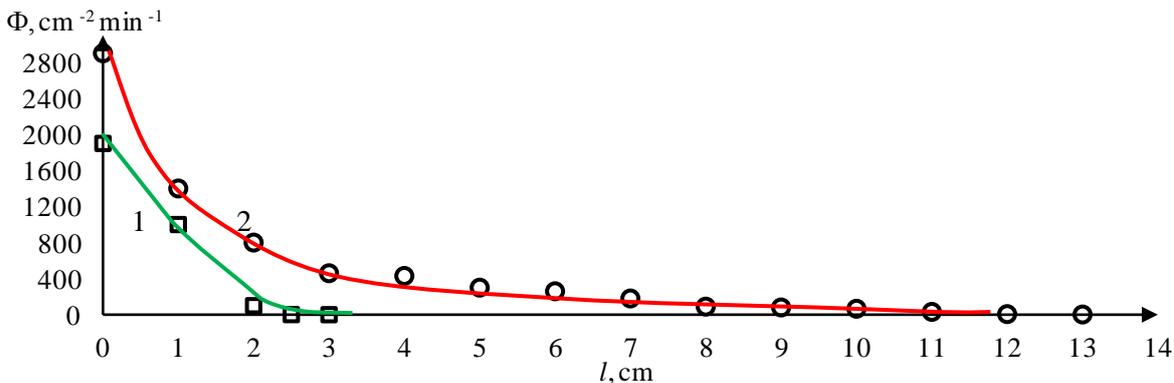


Рисунок 1 – Плотность потока α -частиц на различных расстояниях от источника.
1 – воздух, 2 – гелий

Объем газа в камере и скорость подачи в него гелия являются основными параметрами, обеспечивающими, при заданной производительности оборудования, необходимое содержание гелия в газовой смеси в счетном объеме. Для оценки величин указанных параметров проводили расчет газовых потоков в смеси гелий-воздух при контроле имитатора твэла.

Моделирование, с помощью программы Comsol, газовых потоков внутри камеры показало, что концентрация гелия в камере падает при движении объектов во время контроля, из-за формирования вихрей и турбулентного потока. Разбавлению гелия в камере способствуют два процесса: вытеснение части гелия объектом с последующей заменой этого объема воздухом, замена гелия на воздух в результате выхода объекта из камеры.

Для экспериментальных исследований использовали камеру объемом 5,9 л с размерами 14×14×30 см (рис.2), ротаметр РМ-06, масс-спектрометр МС-200. В камере выполнены отверстия диаметром 2 см для беспрепятственного перемещения твэла по роликам транспортной линии. Над отверстиями камеры установлены шиберные затворы, срабатывающие по сигналу оптических датчиков при входе и выходе твэла из камеры. Гелий подавали из баллона через ротаметр. Масс-спектрометр МС-200 предназначен для анализа с постоянной откачкой при расходе пробы 110 мл/мин через капилляр.

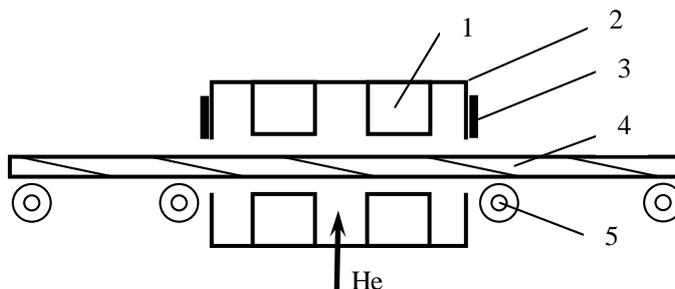


Рисунок 2 – Схема измерительной камеры проходного типа.
1 – детектор, 2 – корпус камеры, 3 – шиберный затвор,
4 – имитатор твэла, 5 – ролик транспортной системы

Анализ составляющих газовой смеси в камере проходного типа для непрерывного контроля твэлов на транспортной линии показал достижение

максимальной и стационарной концентрации гелия при расходе не менее 33 л/ч. В отсутствие твэлов на транспортной линии, шиберные затворы находятся в закрытом состоянии, при этом расход гелия не ведется. Поэтому для контроля загрязнения поверхности твэлов при лазерной дезактивации на автоматической линии изготовления, оптимально использование камеры проходного типа объемом 5,9 л, в которой поддерживается среда с максимальным пробегом α -частиц, при расходе гелия не менее 33 л/ч.

Для измерения уровня снимаемого (нефиксированного) поверхностного загрязнения применяется автоматизированная установка снятия и измерения сухого мазка твэла. Принцип работы поста заключается в подаче твэла на позицию контакта его поверхности с материалом из тканевой ленты. Получение качественного мазка с поверхности твэла для определения снимаемой α -загрязненности, обеспечивает снижение погрешности измерения.

В эксперименте применялись имитаторы оболочки твэлов с нанесенной на них α -активностью, размеры и тип имитаторов соответствуют реальным твэлам. В качестве чистящей ленты использовались рулоны из ткани саржевого и полотняного плетения. Активность имитаторов составляла 20 α -частиц / (см²·мин). Для каждого имитатора твэла проведено по 10 параллельных определений плотности потока.

Анализ результатов показал лучшие свойства удаления радиоактивных частиц у ленты из ткани саржевого плетения. При этом такой метод удаления радиоактивных частиц с поверхности имеет низкий коэффициент дезактивации (до 1,7), и не позволяет полностью удалить даже нефиксированное загрязнение. Полученные результаты подтверждают необходимость разработки новых методов дезактивации поверхности твэла.

В третьей главе рассмотрены физико-химические процессы протекающие при лазерной дезактивации поверхности трубки твэла из стали ЧС-68, проведены исследования для разработки метода лазерной дезактивации поверхности и сварного шва твэла от частиц оксидов лантаноидов и актиноидов.

Одним из факторов, влияющих на эффективность лазерных технологий, является комплексный показатель преломления материалов, поэтому металлы и оксиды металлов будут нагреваться с разной скоростью. При этом возможно селективное испарение внедренных микрочастиц в оксидной форме, находящихся в поверхностных слоях металлической матрицы. Селективному испарению включений частиц оксидов способствует их меньшая теплопроводность и высокий коэффициент поглощения лазерного излучения на рабочей длине волны.

Из-за того что материал оболочки твэла обладает большей теплопроводностью, по сравнению с UO_2 и PuO_2 , возможно подобрать режимы лазерного излучения, для испарения частиц UO_2 и PuO_2 . Энергия, поглощенная в оболочке твэла, будет рассеиваться в глубь металла за счет его высокой теплопроводности, не повреждая поверхность трубки.

Для моделирования теплофизических параметров смеси UO_2 и PuO_2 использовали имитаторы. Возможно использование CeO_2 и UO_2 природного

изотопного состава. Эти оксиды имеют схожую зависимость теплопроводности от температуры, а также температуры кипения и плавления.

Для проведения экспериментальных исследований лазерной дезактивации собрана установка (рис. 3), содержащая квантовый генератор с активным элементом из YAG:Nd, накачиваемый блоком питания БПЛ-66/33, фокусирующую линзу, позиционирующее устройство с закрепленным фрагментом трубки твэла. Использовали лазерный луч с длиной волны 1,06 мкм в режиме свободной генерации, имеющий длительность 1-1,5 мс.

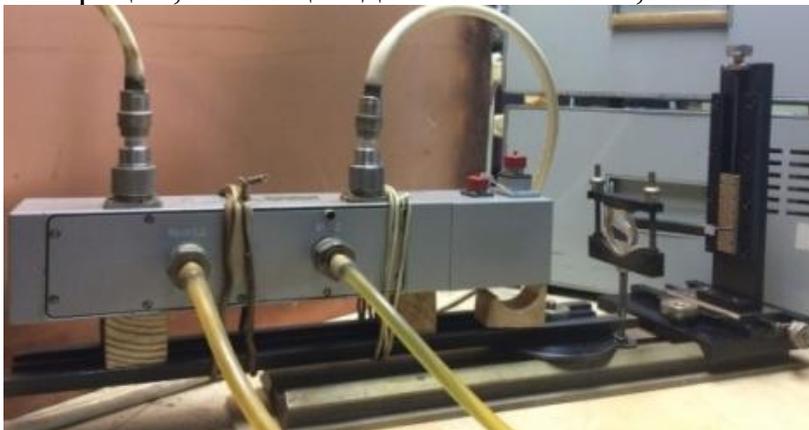


Рисунок 3 – Фотография экспериментальной установки

В работе использовали UO_2 природного изотопного состава, который наносили на поверхность трубки твэла механическим натиранием. Активность образцов определяли гамма-спектрометром. Для известного изотопного состава образца использовали гамма-спектрометр со сцинтиллятором из NaI. Измеряли активность образцов до и после нанесения радиоактивного загрязнения.

Образцы с радиоактивным загрязнением поверхности в виде микрочастиц UO_2 , облучались лазерными импульсами так, чтобы соседние фокальные пятна размером 0,2 мм перекрывались. На рис. 4 приведены гамма-спектры четырех испытываемых образцов до нанесения и с нанесенным поверхностным радиоактивным загрязнением, а также после лазерной обработки лучом с интенсивностью: 38,5 кВт/см², 27,8 кВт/см², 26,3 кВт/см², 17,8 кВт/см². Приведена лишь характерная для изотопа ^{235}U линия с энергией 185,7 эВ соответствующая каналу №34, имеющая наибольшую интенсивность. Облучаемые образцы имели разную активность из-за случайного характера загрязнения частицами UO_2 .

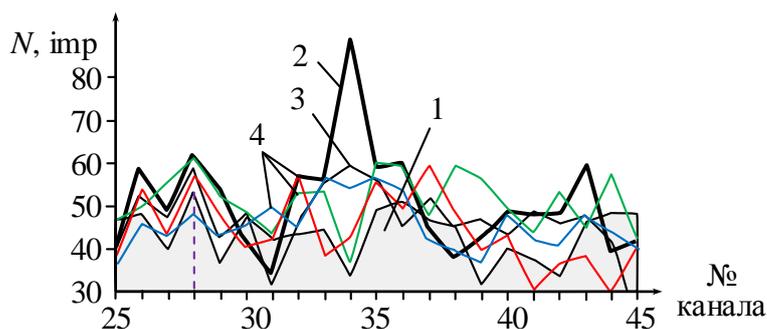


Рисунок 4 – Спектры образцов. 1 - фон, 2 - загрязнение, 3, 4 - после дезактивации

Показано, что после воздействия лазерным излучением уменьшилась интенсивность характерного для изотопа ^{235}U пика, а активности облучаемых образцов приблизилась к фоновому значению. При интенсивности лазерного излучения более $17,8 \text{ кВт/см}^2$ происходит удаление радиоактивных микрочастиц UO_2 , удерживаемых на поверхности стали ЧС-68 силами Ван-дер-Ваальса.

Лазерная дезактивация объемных загрязнений связана с испарением материала, что приводит к изменению рельефа поверхности и формированию эрозионного кратера. В соответствии с требованиями ТУ на наружных поверхностях твэла не должно быть повреждений глубиной более 20 мкм. На рис. 5 приведены профили кратеров, полученные на интерференционном профилометре. При интенсивности лазерного излучения $38,5 \text{ кВт/см}^2$ формируются недопустимые дефекты глубиной до 54 мкм. При интенсивности менее $27,8 \text{ кВт/см}^2$ глубина кратера не выходит за пределы требований ТУ. Наибольшая глубина испарения наблюдается на периферийной области по кругу.

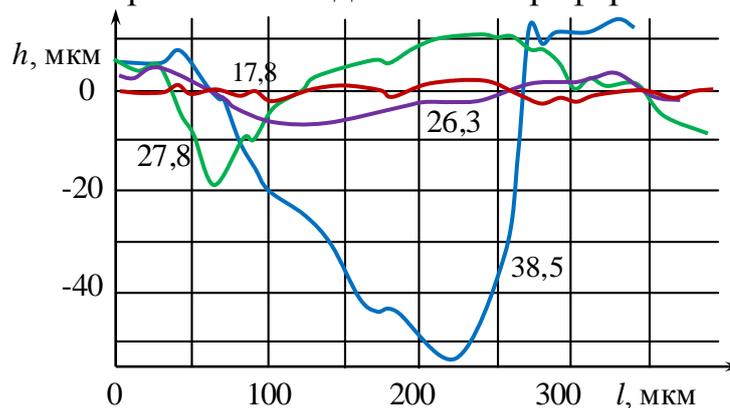


Рисунок 5 – Профили кратеров лазерных импульсов разной интенсивности. Числа возле кривых – интенсивность излучения в кВт/см^2

Расплавленный сварочный шов захватывает микрочастицы, ранее находившиеся на поверхности свариваемых металлов. Поэтому наиболее трудно удаляемое радиоактивное загрязнение, возникает на поверхности сварного шва заглушки в виде включений микрочастиц мокс-топлива. При этом микрочастицы располагаются на разной глубине матрицы.

UO_2 , PuO_2 и CeO_2 имеют полупроводниковые свойства и прозрачны излучению от видимой до средней ИК области спектра. Однако мощное лазерное излучение может поглощаться дефектами кристалла, которые являются первоначально поглощающими центрами. Для экспериментальных исследований были изготовлены образцы, содержащие сварочный шов на поверхности стали марки ЧС-68, с включенными в него частицами оксида церия. Размеры микрочастиц CeO_2 не превышали 6 мкм ($D_{50} = 2,0 \text{ мкм}$). Порошок CeO_2 смешивали с этиловым спиртом и с помощью пипетки наносили на поверхность металла. После испарения спирта металл плавил с помощью аппарата аргонодуговой сварки.

Для поиска микрочастиц CeO_2 , в области лазерного воздействия, поверхность металла исследовали при увеличении до 19,2 кх. Анализ областей абляции одного из участков показал наличие микрочастицы CeO_2 (рис. 6). CeO_2

слабо поглощает излучение с длиной волны 1,06 мкм. Известно, что значительная часть энергии луча поглощается на границе с металлом, контактируемым с микрочастицей оксида, из-за многократных переотражений. В результате вокруг микрочастицы CeO_2 в металле образуется газовая полость. На рис. 6 видно, что частица CeO_2 размером около 1 мкм испарилась лишь частично, при воздействии импульсами, не приводящими к недопустимому разрушению поверхности твэлов. Видно, что вскрылась микрочастица, находившаяся в металле на глубине, которая подвергалась лазерному воздействию лишь малую часть длительности импульса.

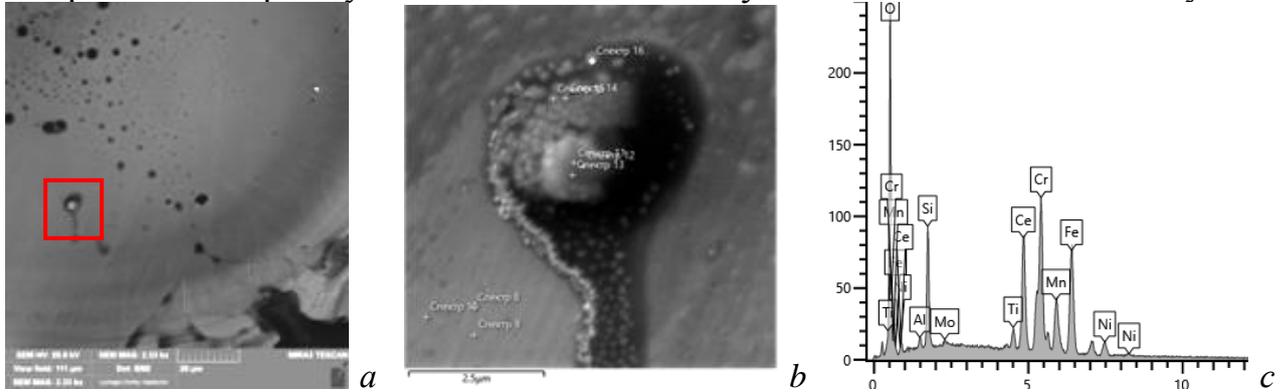


Рисунок 6 – Микроизображение лазерного кратера на поверхности стали ЧС-68 (а), изображение частицы (б) и энергодисперсионный спектр (с)

Для увеличения эффективности лазерной дезактивации необходимо испарить лишь частично внедренные микрочастицы, а металлическая матрица должна оставаться неизменной. Рассмотрим динамику импульсного лазерного нагрева микрочастиц диаметром 0,5 мкм в поле излучения 10,6 мкм интенсивностью 25 МВт/см². На длине волны 10,6 мкм поглощение металлами излучения не превышает 20%, а поглощение полупроводниковыми микрочастицами возрастает до 90%. Так как большая часть энергии импульса выделяется за время 30-50 нс, то влиянием теплопроводности можно пренебречь. Поэтому микрочастицы могут испариться полностью.

Рассмотрим динамику температуры микрочастиц в поле излучения CO_2 -лазера. За время t действия лазерного излучения микрочастица получает энергию $E_d = \varepsilon_d I_0 t \pi r_d^2$, а стальная матрица $E_m = \varepsilon_m I_0 t \pi r_f^2$. Здесь ε - коэффициент поглощения, I - интенсивность излучения, t - время действия лазерного импульса, r_d - радиус частицы, r_f - радиус фокального пятна лазера.

Поглощаемая энергия приводит к нагреву в поле лазерного излучения микрочастицы $E_d = C_d \rho_d \frac{4}{3} \pi r_d^3 \Delta T_d$, мишени - $E_m = C_m \rho_m \pi r_f^2 0,33\lambda \Delta T_m$.

Отсюда определим выражение для нагрева микрочастиц и мишени:

$$\Delta T_d = \frac{\varepsilon_d I_0 t \pi r_d^2}{C_d \rho_d \frac{4}{3} \pi r_d^3} = \frac{3 \varepsilon_d I_0 t}{4 C_d \rho_d \pi r_d} \text{ - микрочастица,} \quad (1)$$

$$\Delta T_m = \frac{\varepsilon_m I_0 t \pi r_f^2}{C_m \rho_m \pi r_f^2 0,33\lambda} = \frac{\varepsilon_m I_0 t}{C_m \rho_m 0,33\lambda} \text{ - мишень.} \quad (2)$$

Для сопоставления скоростей нагрева микрочастиц и мишени проводили оценку температуры, с разрешением по времени 1 нс в пренебрежении теплопроводности. На каждом этапе расчета использовали теплоемкость в соответствии с усредненными значениями по нескольким литературным данным.

На рис. 7 приведены расчетные графики изменения температуры микрочастиц стали и оксидов диаметром 0,5 мкм при воздействии лазерным импульсом длиной волны 10,6 мкм, интенсивностью 25 МВт/см². Участок, параллельный оси ОХ, показывает время, необходимое для компенсации энергии, затрачиваемой на плавление. Из графиков нагрева (рис. 7) видно, что стальная микрочастица нагревается значительно медленнее оксидов и за время импульса СО₂-лазера (50 нс) не нагревается до температуры кипения. Можно предположить, что стальная мишень будет нагреваться ещё медленнее. Оксид церия достигает температуры кипения позже всех оксидов и за время 50 нс также не нагревается до температуры кипения. Изолированные микрочастицы UO₂ и PuO₂ диаметром 0,5 мкм в поле лазерного излучения СО₂-лазера одновременно нагреваются до точки кипения за время 44 нс. Эти оксиды составляют мокс-топливо. За время 60 нс возможно испарение частиц UO₂, ThO₂, PuO₂ в поле излучения СО₂-лазера.

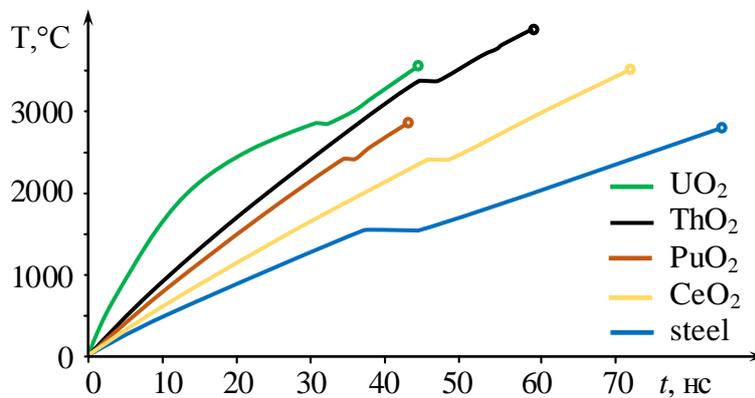


Рисунок 7 – Температура изолированных микрочастиц CeO₂, UO₂, PuO₂, ThO₂ и стали при облучении импульсным СО₂-лазером с интенсивностью 25 МВт/см²

Результаты моделирования показали, что имеются благоприятные условия для лазерной дезактивации сварного шва твэла от микрочастиц мокс-топлива с помощью излучения СО₂-лазера (10,6 мкм, длительность 50 нс), так как микрочастицы UO₂ и PuO₂ одновременно нагреваются до точки кипения, а стальная матрица нет. Поэтому при лазерной дезактивации твэлов оптимально использование двух последовательных лазерных импульсов на длинах волн 1,06 мкм и 10,6 мкм для селективного удаления α-излучающих радионуклидов в термомеханическом и испарительном режиме соответственно.

В четвертой главе обсуждается возникновение вторичных эффектов лазерной абляции, формирование аэрозоля и парогазового облака. Газовое облако и плазма, сформированные в результате лазерной абляции, распространяются от поверхности с большой скоростью. Наличие в газе взвешенных частиц приводит к дополнительному поглощению лазерного излучения. Поэтому приповерхностное газовое облако определяет условия прохождения лазерного излучения к мишени и влияет на условия прохождения излучения длинных лазерных импульсов. При

облучении короткими лазерными импульсами, газовое облако влияет на прохождение излучения лазеров с высокой частотой модуляции добротности.

Концентрация и дисперсность аэрозольного облака влияют на условия прохождения лазерного излучения на мишень из-за того, что более мелкие частицы имеют большее суммарное геометрическое сечение, чем такая же по весу крупная частица. Поэтому необходим поиск методов управления размерами капель и дисперсных частиц, образующихся из паров. В исследованиях проведенных нами ранее, установлено, что при использовании Nd:YAG лазерного излучения длительностью импульсов 1,5 мс или 15 нс наличие постоянного магнитного поля 30-180 мТл увеличивает скорость бурения сквозного отверстия в графите толщиной 2-3 мм. Расчеты показывают, что действие на мишень одного импульса лазерного излучения при наличии постоянного магнитного поля, испаряет графит в среднем количестве массой 14,8 нг, а без магнитного поля 8,87 нг. Видно, что количество испарившегося графита увеличилось до 1,67 раз. При этом показано, что скорость бурения отверстия не зависит от величины магнитного поля в диапазоне 30-180 мТл. Поэтому скорость испарения графита импульсным Nd:YAG лазерным излучением связана с уменьшением времени переходных процессов в парогазовом облаке, что увеличивает долю лазерного излучения, попадающую на мишень.

При нуклеации от скорости охлаждения в значительной мере зависит распределение образующихся частиц по размерам. При высокой степени пересыщения будут формироваться новые ядра конденсации. Поэтому в конденсированной фазе одновременно будут находиться частицы разных размеров. При уменьшении степени пересыщения во времени, формируются более крупные частицы.

Появление ядер конденсации приводит к некоторому уменьшению степени пересыщения, что сопровождается замедлением скорости формирования новых ядер конденсации. При дальнейшем медленном охлаждении концентрация вещества в газовой фазе уменьшается, в основном, из-за увеличения размеров уже имеющихся ядер конденсации и наночастиц. Поэтому наблюдается ограничение функции распределения дисперсных частиц по размерам со стороны малых частиц из-за того, что новые наночастицы не появляются.

На рис. 8 приведена схема модели роста дисперсных частиц. Атомы из газовой фазы, имеющие неспаренные электроны, сорбируются на поверхности частицы и формируют спиновые пары. Схема иллюстрирует образование спиновых пар между атомами твердого тела и адсорбированными атомами.

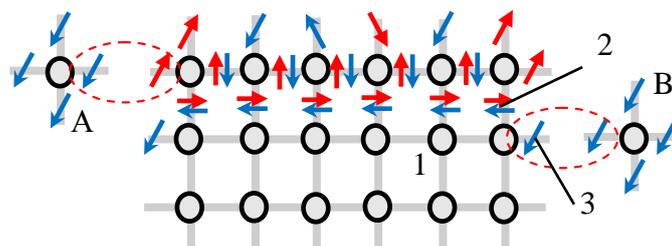


Рисунок 8 – Модель роста дисперсных частиц. 1 - атомы, 2 – спаренные, 3 – неспаренные спины

Принцип Паули накладывает условия для формирования ковалентной связи не только между двумя атомами, но и для образования молекул и наночастиц. Поэтому процессами нуклеации можно управлять путем воздействия внешним магнитным полем.

Атом «А» на рисунке 8 сразу после адсорбции во внешнем магнитном поле переходит в триплет-синглетное состояние и объединяется с твердым телом. Атом «В» не может сразу образовать ковалентную связь и начинает диффундировать по поверхности твердой фазы, пока спиновая пара не испытает триплет-синглетный переход. Если время диффундирования сорбированного атома превышает время «жизни», атом испаряется.

Время триплет-синглетной конверсии изотопных модификаций молекул

$$\Delta \nu = \frac{1}{t_{\text{кон}}} = \frac{\mu}{h} [g_1(H + a_1) - g_2(H + a_2)]. \quad (3)$$

Здесь μ - магнетон Бора, h - постоянная Планка, g - g-фактор, a - постоянная сверхтонкого взаимодействия. Индексы «1» и «2» относятся к сорбированному атому и к поверхностному атому твердого тела.

Вероятность формирования синглетного состояния двух радикалов

$$\delta_1 S = \frac{[S]}{[S + T_0 + T_{-1} + T_1]} = \frac{n}{n_1 + n_1(n_1 - 1) + 2n_1^2} = \frac{1}{3n_1}. \quad (4)$$

Здесь S - спиновая проекция, n - количество диапазонов угла прецессии спина, T - триплетное состояние спиновых пар.

Известно соотношение неопределенностей для проекции спинов на оси координат. Из этого соотношения следует, что существует неопределенность взаимной угловой ориентации двух спинов для формирования синглетного состояния. При прецессии в магнитном поле можно выделить $n_1 \approx 6,3$ ($n = 2\pi/\Delta\varphi$) диапазонов по фазе прецессии спина воспринимаемого другим спином, как одно направление. В магнитном поле, из-за перемещения спина по сферической поверхности (4π ср вместо 2π рад) будут наблюдаться $n_2 \approx 12,6$ диапазонов неопределенностей. Поэтому внешнее магнитное поле уменьшает время триплет-синглетной конверсии спиновых пар неспаренных электронов для формирования химической связи. Это способствует ускорению процесса формирования ядер конденсации и уменьшению коэффициента десублимации. Более равномерная по объему конденсация паров (больше ядер конденсации) ограничивает появление аномально крупных частиц. В результате формируется конденсированная фаза, имеющая более узкий диапазон размеров, чем в нулевом магнитном поле.

Оптимизация процесса лазерной дезактивации возможна при непрерывном контроле очистки поверхности. В работе показано, что воздействие высокоинтенсивного лазерного излучения приводит к возникновению оптического пробоя, который сопровождается образованием электрических и магнитных полей. Напряженность магнитного поля регистрируется как в допробойных режимах, так и в оптическом пробое, и может находиться в пределах от 10^2 до 10^5 Тл. В слабоионизированной плазме, возникающей при лазерной абляции, на плазменную частоту влияют крупные частицы, на которых

может находиться заряд: пылинки, аэрозоли. Поэтому расчет плазменной частоты из формулы Ленгмюра не дает представления о динамике и вероятности процессов образования более крупных частиц в парогазовом облаке.

Для исследования плазменной частоты, возникающей при ионизации аэрозолей в парогазовом облаке продуктов абляции, проводили искусственное запыление атмосферы частицами Al_2O_3 размерами 0,5-1 мкм и средней концентрацией 10^{10} м^{-3} . Затем, проводили ионизацию среды излучением $CO_2:N_2$ лазера с длительностью импульсов 0,3-0,5 мкс. Характерные сигналы, полученные на цифровом осциллографе в режиме одиночного запуска с антенны и магнитного зонда приведены на рис. 9.

Показано, при возникновении очага пробоя, регистрируются электрические и магнитные поля. При этом амплитуда регистрируемых сигналов, возникающих в результате пробоя, уменьшается, а период колебаний увеличивается. На участке с максимальным импульсом по амплитуде, частота регистрируемой электромагнитной волны составляет 10^5 Гц. Вариация характеристик плазменной частоты пробоя зависит от состава компонентов парогазового облака, плотности и гранулометрического состава аэрозоля, пространственной однородности среды. Сделано и обосновано предположение, что по плазменной частоте пробоя можно судить о полноте дезактивации. Частота электромагнитного излучения плазмы пробоя ограничена диапазоном 100-350 кГц.

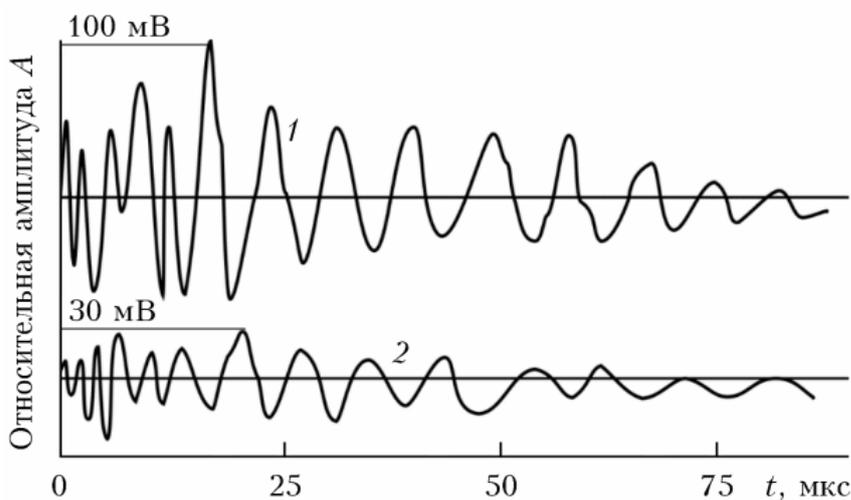


Рисунок 9 – Формы сигналов с антенны (1) и магнитного зонда (2)

Известно, что лазерное излучение 1,06 мкм применяется при лазерной дезактивации в газах и растворах, а его ослабление в окне прозрачности, описывается законом Бугера. В результате лазерной дезактивации испаряется оксидная пленка на поверхности металла. Процесс сопровождается большим коэффициентом перевода электромагнитной энергии в тепловую. Показано, что в жидкости это способствует интенсивному образованию пузырьков пара и удалению загрязненных частиц за счет кавитационных эффектов. При этом отраженная от твердой подложки часть электромагнитной волны претерпевает интенсивное рассеяние на наночастицах, а формы сигналов, регистрируемых фотоприемником (см. рис. 10), будут иметь большую амплитуду и продолжительное послесвечение плазменного образования.

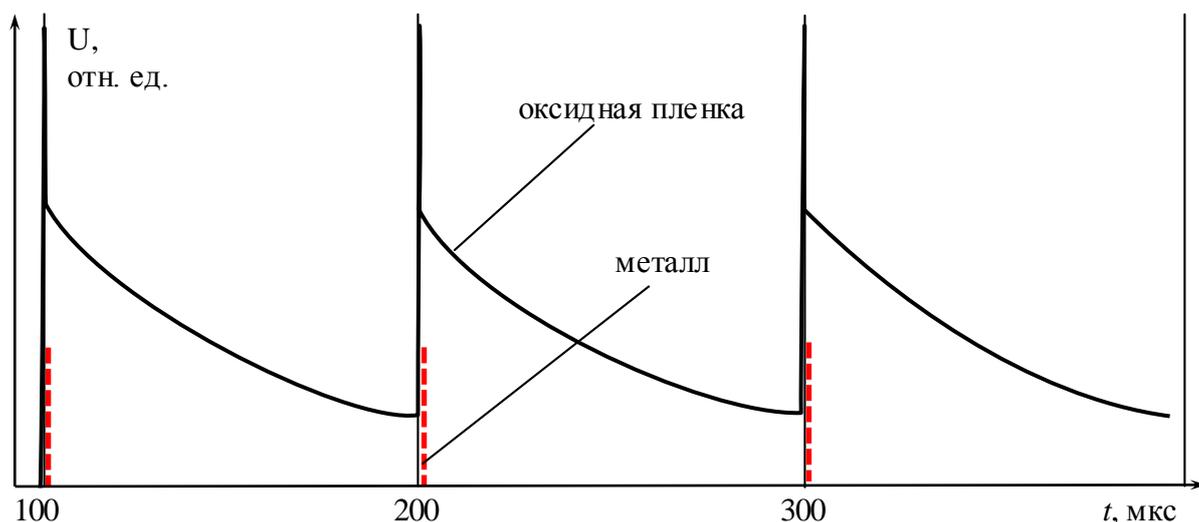


Рисунок 10 – Форма потока рассеянного излучения при лазерной абляции

Доказано, что при удалении слоя загрязнения и включений радиоактивных частиц оксидного топлива, процессы испарения и образования пузырьков пара становятся менее интенсивными. Большая часть лазерного импульса претерпевает зеркальное отражение от металлической подложки. Поэтому сигнал, регистрируемый фотоприемной аппаратурой, будет содержать периодические импульсы с частотой, равной частоте следования импульсов лазерного излучения.

При завершении очистки металла происходит уменьшение послесвечения плазмы, которое сопровождается изменением формы регистрируемых сигналов. Доказано, что анализ временной зависимости рассеянного излучения позволяет контролировать степень дезактивации в жидкости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обнаружено, что в диапазоне интенсивностей $17-27 \text{ кВт/см}^2$ импульсов миллисекундной длительности неодимового лазера возможна очистка сварного шва стали ЧС-68 от внедренных в металл микрочастиц CeO_2 . Путем сопоставления оптических и теплофизических характеристик UO_2 , PuO_2 и CeO_2 показано, что возможна лазерная очистка стали ЧС-68 от радиоактивных микрочастиц UO_2 и PuO_2 с коэффициентом дезактивации до 5,33, а вновь формируемая шероховатость поверхности сварного шва твэла не превысит допустимую по техническим условиям на поверхность твэла.

2. Впервые показано, что при облучении импульсами CO_2 -лазера длительностью 50 нс и интенсивностью 25 МВт/см^2 микрочастицы UO_2 и PuO_2 диаметром 0,5 мкм нагреваются до точки кипения, а микрочастицы ThO_2 и сталь ЧС-68 – нет. На основании этой особенности доказана возможность проведения дезактивации сварного шва твэлов с мокс-топливом лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм и интенсивностью более 25 МВт/см^2 .

3. Экспериментально показано, что автоматизация процесса контроля общего поверхностного α -загрязнения твэла при лазерной дезактивации возможна с использованием камеры проходного типа, в которой реализована система

поддержания среды с максимальным пробегом α -частиц. Такие условия позволяют до 2,8 раз уменьшить пороговое значение автоматизированного контроля поверхностного загрязнения. Для этого можно использовать детекторы в камере объемом 5,9 литра с атмосферой гелия, расход которого поддерживается не менее 33 л/ч.

4. Продемонстрировано, что при лазерной абляции поверхности стали ЧС-68, находящейся под слоем жидкости или в газовой среде, миллисекундными импульсами неодимового лазера амплитуда интенсивности импульсов рассеянного излучения пропорциональна количеству микрочастиц CeO_2 , находящихся в приповерхностном слое металла.

5. Показано, что при мокрой лазерной очистке поверхности от радиоактивных микрочастиц процессы испарения и образования пузырьков пара в жидкости приводят к интенсивному рассеянию лазерного излучения. Высокая степень очистки поверхности приводит к уменьшению амплитуды и продолжительности послесвечения плазменного образования. Анализ зависимости от времени величины потока рассеянного излучения, при лазерной абляции, позволяет вести контроль качества очистки поверхности.

6. Установлено, что постоянное магнитное поле с индукцией 30-180 мТл влияет на процесс нуклеации паров из низкотемпературной плазмы. Поэтому воздействие постоянного магнитного поля с индукцией 30-180 мТл увеличивает эффективность лазерной очистки поверхности от микрочастиц, находящихся в приповерхностном слое мишени, импульсами длительностью 1-1,5 мс. Это связано с тем, что постоянное внешнее магнитное поле способствует увеличению скорости как формирования ядер конденсации, так и роста микрочастиц. Одновременное зарождение большого количества ядер конденсации и быстрый их рост приводит к быстрому уменьшению экранировки мишени аэрозолем. Это увеличивает эффективность лазерного воздействия.

* * *

Проведены исследования, результаты которых могут быть положены в основу метода лазерной дезактивации поверхности и сварного шва твэла от микрочастиц оксидов актиноидов и лантаноидов.

Для существующей технологии производства мокс-топлива целесообразно применение комбинации лазерных импульсов двух длин волн: 1,06 мкм в термомеханическом режиме очистки поверхности и удаления нефиксированного радиоактивного загрязнения, и 10,6 мкм в испарительном режиме для удаления фиксированных частиц в сварочном шве твэла. При проектировании новых автоматических линий изготовления уран-плутониевого топлива, в том числе с использованием метода лазерной сварки, необходимо предусмотреть очистку поверхности торца и заглушки твэла лазерным излучением в термомеханическом режиме непосредственно перед сваркой твэла.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Индексируемые в Web of Science, Scopus, ВАК

1. Khan V.A., Myshkin V.F., Khorokhorin D.M. et al. Automation of the monitoring system for surface contamination with α -active radionuclides // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1019. – №. 1. – С. 012086. DOI:10.1088/1757-899X/1019/1/012086.
2. Myshkin V.F., Pushkarev A.I., Tuksov I.V., Lukin A.V., Khan V.A., Khorokhorin D.M. et al. Laser Decontamination of a Fuel-Element Surface from Uranium-Plutonium Fuel Particles //Atomic Energy. – 2022. – С. 1-5. DOI:10.1007/s10512-022-00837-9.
3. Myshkin V.F., Balandin S.F, Donchenko V.A., Pogodaev V.A., Khan V.A., Abramova E.S., Kulakov Yu.I., Pavlova M.S., Khazan V.L., Horokhorin D.M. Generation of Electric and Magnetic Fields during High-Intensity Laser Radiation Propagation through the Atmosphere // Atmospheric and Oceanic Optics, 2020, V. 33. №. 5. pp. 549–554. DOI:10.1134/S1024856020050139.
4. Myshkin V.F., Tuksov I.V., Cailun W., Lukin A.V., Khan V.A., Lychagin D.V., Khorokhorin D.M., Balandin, S. F. Aerosol Formation During Laser Ablation in a Magnetic Field //Atomic Energy. – 2022. – С. 1-5. DOI:10.1007/s10512-022-00832-0.
5. Myshkin V.F., Dorofeeva L.I., Timchenko S.N., Khan V.A., Khorokhorin D.M., Ereemeev R.S., Volokitin O.G. Plasma Processing of Fuel Pellets //Atomic Energy. – 2022. – С. 1-5. DOI:10.1007/s10512-022-00856-6.
6. Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А., Баландин С.Ф., Хорохорин Д.М. и др. Об использовании бистатических подводных оптических систем связи // «Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт», 2020, № 8, С. 4-12. DOI:10.36724/2072-8735-2020-14-8-4-12.

Патенты

7. Мышкин В.Ф., Хан В.А., Хорохорин Д.М. и др. Устройство для возбуждения факельного разряда. Патент РФ №2713214. Опубликовано 04.02.2020. Бюллетень №4.
8. Мышкин В.Ф., Хорохорин Д.М., Хазан В.Л. и др. Способ создания сверхнизкочастотной - низкочастотной передающей антенны и установка для его осуществления. Патент РФ № 2717159. Опубликовано 18.03.2020. Бюллетень №8.