

**ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет»**

## **Отчет за 2015 год**

**Проект № 2049: Разработка теоретических и феноменологических основ получения новых функциональных нанокomпозиционных материалов, включая наноразмерные кластеры и комплексоны, с применением методов высокоэнергетических воздействий**

Руководитель: доктор химических наук С.М. Решетников

Ижевск 2015

## Аннотированный отчет

1. Номер государственной регистрации НИР:  
01201465431
2. WWW адрес (для ссылки на информацию о результатах НИР):  
<http://lnsm.school.udsu.ru/projects>
3. Приоритетное направление:  
Индустрия наносистем и материалов
4. Критическая технология:  
Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов
5. Наименование этапа:  
Исследование физико-химических и эксплуатационных характеристик композиционных материалов
6. Дата начала этапа:  
01.01.2015
7. Дата окончания этапа:  
31.12.2015
8. Полученные научные и (или) научно-технические результаты:

Известно, что поверхностные свойства металлов и сплавов, в том числе адсорбционные, электрохимические, коррозионные, определяются, в основном, состоянием и составом поверхностных слоев. Увеличение дисперсности металлических материалов, вплоть до создания на их поверхности наноразмерных фаз, может приводить к повышению коррозионной стойкости материалов на основе железа, его оксидов и карбидов. Также в последнее время все большее внимание уделяется различным формам углеродных материалов, так полезными функциональными свойствами обладают слои графита, особенно нанесенные на металлические или другие проводящие подложки. Одним из путей создания наноразмерных элементов поверхности, в том числе насыщение углеродом низкоуглеродистых нелегированных сталей, является лазерная обработка металлических материалов. Лазерный синтез наноразмерных поверхностных слоев, состоящих в основном из оксидов железа, приводит к повышению коррозионной стойкости нелегированных сталей, что в значительной мере связано с облегчением перехода таких сталей в пассивное состояние.

Значительной проблемой методов нанесения твердосплавных покрытий на «мягкие» подложки является низкая адгезионная прочность и необходимость подогрева деталей до высоких температур (до 600°C). Решение проблемы низкой адгезионной прочности покрытия к основе может заключаться в нанесении градиентных покрытий, где свойства постепенно меняются по сечению: более мягкие внутренние слои могут обеспечить лучшую адгезию покрытия к подложке, тогда как более твердые наружные слои сообщают высокую износостойкость, коррозионную стойкость или электрохимическую активность. Метод высокоскоростного лазерного спекания характеризуется малой длительностью импульса и высокой скоростью лазерной обработки, что и приводит к

высокоскоростным фазовым переходам при высоком градиенте температуры. При короткоимпульсной лазерной обработке практически отсутствует разогрев подложки, что благотворно сказывается на качестве покрытий.

Сложность физических явлений в сочетании с малым (от 0.1 до 10 мс) временем лазерного воздействия требуют применения методов математического моделирования для изучения компактирования порошковых сред. Дополнительно требуется провести исследование, как высокоанизотропные порошковые среды изменяют процессы переноса тепла и энергии лазерного излучения на уровне отдельных частиц, с учетом процессов дифракционного рассеяния. Полученные данные необходимы для установления оптимальных режимов обработки порошков в зависимости от их дисперсионного и химического состава, скоростей обработки, частоты и продолжительности импульсов

В проекте был разработан **МЕТОД ОСРЕДНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ**. Предложена физико-математическая модель и программное обеспечение, позволяющее описывать диффузионный теплоперенос в пористых средах, а также описывать пористую структуру порошков. В связи с геометрическими особенностями на макроскопическом масштабе порошковые среды можно рассматривать в приближении сплошной среды, а для описания процессов теплопереноса использовать усреднённые теплофизические характеристики при малых и средних < 50% значениях пористости. На основании результатов численных экспериментов можно сделать вывод, что зависимость усреднённых теплофизических параметров от пористости для различных пористых систем нелинейна. Возможность описания структур при помощи полной геометрической реконструкции позволяет учитывать в методе расчета анизотропные характеристики среды и коррекции коэффициента теплопроводности, в том числе при включении в металлический порошок керамических частиц.

Были разработаны **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВЫХ СРЕДАХ**. Для этого уравнения Максвелла в порошковой среде сведены к уравнению Гельмгольца для однофазной среды с заданием граничных условий на поверхности частиц среды. Эффективность проникновения лазерного излучения в среду определяется плотностью порошка, размером и морфологией частиц, длиной волны лазерного излучения и коэффициентом отражения от поверхности. Статистическая обработка данных позволила получить аналитическое выражение, определяющее вид зависимости коэффициента затухания от этих параметров. Важным результатом численных расчетов является полученное хорошее согласование, как с экспериментом, так и с моделью эффективной гомогенной среды, в данной работе впервые получен вид распределения энергии излучения при сопоставимых значениях длины волны лазерного излучения и диаметра частиц порошка. Также показан переход к приближениям геометрической оптики для

оценки параметров, определяющих эффективность поглощения излучения средой при условии, когда диаметр частиц много превышает длину волны излучения.

Проведено **ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ FE**, показана возможность насыщения оксидами хрома поверхности низкоуглеродистой стали короткоимпульсной лазерной обработкой с лазерно-индуцированным образованием плазмы. В результате обработки формируется градиентное по химическому и фазовому состоянию покрытие, характеризующееся частичным растворением включений оксида хрома (+3), формированием шпинельных структур  $FeO \cdot Cr_2O_3$ , восстановлением оксида до металлического состояния и карбидов хрома. Состав и свойства указанного поверхностного слоя аналогичны составу и свойствам пассивационных слоев, обеспечивающих коррозионную стойкость сплавов Fe-Cr или хромистых сталей с высоким содержанием хрома. Определены оптимальные условия лазерной обработки для создания твердого, адгезионно прочного покрытия порошка карбида вольфрама на образцах из стали-20.

С помощью высокоскоростной лазерной обработки ультрадисперсного порошка графита, размещенного на поверхности нелегированной стали, может быть получена тонкая, толщиной около 5 нм, поверхностная пленка с переходным аморфно-кристаллическим состоянием, имеющая хорошее сцепление с подложкой. Сцепление с подложкой обеспечивается созданием промежуточного слоя, состоящего из нестехиометрических карбидов железа. Таким образом, было получено описание **ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК УГЛЕРОДА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В СТОРОНУ ПОЛНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ АНОДНОМУ РАСТВОРЕНИЮ ЖЕЛЕЗА**.

В части **ОПИСАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СПЕКАНИЯ**. Выполнены испытания по микротвердости и механической износостойкости покрытий, проанализировано влияние добавок углерода на изменение коэффициента трения скольжения покрытий, что применимо в контактных парах трения на примере пути снижения трения в опорах скольжения на примере спироидных низкоскоростных тяжело нагруженных редукторов, применяемых в качестве приводов трубопроводной арматуры.

В ЧАСТИ **ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ РАВНОВЕСИЙ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЖИДКИХ СРЕД И УЧЁТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСОВ С РАСТВОРИТЕЛЕМ** на основании полученных данных о строении одиночной молекулы ингибитора ВНХ-Л-49 созданы системы, моделирующие поведение молекул в полярной и неполярной средах при различных условиях. Показано, что в полярной среде ингибитор ВНХ-Л-49 способен образовывать ассоциаты, структура и количество которых определяется концентрацией, температурой и в первую очередь полярностью растворителя. Показано, что в неполярной среде агрегация молекул ингибитора ВНХ-Л-49 не наблюдается в

изученной области концентраций и температур. Рассчитаны изменение термодинамических параметров в процессе агрегации, что показало самопроизвольность и эндотермичность процесса. Изучен процесс агрегации молекул ТЭАСI в воде, в результате чего выяснилось, что при высоких концентрациях молекулы имеют тенденцию образовывать единую аморфно-кристаллическую структуру.

Проведено систематическое исследование гомо- и гетеролигандных комплексов никеля(II), кобальта(II) и ванадия(IV) с различными комплексоны (ИДА, ГЭИДА, НТА, ЭДТА, НТФ, ГЭИДФ, ФБТК) и глицином в водных растворах. Установлено влияние концентрации реагентов и кислотности среды на состав, устойчивость и доли накопления смешанолигандных и смешанометалльных комплексов.

Получены новые сведения по равновесиям образования полиядерных комплексов никеля(II) и кобальта(II) с ЭДТА и комплексоны (ИДА, ГЭИДА, НТА). Рассчитаны константы устойчивости этих комплексов, построены структурные модели.

Изучена адсорбция тяжелых металлов гетитом и другими сорбентами в присутствии комплексонов и комплексонов. Проведено математическое моделирование ремобилизации тяжелых металлов под действием комплексонов.

В части **СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ В РЕАКЦИИ КАТОДНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА** создана технология производства и способ получения материала катода для электролиза водных растворов с целью получения водорода на основе нанокomпозита железо-никель, обладающего пониженным перенапряжением водорода, получен патент.

9. Полученная научная и (или) научно-техническая продукция:

В части **РАЗРАБОТКИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ НОВОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ** получены следующие научная и научно-техническая продукция:

1. Расширенная физико-математическая модель теплопереноса в зоне лазерной обработки с учётом режимов генерации лазерного излучения и протекания высокоскоростных фазовых переходов. Модель основана на феноменологическом описании процессов фазовых переходов с использованием модифицированного метода двухфазной зоны, с учётом режима импульсной генерации теплового источника. Динамика распространения тепловых полей определяется управляющими параметрами такими как: частота генерации, длительность импульса, размеры и скорость движения лазерного луча, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения границы раздела металлической и газовой фаз, эффективные коэффициенты теплопереноса в среде. Создана программа, реализующая численную схему.
2. Физико-математическая модель компактирования порошка при импульсной лазерной обработке, учитывающая нестационарные

процессы изменения локальной плотности порошка и компактирования материала. Двухмасштабная численная модель позволяет рассчитывать спекание однокомпонентных и многокомпонентных металлических порошков под воздействием лазерного излучения с учётом высоких градиентов температуры и пористости. Создана программа, реализующая численную схему.

3. Создана физико-математическая и компьютерная модель переноса энергии лазерного излучения в порошковых средах с учетом эффектов волновой оптики при рассеянии на единичных частицах. Выполнена серия расчётов по исследованию коэффициентов затухания лазерного излучения и их зависимости от дисперсионного состава порошков, на основе этих данных предложена расширенная феноменологическая модель, основанная на формализме закона Бугера для проницаемости металлических сред.

В части **РАЗРАБОТКИ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЯ НАНОРАЗМЕРНЫЕ КЛАСТЕРЫ И КОМПЛЕКСОНАТЫ, С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ** получены следующие результаты:

1. Метод использования короткоимпульсного лазерного облучения порошкообразного карбида вольфрама для образования карбидовольфрамового покрытия на сравнительно мягкой подложке из нелегированной стали. Определены оптимальные условия лазерной обработки для создания твердого, адгезионно прочного покрытия на образцах из стали-20. Показано, что в результате короткоимпульсной лазерной обработки формируются градиентные по фазовому составу покрытия с высокой прочностью сцепления с подложкой.
2. Полученные наноразмерные графитные слои в широкой области анодных и катодных потенциалов ведут себя подобно идеально поляризуемому электроду и полностью препятствуют протеканию анодного растворения железа

В части **ПОЛУЧЕНИЯ, ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСОНАТОВ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ** получены следующие результаты:

1. Рассчитаны константы устойчивости и построены структурные модели полиядерных комплексов никеля(II) и кобальта(II) с ЭДТА и комплексоны (ИДА, ГЭИДА, НТА).
2. Полученные наноразмерные графитные слои в широкой области анодных и катодных потенциалов ведут себя подобно идеально поляризуемому электроду и полностью препятствуют протеканию анодного растворения железа

В части **СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ В РЕАКЦИИ КАТОДНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА**. получены следующие результаты:

1. **ПОЛУЧЕН ПАТЕНТ** «Катод для электрохимического получения водорода и способ его изготовления», основанные на нанокристаллических частицах Fe-Ni, нанесенных в виде активного нанокomпозитного слоя на стальную подложку, характеризуется пониженным перенапряжением водорода.

В части **ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ПОДГОТОВКЕ БАКАЛАВРОВ И МАГИСТРОВ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОГО И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ** издано учебное пособие:

Т.А. Писарева, Е.М. Борисова, Э.Е.Садиоков, С.М.Решетников, Е.В.Харанжевский Изучение коррозионного и электрохимического поведения электродов с помощью потенциостатов: Учебное пособие. — Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», ISBN 978-5-4312-0385-5, 2015. — 64 с.

Учебное пособие «Изучение коррозионного и электрохимического поведения электродов с помощью потенциостатов» методические указания по использованию потенциостатов при коррозионно-электрохимических исследованиях наноразмерных адсорбционных, пассивационных и других поверхностных слоев, образованных на металлическом материалах, а также потенциальных электродов электрохимических конденсаторов. В учебном пособии описана методика измерений коррозионных токов, токов анодного растворения, параметров пассивации и других коррозионно-электрохимических характеристик, изучаемых металлических материалов. Кроме того, в пособии имеется раздел, посвященный использованию международной системы единиц в коррозионно-электрохимических исследованиях.

10. Ключевые слова и словосочетания, характеризующие результаты (продукцию): импульсное лазерное облучение, твердосплавные и градиентные покрытия, коррозионная стойкость, мицеллообразование, комплексообразование, сорбция, высокоскоростной лазерный синтез, механизмы структурообразования, многомасштабное моделирование, процессы тепломассопереноса.

11. Наличие аналога для сопоставления результатов (продукции):

1. Модели и программные пакеты для молекулярно-динамического моделирования молекул, химических реакций и образования комплексов. В проекте имеющиеся модели образования объемных кластеров сольватов и гидратов, основанные на методах молекулярной динамики, уточнены в части прогнозирования их реакционной способности и в части адсорбционных и коррозионных свойств.

2. Модели образования комплексов, обладающих защитными антикоррозионными свойствами в водных растворах. В проекте впервые проведено систематическое исследование гомо- и гетеролигандных комплексов металлов с различными комплексоны и некоторыми аминокислотами в водных растворах.

3. Технологии лазерной и плазменной обработки поверхностей металлических материалов. В проекте предложен новый метод синтеза тонких поверхностных слоев толщиной 1-100 микрон за счет специального подбора режимов обработки и подготовки порошка. Предлагаемый метод позволяет нанести функциональные слои с наноразмерными элементами структуры и градиентными по составу свойствами. Это обеспечивает высокие адгезионные и другие физико-механические свойства, включая антикоррозионные.

4. Программы для моделирования микрометаллургических процессов порошковой металлургии. Существующие аналоги предназначены для квазиравновесных процессов спекания порошков. В проекте впервые проведено развитие компьютерных методов расчета усадки металлических порошков в аддитивных технологиях с учётом высоких градиентов температур и изменяющейся пористости, а также изменяющимися эффективными тепловыми характеристиками среды.

5. Технологии производства катодов для промышленного получения водорода в том числе на основе металлов платиновой группы. Технологии производства катодов на основе железа и сплавы Fe-Ni. Существующие аналоги имеют недостатки в сложном и дорогом многостадийном производственном процессе (как в случае плазменного напыления интерметаллического соединения церия и никеля), либо не обеспечивают эффективность производства водорода (как в случае с железными электродами с недостаточно пониженным перенапряжением).

6. Модели и программные пакеты для расчёта пространственного распределения энергии излучения в дисперсной среде с металлическими частицами. В данной работе впервые получен вид распределения энергии излучения при сопоставимых значениях длины волны лазерного излучения и диаметра частиц порошка.

7. Учебные пособия по методическим указаниям по использованию современного потенциостатического оборудования, для коррозионно-электрохимических исследований.

Выпущенное учебное пособие для студентов бакалавриата и магистратуры проводит обзор методов коррозионно-электрохимических измерений в различных материалах с высокоактивными поверхностными слоями. Дается сравнение принципиальных устройств различных видов потенциостатов-гальваностатов, а также режимы их работы. Пособие дает представление о физико-химических основах методов исследования электрохимического импеданса, исследования межкристаллитной коррозии, эффективности действия ингибиторов на примере



сталай. Также включает справочник по единицам и обозначениям в области электрохимии по ГОСТ и рекомендациям ИЮПАК.

12. Преимущества полученных результатов (продукции) по сравнению с результатами аналогичных отечественных или зарубежных НИР по новизне:

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЯВЛЯЮТСЯ НОВЫМИ**

13. Преимущества полученных результатов (продукции) по сравнению с результатами аналогичных отечественных или зарубежных НИР по широте применения:

**НА МЕЖОТРАСЛЕВОМ УРОВНЕ**

14. Преимущества полученных результатов (продукции) по сравнению с результатами аналогичных отечественных или зарубежных НИР в области получения новых знаний:

**В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ЗНАНИЙ (ДЛЯ ПРИКЛАДНОГО НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)**

15. Степень готовности полученных результатов к практическому использованию (для прикладного научного исследования и экспериментальной разработки):

**ВЫПОЛНЕН ПРОТОТИП (УСТАНОВКИ, МЕТОДИКИ, СИСТЕМЫ, ПРОГРАММЫ И Т.Д.)**

16. Предполагаемое использование результатов и продукции:

Функциональные покрытия в высокотехнологичных отраслях машиностроения, авиационной и космической техники, сельхозтехники, а также нефте- и газодобычи. Использование покрытий позволит сократить использование легирующих добавок хрома и никеля. Полученные в проекте результаты показывают, что импульсная лазерная обработка позволяет сформировать улучшенные функциональные свойства в области триботехники и коррозионной стойкости.

Результаты разработок технологий в области создания материалов наноразмерного диапазона с повышенной электрохимической активностью в реакции катодного выделения водорода востребованы для решения проблем водородной энергетики и получения водорода высокой чистоты.

Объемные нанокластеры с высокой реакционной способностью востребованы в качестве основы химических реагентов для нефте- и газодобывающей промышленности. Улучшенная модель формирования кластеров, сольватов и гидратов полярных молекул, имеющих перспективу применения как ингибиторы коррозии. Модель основана на формализме молекулярной динамики и учитывает распределение зарядов на гетероатомах органических молекул. Это дает основание для прогнозирования их адсорбционных и ингибиторных свойств. Комплексные соединения различного состава, существующие в растворе, могут присутствовать также на поверхности металлов. Образуя прочные

координационные связи с атомом металла, лиганды модифицируют эти поверхности или преобразуют их свойства, придают им новые функциональные качества.

Учебное пособие предполагается к использованию в обучении студентов бакалавриата и магистратуры ФГБОУ ВПО «УдГУ» и содержит методические указания по использованию потенциостатов при коррозионно-электрохимических исследованиях наноразмерных адсорбционных, пассивационных и других поверхностных слоев, образованных на металлическом материалах, а также потенциальных электродов электрохимических конденсаторов. В учебном пособии описана методика измерений коррозионных токов, токов анодного растворения, параметров пассивации и других коррозионно-электрохимических характеристик, изучаемых металлических материалов. Учебное пособие планируется предложить другим ВУЗам для использования в учебном процессе.

Результаты проекта используются в реализации инновационных НИР, проводимых на базе малых инновационных предприятий ООО «Эковектор» и ООО «НКП», учрежденных ФГБОУ ВПО «УдГУ».

17. Форма представления результатов НИР (научно-технические отчеты, монографии, учебники, статьи в российских изданиях, статьи в зарубежных изданиях, доклады, другие публикации, проданные лицензии, заявки на объекты промышленной собственности, патенты, диссертации, экспонаты выставок; их количество):

Статьи, доклады, тезисы:

1. Коррозионно-электрохимические свойства карбидовольфрамовых покрытий, полученных короткоимпульсным лазерным облучением. Ч. 1. Получение и аттестация покрытий / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилев, С.М. Решетников, И.С. Николаева, Е.М. Борисова // Коррозия: материалы, защита. – 2015. – № 8. – С. 42-47.
2. Коррозионно-электрохимическое поведение наноразмерных углеродных слоев, нанесенных на поверхность нелегированной стали импульсным лазерным облучением / Ф.З. Гильмутдинов, Т.А. Писарева, С.М. Решетников, Е.В. Харанжевский // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 495-502.
3. Изучение процесса агрегации ингибитора ВНХ-Л-49 методом молекулярной динамики в различных средах / А.П. Ермолаева, И.Б. Ширококов // Вестник Удмуртского Университета. Серия Физика. Химия. – 2014. – № 4. – С. 5-13.
4. Молекулярно-динамическое моделирование процесса агрегации ингибитора хлорида тетраэтиламмония в различных средах / М.С. Жижина, И.Б. Ширококов // Вестник Удмуртского Университета. Серия Физика. Химия. – 2014. – № 4. – С. 14-22.
5. Моделирование координационных равновесий образования полиядерных этилендиаминтетраацетатов кобальта(II) в водных растворах аминоксаноуксусной кислоты / В.И. Корнев, Г.Ф. Алабдулла, Т.Н. Кропачева, Е.В. Батуева // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 430-436.
6. Моделирование двухъядерных гетеролигандных комплексонов кобальта(II) и никеля(II) в водных растворах аминоксаноуксусной кислоты / В.И. Корнев, Г.Ф. Алабдулла, Т. Н. Кропачева // Вестник Удмуртского Университета. Серия Физика. Химия. – 2014. – № 4. – С. 67-71.
7. Протолитические и координационные равновесия в водных растворах комплексонов никеля(II) / В.И. Корнев, Н.С. Булдакова // Журнал неорганической химии. – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 453-457.

8. Координационные соединения оксованадия(IV) с фосфорорганическими комплексонами в водных растворах / В.И. Корнев, Т.Н. Кропачева, У.В. Сорокина // Журнал неорганической химии. – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 458-464.
9. Применение модифицированных фосфоновыми комплексонами магнитных оксидов железа для сорбции катионов тяжелых металлов / А.С. Антонова, Т.Н. Кропачева, Ю.Я. Колида, В.И. Корнев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2015. – Т. 15, №. 6. – С. 280-289
10. Моделирование сорбционных процессов с использованием компьютерных программ Fiteql и Visual Minteq / Т.Н. Кропачева, А.С. Антонова, В.Е. Анкудинов // Тезисы с конференции «Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности». – 2015. – С. 21.
11. Исследование пористости микрокристаллического гетита методом БЭТ / И.В. Шутов, В.Е. Анкудинов, А.С. Антонова // Тезисы 21-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых / Омск. – 2015. – С. 417-419.
12. Сорбция ионов ртути(II) кристаллическими и аморфными (гидр)оксидами железа, алюминия и марганца / Т.Н. Кропачева, А.М. Петухова, А.С. Антонова // Тезисы 2-го Международного симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» / Новосибирск: ИНХ СО РАН. – 2015. – С. 206-209.
13. Физические и технологические основы создания наноструктурных функциональных покрытий короткоимпульсным лазерным синтезом / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилев С.М. Решетников // Тезисы Пятой Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к Наноиндустрии» / Ижевск. – 2015 – С. 200.
14. Исследование коррозионно-электрохимического поведения наноразмерных композитных слоев, полученных лазерным спеканием ультрадисперсных порошков железо–никель / Э.Е. Садиоков, С. М. Решетников, Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилев // Тезисы Пятой Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к Наноиндустрии» / Ижевск. – 2015 – С. 165-166.
15. Повышение коррозионной стойкости нелегированной стали нанесением наноструктурных оксидоникелевых слоев методом импульсного лазерного облучения / С.М. Решетников, Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилев, Э. Е. Садиоков // Тезисы Пятой Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к Наноиндустрии» / Ижевск. – 2015 – С. 166-167.
16. Электроды электрохимических конденсаторов на основе наноструктурного композиционного материала системы активированный уголь - металл / Т.А. Писарева, Е. В. Харанжевский // Тезисы Пятой Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к Наноиндустрии» / Ижевск. –2015 – С. 155-156.
17. M. Krivilyov, M. Rasquin, L. Stappers, G. Gordeev, J. Fransaeer, G. Degrez. Direct numerical simulation of near-wall turbulent flow and ionic mass transport in electrochemical reactors using a hybrid finite element/spectral method // International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 91, 2015, Pages 922–935
18. Г.А. Гордеев. Разработка программного комплекса для прогнозирования характеристик металлических изделий, получаемых 3D лазерной печатью // Устное выступление на инновационной конференции «Startup Village», наукоград Сколково, Москва, 2-3 июня 2015 г.
19. В.Е. Анкудинов. Разработка программного обеспечения для прогноза характеристик структурной и химической микронеоднородности при литье металлов // Устное выступление на инновационной конференции «Startup Village», наукоград Сколково, Москва, 2-3 июня 2015 г.
20. Гольдфарб В.И. Решетников С.М. Трубочев Е.С. Харанжевский Е.В. Кузнецов А.С. Корнилов А.А. Экспериментальное исследование материалов опор скольжения колеса и смазочных материалов в низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных редукторов // Вестник машиностроения. 2015. №5. С 53-60

Учебное пособие:

1. Т.А. Писарева, Е.М. Борисова, Э.Е. Садиоков, С.М. Решетников, Е.В. Харанжевский. Изучение коррозионного и электрохимического поведения электродов с помощью потенциостатов: Учебное пособие. — Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», ISBN 978-5-4312-0385-5, 2015. — 64 с.

Патенты:

1. Патент на изобретение РФ №2553737 «Катод для электрохимического получения водорода и способ его изготовления» / С.М. Решетников, Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилев, Э.Е. Садиоков, Ф.З.

Гильмутдинов // Приоритет изобретения 01 марта 2013 года, дата регистрации в государственном реестре изобретений 22 мая 2015 г.

Диссертационные работы:

1. С.Н. Костенков Затухание интенсивности лазерного излучения при взаимодействии с высокодисперсными порошковыми средами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.07 - Физика конденсированного состояния. / - Ижевск, 2015.
2. Н.С. Булдакова Протолитические и координационные равновесия образования полиядерных гетеролигандных комплексонов никеля (II) в водных растворах органических аминов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности: 02.00.01 / - Казань, 2015.
3. Е.Ю. Коробейникова Гомолигандные и гетеролигандные комплексоны и дикарбоксилаты железа(III), кобальта(II) и никеля(II) в водных растворах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности: 02.00.01 / - Казань, 2015.

18. Использование результатов в учебном процессе:

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРЕПОДАВАНИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДИСЦИПЛИН**

19. Предполагаемое развитие исследований:

В 2016 году будут продолжены исследования по исследованию физико-химических и эксплуатационных характеристик композиционных материалов, а также будет проведена апробация физико-математических моделей и разработка практических рекомендаций их использования. Планируемые результаты, которые будут получены в следующем году, включают:

- 1) Феноменологическая модель фазового поля для вязкого течения многофазных сред. Данная модель описывает сложные процессы движения газовых пор в процессе усадки порошковой среды, который сопровождается значительным изменением межфазных «расплав»-«газовая фаза» поверхностей.
- 2) Описание динамики движения фазовых поверхностей «газовая среда»-«расплав» при спекании порошковых материалов. На основании разработанной модели фазового поля и расчета тепловых полей будет рассчитана динамика усадки при различных режимах обработки.
- 3) Метод синтеза функциональных градиентных покрытий с помощью коротких лазерных импульсов. На примере бинарных металлических систем (в том числе Fe-Si и др.) планируется исследование структуры материалов, находящихся в сильнонеравновесном состоянии, полученном в результате высоких скоростей нагрева и охлаждения в ВЛП (высокоскоростное лазерное плавление) процессе. Основное внимание будет уделено анализу особенностей фазовых превращений и их влияния на формирование функциональных свойств материалов при ВЛП.
- 4) Описание триботехнических и электрохимических свойств композиционных градиентных покрытий, полученных при помощи спекания в том числе лазерным излучением. Будут проведены эксперименты по исследованию износостойкости и

микротвёрдости. При решении данной задачи планируется провести исследование функциональных характеристик композиционных покрытий, полученных высокоскоростным лазерным диспергированием керамических фаз в металлической матрице. На примере системы Ti-Ni и Zr-Nb, имеющих важное практическое значение, будут получены сведения о структуре, антикоррозионных и других функциональных характеристиках покрытий.

5) Метод модификации поверхности нанокomпозитных материалов с использованием жидких фаз, содержащих комплексоны. Будут созданы многослойные нанокomпозитные покрытия на поверхности металлической матрицы с использованием принципов самоорганизации и самосборки. Будут получены антикоррозионные многослойные покрытия с высокой гидрофобностью.

6) Практические рекомендации для изготовления водород аккумулирующих механосинтезированных материалов. Будут созданы электродные материалы с использованием механосинтезированных наноразмерных материалов состава Fe-Ni, Fe-WC, с повышенным перенапряжением электрохимического выделения водорода. Будет определена электрокаталитическая активность полученных материалов на примере модельных реакций.