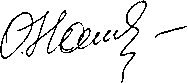
Назаренко Ольга Брониславовна. Процессы получения нанодисперсных тугоплавких неметаллических соединений и металлов методом электрического взрыва проводников : диссертация ... доктора технических наук : 05.17.08, 05.17.11.- Томск, 2006.- 289 с.: ил. РГБ ОД, 71 07-5/186

Томский политехнический университет

На правах рукописи



НАЗАРЕНКО ОЛЬГА БРОНИСЛАВОВНА

ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ТУГОПЛАВКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

специальность 05.17.

аты химических технологии, [Лавких неметаллических

*То*

Научный консультант д.ф.-м.н., профессор ИЛЬИН А.П.

Р°ССИИ

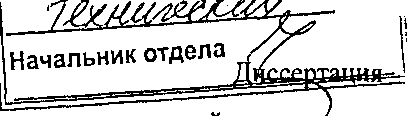


Г^технЬлогия силикатные

**(решение от *f1.. ~***

**решил выдать дипл<щ-й$** н \_. . \_ „.,, наук

на соискание ученой степени доктора технических наук



Томск - 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Список используемых сокращений ВВЕДЕНИЕ**

**Методы получения и свойства веществ в нанодисперсном состоянии**

1. Параметры структуры и свойства нанопорошков
2. Традиционные методы получения нанопорошков
3. Электрический взрыв проводников как способ получения нанопорошков
4. Развитие исследований явления электрического взрыва проводников
5. Общее описание явления электрического взрыва проводников
6. Особенности физико-химических свойств нанопорошков, полученных с помощью электрического взрыва проводников
7. Реализованные возможности управления свойствами нанопорошков при электрическом взрыве проводников
8. Постановка задач исследований

**Основные закономерности формирования дисперсного и фазового состава продуктов электрического взрыва проводников**

1. Влияние энергетических характеристик взрыва на дисперсность нанопорошков
2. Методики экспериментов по получению нанопорошков при электрическом взрыве проводников и исследованию их свойств

з

1. Зависимость дисперсности нанопорошков от введенной в проводник энергии
2. Влияние скорости ввода энергии на дисперсность электровзрывных нанопорошков
3. Влияние дуговой стадии
4. Зависимость дисперсности нанопорошков от природы газа- среды и добавок химически реагирующих газов
5. Исследование влияния дефектности структуры материала проводника на однородность нагрева и дисперсность продуктов электрического взрыва
6. Особенности фазового состава нанопорошков металлов
7. Дисперсность и фазовый состав продуктов электрического взрыва проводников из сплавов, синтез интерметаллидов
8. Выводы по главе 2

**Состав и характеристики нанопорошков оксидов и гидроксидов, синтезируемых при электрическом взрыве проводников в кислородсодержащих средах**

1. Получение нанопорошков оксидов металлов при электрическом взрыве проводников в инертном газе с добавками воздуха
2. Состав оксидно-гидроксидного слоя на частицах электровзрывных нанопорошков алюминия
3. Получение нанопорошков оксидов меди при электрическом взрыве проводников в инертном газе с добавками воздуха
4. Состав нанопорошков, полученных при электрическом взрыве различных металлов в воде
5. Состав продуктов электрического взрыва алюминиевых проводников в жидкой воде
6. Особенности химического состава продуктов электрического взрыва металлов, имеющих несколько степеней окисления
7. Особенности фазового состава продуктов электрического взрыва алюминиевых проводников во льду
   1. Применение продуктов электрического взрыва проводников для очистки воды
   2. Выводы по главе 3
8. **Синтез нанопорошков карбидов при электрическом взрыве проводников в углеродсодержащих средах**
   1. Фазовый и химический состав продуктов электрического взрыва проводников в газообразных углеводородах
   2. Особенности синтеза карбидов при электрическом взрыве проводников в конденсированных углеводородах
      1. Свойства нанопорошков карбидов вольфрама, полученных при электрическом взрыве проводников в декане
      2. Образование карбида титана при электрическом взрыве проводников *в* декане
      3. Продукты электрического взрыва алюминиевых проводников в декане
   3. Влияние химического состава углеводородов на характеристики нанопорошков карбидов металлов
   4. Улучшение триботехнических характеристик смазочных материалов продуктами электрического взрыва медных проводников
   5. Выводы по главе 4
9. **Физико-химические основы формирования свойств**

нанопорошков при электрическом взрыве проводников 195

* 1. Анализ физических моделей электрического взрыва проводников 196
  2. Физические процессы, протекающие при взаимодействии

энергии высокой плотности мощности с металлами 204

* + 1. Структурно-энергетические процессы на стадиях ввода энергии и релаксации первичных продуктов диспергирования металла 205
    2. Динамика формирования частиц нанопорошков металлов при электрическом взрыве проводников в

инертных газовых средах 211

* 1. Термодинамический анализ химических реакций при электрическом взрыве проводников 217
  2. Выводы по главе 5 226

1. **Разработка электровзрывного модуля для снижения**

**агломерации нанопорошков и разделения их на фракции 228**

* 1. Проблема агломерации нанопорошков при их получении и характеристика установки УДП-4Г 229
  2. Анализ процесса расширения продуктов взрыва и движения

частиц 232

* 1. Конструктивные особенности установки УДП-5 236
  2. Выводы по главе 6 242

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 243

275

ЛИТЕРАТУРА 252

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Список используемых сокращений**

НП - нанопорошок

ЭВП - электрический взрыв проводников

ЭВ - электрический взрыв

ЭВ-технология - электровзрывная технология

УДС - ультрадисперсные системы

*е -* удельная введенная в проводник энергия

*ес -* энергия сублимации материала проводника

*е/ес -* удельное энергосодержание

*еа -* энергия дуговой стадии

*ас* - среднеповерхностный диаметр частиц

*ао* - среднечисленный диаметр частиц

5УД - площадь удельной поверхности

*dm -* диаметр взрываемого проводника

*I -* длина взрываемого проводника

*L -* индуктивность разрядного контура

С - емкость конденсаторной батареи

*і -* ток, протекающий через проводник

*Uo -* зарядное напряжение

*Р -* давление во взрывной камере

*j -* плотность электрического тока

ДТА - дифференциальный термический анализ

ТГ - термогравиметрия

ДТГ - дифференциальная термогравиметрия

ГЦК - гранецентрированная кубическая решетка

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существенное улучшение характеристик материалов и изделий, значительный рост качества продукции и повышение производительности технологических процессов могут быть достигнуты при использовании нанопорошков (НП). Малый размер частиц НП обуславливает их особые электрические, теплофизические, магнитные и другие свойства, благодаря которым НП имеют перспективу все большего применения в различных производственных процессах, и можно без преувеличения сказать, что нанодисперсные материалы в ближайшее будущее будут определять судьбу технического прогресса [1].

НП получают различными методами. Одним из перспективных методов получения НП является электрический взрыв проводников (ЭВП), позволяющий управлять дисперсным составом, физическими, химическими и другими свойствами получаемых порошков. ЭВП позволяет получать НП металлов и сплавов, химических соединений (оксидов, нитридов, карбидов и др.), а также НП, содержащие аморфные и кристаллические метастабильные фазы.

Электрический взрыв проводников - это неравновесный процесс, при котором под действием импульсного электрического тока проводник диспергируется и продукты взрыва перемешиваются с окружающей средой [2]. Таким образом, по своей природе ЭВП как метод получения нанопорошков сочетает в себе признаки диспергационных методов - проводник разрушается под действием электрического тока, и методов испарения-конденсации - значительная часть материала проводника в процессе электровзрыва переходит сначала в газообразное состояние.

Важным достоинством электровзрывной (ЭВ) технологии является простота регулирования свойств конечных продуктов электровзрыва - дисперсного, фазового и химического состава нанопорошков и других характеристик с помощью электрических параметров. При этом ЭВ- технология характеризуется низкими энергозатратами - менее 10 кВт-час/кг. Очень низкие затраты энергии обусловлены прямым нагревом проводника электрическим током без участия теплоносителей и высокой скоростью

*п*

нагрева (более 10 К/с), обеспечивающей практически адиабатические условия передачи энергии проводнику. ЭВ-технология характеризуется достаточно высокой производительностью - до 50 г/час по алюминию и до 300 г/час по вольфраму. Тугоплавкость металлов не является препятствием при получении нанопорошков. Достоинством ЭВ-технологии является ее универсальность при получении различных по природе нанопорошков. Если при ЭВП в среде инертных газов или водорода получаются НП металлов, сплавов, интерметаллидов, то в среде химически активных газов образуются НП химических соединений металлов с неметаллами (оксиды, нитриды, карбиды и др.).

Электровзрывные НП обладают рядом преимуществ в сравнении с НП, полученными другими способами: частицы устойчивы к окислению и спеканию при комнатной температуре, при нагревании характеризуются высокой химической и диффузионной активностью, что связано с особым метастабильным состоянием частиц, с возможностью их саморазогрева в узкой локализованной зоне взаимодействия [3,4].

Исследования ЭВП как метода получения НП в течение многих лет проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. В начале 70-х годов XX века сотрудник кафедры проф. Мельникова М.А. Томского политехнического института Иванов Г.В. предложил использовать электрический взрыв проволок для распыления металлов и получения нанодисперсных порошков. Позже под руководством Яворовского Н.А. в НИИ высоких напряжений (НИИ ВН) была создана технология получения электровзрывных НП, проведены начальные исследования их свойств. С начала 80-х годов в НИИ ВН накоплен значительный экспериментальный материал, результаты исследований были обобщены в ряде диссертационных работ: Вишневецкого И.И. [5], Яворовского Н.А. [6], Давыдовича В. [7], Лернера М.И. [8], Ляшко А.П. [9], Проскуровской Л.Т. [10], Ана В.В. [11], Тихонова Д.В. [12], Громова А.А. [13]. В этих работах удалось установить корреляционные зависимости, связывающие исходные условия получения с некоторыми характеристиками порошков. При пиролизе углеводородных жидкостей с помощью ЭВП Вишневецкий И.И. получал карбиды металлов [5], но в его работе была показана лишь принципиальная возможность их синтеза, количественные оценки и данные о составе и свойствах твердых продуктов электровзрыва отсутствуют. Яворовским Н.А. [6] установлено бимодальное распределение частиц по размерам, показано, что при ЭВП частицы формируются как за счет конденсации испарившейся части проводника, так и за счет диспергирования жидкого металла, а соотношение этих компонент определяется величиной введенной в проводник энергии. Давыдовичем В.И. исследована зависимость физико-химических свойств НП металлов с низкой электропроводностью (железа и вольфрама) от условий взрыва проводников [7]. Было установлено, что НП железа и вольфрама могут содержать различные полиморфные модификации. Лернером М.И. проводилось изучение дисперсности и строения порошков меди и алюминия в зависимости от параметров ЭВП и вида газовой среды [8]. Установлено, что при введении небольшого количества химически активного газа в инертный газ размер образующихся частиц уменьшается. Показано, что длительность процесса коагуляции пропорциональна начальному диаметру проводника </вп, а, следовательно, параметром регулирования дисперсности порошков может служить и диаметр взрываемого проводника. Исследованы условия получения порошков химических соединений - оксида и нитрида алюминия. Тихонов Д.В. [12] исследовал закономерности получения порошков сложного фазового состава при ЭВП чистых металлов (вольфрама, титана, меди), сплавов (латуни, свинцово-оловянного), совместном взрыве проводников из разных металлов в инертных газах, а также при ЭВП в углерод- и кислородсодержащих газовых средах. В работах Ляшко А.П. [9],

Проскуровской JI.T. [10], Ана В.В. [11], Громова А.А. [13] изучены физико­химические свойства НП, микроструктурные и субструктурные характеристики частиц НП, а также особенности их взаимодействия с азотом, кислородом, водой.

Работы по получению и исследованию свойств электровзрывных НП проводятся и в других научных организациях. Седой B.C. (ИСЭ СО РАН, г. Томск) показал, что при пониженном давлении газовой среды во взрывной камере можно получать высокодисперсные порошки металлов [14, 15]. Группа исследователей под руководством Котова Ю.А. (Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург) получает порошки оксидов металлов в газах при низких введенных энергиях [16].

К настоящему времени уровень разработки метода ЭВП достиг опытно-промышленного производства, в то же время исследования были направлены на получение преимущественно НП металлов при ЭВП в химически инертных газовых средах. В большинстве работ была показана лишь принципиальная возможность синтеза химических соединений, отсутствовали количественные оценки и данные о составе и свойствах многих продуктов электровзрыва. Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования ЭВП, отсутствует полная ясность как в механизме диспергирования металлических проводников, так и в механизме формирования конечных продуктов при ЭВП в химически активных средах. Данные о неравновесности процессов являются основанием для разработки принципиально нового механизма электрического взрыва. Не решена в настоящее время и является актуальной проблема агломерации наночастиц. Экспериментальные данные указывают на то, что для получения неагломерированного НП узкого фракционного состава необходимо внести изменения в конструкцию установки.

Таким образом, для дальнейшего развития технологии необходимо провести исследования, направленные на изучение процессов формирования НП тугоплавких неметаллических соединений при ЭВП в химически активных средах и на повышение качества порошков - получение неагломерированных нанопорошков узкого фракционного состава.

Цель работы - разработка научных основ электровзрывной технологии тугоплавких неметаллических и металлических нанопорошков и совершенствование ее аппаратурного обеспечения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ факторов, оказывающих влияние на дисперсный и фазовый состав продуктов электрического взрыва проводников.
2. Установление зависимостей изменения фазового и химического состава, дисперсности нанопорошков оксидов металлов при электрическом взрыве проводников в кислородсодержащих средах от энергетических характеристик взрыва, от состава и плотности окружающей среды.
3. Установление зависимостей свойств нанопорошков тугоплавких карбидов металлов от энергетических характеристик взрыва, от состава и плотности окружающей среды, выявление условий получения карбидов металлов с возможно максимальным содержанием в них углерода.
4. Изучение термодинамических закономерностей формирования химических соединений (оксидов, карбидов, нитридов) при электрическом взрыве проводников в химически активных средах.
5. Разработка феноменологической модели формирования наночастиц в результате воздействия импульса тока высокой плотности на металлы, учитывающей последовательные стадии ввода электрической энергии в проводник, нагрева, диспергирования металла, взаимодействия продуктов взрыва и их охлаждения.
6. Разработка технического решения и конструкции электровзрывного модуля для снижения степени агломерации нанопорошков и разделения их на фракции.
7. Исследование технологических процессов с применением электровзрывных нанопорошков.

Диссертационная работа выполнена по тематике госбюджетных исследований, проводившихся по плану научно-исследовательских работ НИИ высоких напряжений (1993-2005 г.г.), гранта МО РФ № 01.99.0011724 (1999-2004 г.г.), гранта РФФИ № 01-02-17948 (2001-2002 г.г.), в рамках межвузовской подпрограммы «Исследование, производство и применение ультрадисперсных сред в программе ГКВШ РФ «Перспектива» (1993-1996 г.г.), программы совместных работ Томского политехнического университета и Ульсанского университета (Корея) (2002-2005 г.г.), программы «Развитие нанотехнологий», выполняемой НИИ высоких напряжений и Далянским техническим университетом (Китай) (2001-2005 г.г.), хоздоговорных работ, программы Правительства РФ «Полимеры России», раздел «Наполненные нанопорошками полимеры» (2006 г.).

**Научная новизна**

1. Установлено, что состав и выход конечных продуктов электрического взрыва проводников в химически активных средах - карбидов, оксидов, нитридов металлов - определяется характером изменения энергии Гиббса, разностью между значениями верхней температурной границы устойчивости получаемого химического соединения и нижней температурной границы, при которой реакция прекращается, и временем взаимодействия продуктов диспергирования с компонентами окружающей среды.
2. Установлены корреляционные зависимости дисперсного, фазового и химического состава нанопорошков W, W2C, WC, Mo, Al, А1203, AI4C3, Си, CU2O, СиО, ТІС от энергетических характеристик (введенной в проводник энергии, скорости ее ввода, энергии дуговой стадии) и от состава окружающей среды (специально подобранных смесей ацетилена или пропана с аргоном и конденсированных углеводородов при получении нанопорошков карбидов металлов, смесей аргона с кислородом и конденсированной воды - при получении нанопорошков оксидов металлов, смесей аргона с малыми добавками химически активных газов - при получении нанопорошков металлов).
3. Установлено, что плотность и динамическая вязкость окружающей проводник при взрыве среды являются параметрами, влияющими на дисперсный, фазовый и химический состав продуктов электрического взрыва проводников: с повышением плотности (динамической вязкости) среды выход тугоплавких соединений и стабилизация их высокотемпературных фаз возрастает, а дисперсность порошков уменьшается.
4. Обнаружена особенность воды как окислительно­восстановительной системы в условиях электрического взрыва проводников: образование низших оксидов (FeO, Ті203, у-Тіз05, Ti407, Cu20) при электрическом взрыве проводников из металлов, имеющих несколько степеней окисления, что объясняется участием водорода в стабилизации промежуточных состояний оксидов.
5. Предложена феноменологическая модель формирования частиц

*п*

нанопорошков под действием импульса тока большой плотности *(j >* 10 А/см), учитывающая неравновесность процессов как на стадии ввода энергии, так и на стадии релаксации энергонасыщенных состояний. Показано, что при увеличении скорости ввода энергии (плотности мощности) усиливается роль энергетически менее выгодных (более энергоемких) каналов диссипации энергии (ионизация, образование новых поверхностей с разрывом химических связей).

1. Установлено и объяснено с использованием модели формирования наночастиц наличие трех максимумов на кривой распределения частиц порошков по диаметру: наиболее мелкая фракция (с максимумом -0,1 мкм) образуется за счет конденсации газоподобной фазы продуктов электрического взрыва на зародышах (ионах), средняя фракция (-1-10 мкм) - за счет конденсации газоподобной фазы на поверхность жидких частиц и крупная фракция (-20-100 мкм) - за счет концевых эффектов: взрыва концов проводников при более низкой напряженности электрического поля.

**Практическая ценность работы**

1. Разработана и внедрена технология получения нанодисперсных порошков оксидов, карбидов, нитридов. Опытные партии нанопорошков у- AI2O3 поставлены в Институт нанотехнологий (Германия), нитрида алюминия, карбида вольфрама - в МИФИ, нанопорошков меди, железа, алюминия - в Далянский университет (КНР), Ульсанский университет (Республика Корея), фирму “SNPE - энергетические материалы” (Франция) и другие организации.
2. Разработана конструкция электровзрывного модуля для повышения качества нанопорошков с учетом динамики процессов формирования наночастиц: для снижения агломерации нанопорошков и разделения частиц в потоке на фракции.
3. Определены технологические параметры процессов электровзрывного синтеза нанодисперсных порошков тугоплавких соединений и металлов, при которых получаются продукты с высокой дисперсностью.
4. Предложено для повышения выхода химических соединений (карбидов вольфрама, титана, алюминия) осуществлять электрический взрыв проводников в конденсированных средах. Повышение плотности или динамической вязкости среды позволяет получать, например, стехиометрический карбид вольфрама WC и а-А1203.
5. Разработан препарат «СТАРТ-2М», являющийся антифрикционным модификатором поверхностей трения, на основе результатов исследований электрического взрыва проводников в жидких углеводородах, на который составлены ТУ 25714-003-02070235-96.

**Автор защищает**

1. Совокупность научных положений, закономерностей и механизмов формирования нанодисперсных тугоплавких химических соединений и металлов в условиях электрического взрыва проводников: термодинамические закономерности процесса формирования химических соединений, закономерности влияния свойств окружающей среды (плотности - динамической вязкости, малых добавок химически активного газа, особенности воды как окислительно-восстановительной среды) и энергетических характеристик на свойства электровзрывных нанопорошков.
2. Установленные зависимости между технологическими параметрами (электрическими, геометрическими и параметрами окружающей среды) получения нанопорошков тугоплавких химических соединений и металлов и их свойствами (дисперсностью, распределением частиц по размерам, фазовым и химическим составом).
3. Феноменологическую модель формирования наночастиц порошков под действием импульса тока высокой плотности, учитывающую неравновесность процессов как на стадии ввода энергии, так и на стадии релаксации энергонасыщенных состояний.
4. Технологические решения, направленные на повышение качества нанопорошков и на их применение.

**Реализация результатов работы**

1. Рекомендации, разработанные на основе результатов работы, реализованы на практике при наработке опытных образцов нанопорошков оксидов и карбидов металлов **(у-А120з,** WC, ТІС) в опытном производстве НИИ высоких напряжений.
2. Результаты работы использованы для получения нанопорошков металлов (W, А1, Ті) и химических соединений (WC, W2C, AI4C3, AIN, ТІС) при выполнении контракта №14-7/03 «Фундаментальные исследования и изучение характеристик нанопорошков, полученных с помощью электрического взрыва проводников», проводимого в рамках Программы совместных работ НИИ высоких напряжений при ТПУ и Ульсанского университета (Корея).
3. Материалы работы используются при изучении теоретической части и при проведении лабораторных работ по курсу «Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов», а также в дипломном проектировании студентами специальности - техника и электрофизика высоких напряжений Томского политехнического университета.

Личный вклад автора. Диссертация является обобщением исследований автора, выполненных в НИИ *высоких* напряжений при ТПУ в период с 1993 г. по настоящее время. Автор внес определяющий вклад в постановку задач, выбор направлений и методов исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. По существу содержания работы на различных этапах ее выполнения автору была оказана помощь н.с., к.т.н. Тихоновым Д.В. при проведении экспериментов по ЭВП в газовых средах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, а также списка цитируемой литературы из 223 наименования. Работа изложена на 273 страницах, содержит 78 рисунков, 32 таблицы и приложение с документами, подтверждающими практическую значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области получения нанодисперсных порошков металлов и химических соединений и изучения их свойств. Выполнен обзор способов получения НП, рассмотрены их преимущества и недостатки. Рассмотрены основные результаты ранее выполненных работ по получению электровзрывных НП. Показано, что возможности электровзрывного метода по регулированию свойств порошков еще не полностью изучены. Недостаточность данных по механизму диспергирования металлических проводников и образования первичных продуктов ЭВП, закономерностям формирования конечных продуктов при ЭВП в химически активных средах вызывает необходимость проведения исследований, направленных на поиск исходных условий ЭВП для получения НП с высокой дисперсностью и узким распределением частиц по размерам, заданного фазового и химического состава. Обоснованы цель работы и основные задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены основные закономерности формирования фазового и дисперсного состава продуктов ЭВП. При анализе факторов, оказывающих влияние на дисперсность и фазовый состав нанопорошков, рассмотрены продукты ЭВП в инертных газовых средах - нанопорошки металлов, так как при ЭВП в химически активных средах протекающие химические реакции оказывают влияние на дисперсность образующихся частиц. Уточнены представления о значимости энергетических характеристик взрыва (введенной в проводник энергии, скорости ввода энергии, дуговой стадии), природы газа-среды и добавок химически реагирующих газов на дисперсность НП. Рассмотрено влияние дефектности структуры материала проводника на однородность нагрева при протекании мощного импульсного тока и дисперсность продуктов взрыва. Рассмотрены особенности фазового состава нанопорошков, условия получения НП интерметаллидов при ЭВП.

В третьей главе рассмотрены состав и характеристики нанопорошков, полученных при электрическом взрыве проводников в кислородсодержащих средах - оксидов и гидроксидов металлов. Исследован фазовый и химический состав нанопорошков, получаемых при электровзрыве медных проводников в инертном газе с добавками воздуха. Исследован фазовый, химический и дисперсный состав порошков, получаемых при электровзрыве алюминиевых проводников в воде в зависимости от введенной энергии, наличия дуговой стадии, расположения проводника относительно поверхности жидкости, от агрегатного состояния окружающей среды (вода, лед). Рассмотрены особенности окислительно-восстановительных свойств системы металл-вода на примере электровзрыва проводников из металлов, имеющих несколько степеней окисления. Показаны возможности использования явления ЭВП и электровзрывных НП для очистки воды.

Четвертая глава посвящена изучению влияния условий получения на свойства нанодисперсных карбидов металлов - продуктов ЭВП в углеродсодержащих средах. Исследован фазовый, химический и дисперсный состав нанопорошков, получаемых при электровзрыве вольфрамовых, титановых, алюминиевых проводников в газообразных и конденсированных углеводородах в зависимости от энергетических характеристик взрыва и свойств окружающей среды. Рассмотрено влияние химического состава углеводородов на свойства НП карбидов. Даны рекомендации по улучшению триботехнических характеристик смазочных материалов.

Пятая глава посвящена разработке физико-химических основ формирования свойств нанопорошков при электрическом взрыве проводников. На основе анализа существующих представлений об изменении физического состояния металлов в процессе ЭВП сделан вывод, что все они основаны на квазиравновновесности или равновесности процессов. Предложен принципиально новый подход, учитывающий протекание неравновесных процессов и новых каналов диссипации энергии. Явление ЭВП рассмотрено с позиций изменения энергетического и структурного состояния металла на стадиях ввода энергии и релаксации первичных продуктов диспергирования металла. Рассмотрена динамика формирования частиц при ЭВП в инертных газовых средах, на основе чего объяснено наличие трех максимумов на кривой распределения частиц нанопорошков по диаметру. Проведен термодинамический анализ химических реакций при ЭВП в химически реакционных средах.

В шестой главе представлены результаты конструктивных решений, направленных на решение проблемы агломерации нанопорошков в условиях электрического взрыва проводников. Рассмотрены недостатки существующих опытно-промышленных установок для получения НП методом ЭВП. Предложена конструкция установки, позволяющая снизить размеры агломератов более чем на порядок (с 60-100 до 2 мкм) и предусматривающая разделение продуктов электровзрыва на две и более фракций, что дает дополнительную возможность в получении нанопорошков с узким распределением частиц по размерам.

Завершается работа заключением, в котором сформулированы содержащиеся в ней выводы и предложения.

В приложение включены вспомогательные материалы и документы, подтверждающие практическую значимость полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 26 Международных, 8 Всероссийских и 6 региональных конференциях, семинарах и совещаниях, в том числе на 40-ом и 43-ем Международных научных коллоквиумах (Германия, г. Ильменау, 1995 и 1998 г.г.); II международной научно-практической конференции «СИБРЕСУРС-2-96» (Новосибирск, 1996 г.); 1-ой и 2-ой Межрегиональных научно-технических конференциях с международным участием «УДП, материалы и наноструктуры» (Красноярск, 1996 и 1999 г.г.); Международных Корейско-Российских научных симпозиумах по науке и технологиям KORUS (1997-1999, 2001, 2003-2005 г.г.); IV научно-технической конференции стран СНГ «Процессы и оборудование экологических производств» (Волгоград, 1998 г.); Международных научно-технических конференциях «Физико­химические процессы в неорганических материалах» (Кемерово, 1998 и 2004 г.г.); XIV Международной конференции по химическим реакторам «ХИМРЕАКТОР-14» (Томск, 1998 г.); IV, V, VI Всероссийских научно­технических конференциях «Физикохимия ультрадисперсных систем» (Обнинск, 1998 г., Екатеринбург, 2000 г., Томск, 2002 г., Ершово, 2005 г.); V Российско-Китайском Международном симпозиуме по передовым материалам и процессам (Байкальск, 1999 г.); Межрегиональной научно­технической конференции «Высокоэнергетические процессы и наноструктуры» (Красноярск, 2001 г.); Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной энергетики и

th

промышленности (производство, наука, образование)» (Томск, 2004 г.), 20 Международной конференции «Heat Treatment» (Чехия, 2004 г.) и др.

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 86 работах, включая 1 монографию. Разработки по теме диссертации защищены 5 патентами РФ.

Основные результаты диссертационных исследований изложены в следующих работах:

1. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / Под ред. А.П. Ильина. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. -148 с.
2. Патент РФ № 2078434. Способ получения гидроксида алюминия / Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. Опубл. 27.04.97, бюл. № 12.
3. Патент РФ № 2078045. Способ получения порошка оксида алюминия / Назаренко О.Б., Ильин А.П., Краснятов Ю.А. Опубл. 27.04.97, бюл. № 12.
4. Патент РФ № 2079396. Способ получения высокодисперсных порошков соединений металлов с неметаллами / Назаренко О.Б., Ильин А.П. Опубл. 20.05.97, бюл. № 14.
5. Патент РФ № 2102337. Способ очистки воды от газов, ионов металлов и органических соединений / Назаренко О.Б., Ильин А.П., Краснятов Ю.А. и др. Опубл. 20.01.98, бюл. № 2.
6. Патент РФ № 2247631. Установка для получения порошков металлов, сплавов и химических соединений электрическим взрывом проволоки / Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Приор. 05.11.2003. Опубл. 10.03.2005, бюл. № 7.
7. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. Формирование химических соединений при электрическом взрыве металлических проводников в жидкостях // Известия вузов. Физика. - 1996. - № 6. - С. 9-14.
8. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. и др. Получение высокотемпературной модификации у-А^Оз с помощью электрического взрыва проводников в воде // Журнал технической физики. - 1996. - Т. 66, №
9. -С. 131-133.
10. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Ушаков В.Я. Структурно-энергетические процессы при электрическом взрыве проводников // Известия вузов. Физика. - 2002. -№ 12. - С.31-34; Ilyin А.Р.,

Nazarenko O.B., Tikhonov D.V., Ushakov V.Ya., Yablunovskii G.V. Structural and energy processes in electrically exploded conductors // Russian Physics Journal. - 2002. - V. 45, # 12. - P. 1175-1180.

1. Назаренко О.Б., Ильин А.П. Получение нанопорошков карбидов и нитридов металлов при электрическом взрыве проводников в жидких углеводородах // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 2. - С. 85-87.
2. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. Регулирование дисперсного состава электровзрывных порошков оксида алюминия // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - №3. - С.57-59.
3. Назаренко О.Б. Влияние условий синтеза на свойства электровзрывных нанопорошков карбидов металлов // Известия Томского политехнического университета. - 2003. - Т. 306, № 6. - С. 62-66.
4. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Рихерт С В. Влияние суспензии «моторное масло+смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь - низколегированная сталь»» // Известия Томского политехнического университета. - 2004. - Т. 307, № 3. - С. 77-79.
5. Y.S. Kwon, J.S. Kim, Н.Т. Kim, Н.К. Lee, О.В. Nazarenko, А.Р. Ilyin. Preparation of nano metal carbide powders by electric explosion of conductors in liquid hydrocarbons // Journal of Industrial Engineering Chemistry. - 2004. - Vol. 10, No. 6. - P. 949-953.
6. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение нанопорошков вольфрама методом электрического взрыва проводников // Известия Томского политехнического университета. - 2005. - Т. 308,№ 4.-С. 68-70.
7. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение и свойства электровзрывных нанопорошков сплавов и интерметаллидов // Известия Томского политехнического университета. - 2005.-Т. 308,№ 4.- С. 71-74.
8. Назаренко О.Б. Электровзрывная технология получения нанопорошков тугоплавких неметаллических материалов // Стекло и керамика. - 2005. - № 11. - С. 26-29.
9. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Получение

нанопорошков распылением металлов мощными импульсами электрического тока // Горный журнал. Цветные металлы. Спец. выпуск. - 2006. - № 4. - С. 65-69.

1. Назаренко О.Б., Ушаков В.Я., Ильин А.П. и др. Применение электрического взрыва проводников для очистки воды // Очистка воды и стоков: Сб. научн. тр. - Томск, 1994. - С. 52-57.
2. Назаренко О.Б., Ильин А.П. Модифицирование минеральных масел электрическим взрывом проводников // Высоковольтные техника и электротехнологии: Межвуз.сб. науч.тр., вып.1. - Иваново, 1997. - С. 71-73.
3. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Шубин Б.Г. Перспективы

применения электрического взрыва проводников для очистки сточных вод // Высоковольтные техника и электротехнология: Межвуз. сб. науч. тр., вып.2. - Иваново, 1999. - С. 49-50.

1. Ushakov V.Ya., Ilyin А.Р., Nazarenko O.B. et al. Ultrafine powders produced with wires electrical explosion (Production and properties) // KORUS’97. Proc. of the 1 Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology.-Ulsan, 1997.- P. 167-171.
2. Ilyin A.P., Khabas T.A., Nazarenko O.B., Tikhonov D.V. The

perspectives of the ultrafine powders usage in machine building // KORUS’98:

Proc. of the 2d Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, 1998.- P.353-355.

1. Ushakov V.Ya., Ilyin A.P., Nazarenko O.B., Tikhonov D.V. Methods of dispersion, phase and chemical composition of wires electrical explosion products regulation // Proc. of 43rd Int. Sc. Colloquium. - Ilmenau, Germany, 1998.- P.797-799.
2. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Физические основы диспергирования металлов с помощью импульсов электрического тока // УДП, наноструктуры и материалы: Тр. 2-ой межрегион. конф. с междунар. участием. - Красноярск, 1999. - С. 33-34.
3. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Ушаков В.Я. Возможности и перспективы развития электровзрывного метода получения порошков // Физикохимия ультрадисперсных систем: Тр. V Всеросс. конф. - Москва, 2000. - С. 77-79.
4. Nazarenko О., Tikhonov D., Ilyin A., Ushakov V. Environment density or dynamic viscosity as parameter of regulation of composition of wire electrical explosion products // KORUS’2001: Proc. of the 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, 2001. - V. 1. - P. 358-360.
5. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B.,

Yablunovskii G.V. Current status and future development of the electroexplosive technology // KORUS’2003: Proc. of the 7th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Ulsan, 2003. - V.l. - P. 175-178.

1. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B.,

Yablunovskii G.V. Mechanism of metal destruction and formation of particles in electrical explosion of wires // KORUS’2003: Proc. of the 7th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Ulsan, 2003. - V. 1. - P. 217-220.

1. Назаренко О.Б. Регулирование характеристик электровзрывных ультрадисперсных порошков // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Тр. VI Всеросс. (междунар.) конф. - М.: МИФИ, 2003. - С. 395.
2. Назаренко О.Б., Астанкова А.В. Об использовании электровзрывных ультрадисперсных порошков для очистки жидкостей от примесей // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Тр. 9-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2003. - С. 75 - 78.
3. Ильин А.П., Назаренко О.Б. Обработка углеводородных

жидкостей электрическим разрядом // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Тр. 9-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ,

1. -С. 78-80.
2. Amelkovich Yu.A., Nazarenko О.В. Application of electroexplosive nanopowders for water purification // KORUS’2004: Proc. of the 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, 2004. - V.l. - P. 195-197.
3. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B. Installation “UDP-5” for nanopowders production by wire electrical explosion // KORUS’2004: Proc. of the 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, 2004. - V. 1. - P. 227-229.
4. Назаренко О.Б. Получение нанопорошков оксида алюминия

методом электрического взрыва проводников // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Тр. 10-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск, Изд-во ТПУ, 2004. - С. 383-386.

1. Назаренко О.Б. О влиянии микроструктуры проводника на

процесс его нагрева до плавления // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Тр. 10-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск, Изд-во ТПУ,

1. -С. 386-389.
2. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Tikhonov D.V., Grigoriev A.N., Nazarenko

O.B. Metal heat treatment by short impulse of electrical current // Proc. of 20th

Intern. Conf. on Heat Treatment. - Czechia, Jihlava, 2004. - P. 175-176.

1. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Grigoriev A.N., Nazarenko

O.B. Electrical explosion as a metal treatment by electrical current of high power// Proc. of 20th Intern. Conf. on Heat Treatment. - Czechia, Jihlava, 2004. - P. 419­422.

1. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Nazarenko O.B. Electric Explosion of Wires in Multicomponent Reactionary Liquid Ambiences as Method for Producing Nanopowder of Complex Composition // KORUS’2005: Proc. of the 9th Korea- Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Novosibirsk, 2005. - P. 211­213.

На основании проведенных в диссертационной работе исследований предлагаются следующие выводы:

1. Основной закономерностью процессов формирования наночастиц тугоплавких неметаллических материалов при электрическом взрыве проводников является последовательность физических стадий воздействия на металл энергии высокой плотности мощности, приводящего к формированию первичных продуктов электрического взрыва - жидких капель, пара и ионов, и их охлаждения до 4000-5000 К, необходимого для протекания химических реакций. Введенная в проводник энергия и скорость ее ввода в конечном итоге определяют характеристики нанопорошков, а их химический и фазовый состав определяется свойствами среды, окружающей проводник при взрыве.
2. На выход химических соединений в конечных продуктах электрического взрыва проводников существенное влияние оказывает верхняя граница их температурной устойчивости и время взаимодействия продуктов диспергирования с компонентами окружающей среды: например, в продуктах взрыва наблюдается повышенное содержание карбидных фаз металлов, устойчивых до более высоких температур. При электрическом взрыве проводников в многокомпонентных реакционных средах возможно получение нанопорошков сложного фазового и химического состава при условии близких величин верхней температурной границы устойчивости химических соединений. В случае различия этих величин образуется преимущественно продукт, устойчивый до более высоких температур.
3. При увеличении величины вводимой в проводник энергии растет дисперсность продуктов, повышается выход химических соединений и снижается доля остаточных металлов. При переходе от газообразных углеводородов к жидким углеводородам в составе продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников наблюдается уменьшение содержания остаточного металла и низшего карбида W2C, а конечным продуктов взрыва вольфрамовых проводников в парафине является монокарбид WC.

Повышение плотности среды, окружающей проводник при взрыве, способствует насыщению углеродом конечных продуктов.

1. Химический состав индивидуальных углеводородов влияет на фазовый состав нанопорошков, образующихся при электрическом взрыве в углеводородах. **С** ростом соотношения **С/Н** и повышением плотности углеводорода увеличивается выход карбида вольфрама WCi.x, а содержание в продуктах остаточного металла снижается.
2. Регулирование условий электрического взрыва проводников позволяет осуществить целенаправленный синтез оксидов алюминия различной кристаллической структуры - от гидроксида алюминия **А1(ОН)з** при электрическом взрыве алюминиевых проводников в жидкой воде при *е/ес* **< 1,0** и низкотемпературного оксида алюминия **у-А120з** при *е!ес* > 1,0до высокотемпературной модификации **у-А1203** и **а-А120з** при электрическом взрыве проводников во льду.
3. Особенностью воды как окислительно-восстановительной системы является образование низших оксидов при электрическом взрыве проводников из металлов, имеющих несколько степеней окисления, например, из железа, титана, меди, что объясняется накоплением водорода как продукта окисления.
4. Для получения порошков металлов высокой дисперсности интерес представляют небольшие (порядка одного процента и менее) добавки химически активного газа в рабочий газ. В случае электровзрыва медных проводников в среде аргона с добавлением воздуха порошки имели наибольшую дисперсность при содержании воздуха в аргоне 1-2 об.%: 5уд составила 10,5-11 м /г, что соответствует среднеповерхностному диаметру 60-65 нм.
5. При вводе электрической энергии наблюдается ее диссипация по различным каналам, причем при увеличении скорости ввода энергии (плотности мощности) усиливается роль энергетически менее выгодных каналов (ионизация, образование новых поверхностей с разрывом химических связей). Критерием неравновесности процессов, протекающих

8 9

при введении в металл энергии с высокой плотностью мощности (>10 -10 Вт/см3) при электрическом взрыве проводников, является отклонение от закона Джоуля-Ленца для любого интервала времени при действии импульса тока. При охлаждении продуктов диспергирования проводника, когда электрический ток уже не протекает, неравновесность проявляется в том, что полной релаксации в состоянии порошков не происходит, и часть энергии «замораживается» в виде запасенной энергии поверхности, внутренних дефектов, зарядовых состояний.

1. Кривая распределения частиц нанопорошков по диаметру характеризуется наличием трех максимумов, образующихся за счет конденсации газоподобной фазы на поверхность жидких капель, конденсации на зародышах из газоподобной фазы и за счет концевых эффектов: взрыве концов проводников при более низкой напряженности электрического поля. Это имеет принципиальное значение для оптимизации технологии и сертификации конечного продукта.
2. С помощью конструктивных изменений установки достигнуто снижение размеров агломератов электровзрывных нанопорошков более чем на порядок. Размер агломератов снижается до 2,3 мкм, а их содержание в порошке - до 6 %. В разработанной установке УДП-5 происходит разделение продуктов электровзрыва на две и более фракций, что дает дополнительную возможность в получении нанопорошков с узким распределением частиц по размерам.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность своему научному консультанту д.ф.-м.н, профессору Ильину А.П. и д.т.н. профессору Ушакову В.Я. за консультации, постоянное внимание и помощь в работе, а также признательность сотрудникам лаборатории № 14 НИИ ВН к.т.н., н.с. Тихонову Д.В., н.с. Яблуновскому Г.В. за помощь в проведении многочисленных экспериментов и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report / Edited by MJ.C. Roko, R.S. Williams and P. Alivisatos. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. - 2000.
2. Бурцев B.A., Калинин H.B., Лучинский A.B. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 289 с.
3. Ильин А.П. Особенности энергонасыщенной структуры малых металлических частиц, сформированных в сильнонеравновесных условиях // Физика и химия обработки материалов. - 1997. - № 4. - С. 93-97.
4. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. и др. Структурно­энергетические процессы при электрическом взрыве проводников // Известия вузов. Физика. - 2002. - № 12. - С. 31-34.
5. Вишневецкий И.И. Исследование разложения углеводородов в импульсных электрических разрядах: Дис. ...к.т.н. - Томск, 1974. - 237 с.
6. Яворовский Н.А. Электрический взрыв проводников - метод получения ультрадисперсных порошков: Дис. ...к.т.н. - Томск, 1982. - 127 с.
7. Давыдович В.И. Разработка технологического процесса и оборудования для электровзрывного получения порошков металлов с низкой электропроводностью: Дис. ...к.т.н. - Томск, 1986. - 254 с.
8. Лернер М.И. Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников: Дис. ...к.т.н. - Томск, 1988. - 155 с.
9. Ляшко А.П. Особенности взаимодействия с водой и структура субмикронных порошков алюминия: Дис. ...к.х.н. - Томск, 1988. - 178 с.
10. Проскуровская Л.Т. Физико-химические свойства электровзрывных ультрадисперсных порошков алюминия: Дис к.х.н. - Томск, 1988. -155 с.
11. Ан В.В. Применение нанопорошков алюминия при получении нитридсодержащих материалов: Дис. ...к.т.н. - Томск, 1999. - 160 с.
12. Тихонов Д.В. Электровзрывное получение ультрадисперсних порошков сложного состава: Дис. ...к.т.н. - Томск, 2000. - 237 с.
13. Громов А.А. Получение нитридсодержащих материалов при горении сверхтонких порошков алюминия и бора: Дис. ...к.т.н. - Томск, 2000. - 189 с.
14. Седой B.C., Валевич В.В. Получение высокодисперсных металлических порошков методом электрического взрыва в азоте пониженного давления // Письма в ЖТФ. - 1999. - Т. 25, № 4. - С. 81-84.
15. Седой B.C., Валевич В.В., Герасимова Н.Н. Синтез высокодисперсных порошков методом электрического взрыва в газе пониженного давления // Физика и химия обработки материалов. - 1999. -№ 4. - С. 92-95.
16. Котов Ю.А. Нанопорошки, получаемые с использованием импульсных методов нагрева мишени // Перспективные материалы. - 2003. - № 4. - С. 79-82.
17. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лаповок В.И. Физические явления в ультрадисперсных средах. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 224 с.
18. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды. - М.: Атомиздат, 1977. - 264 с.
19. Морохов И.Д., Петинов В.И., Трусов Л.И., Петрунин В.Ф. Структура и свойства малых металлических частиц // Успехи физики. - 1981. - Т. 133, №4.-С. 653-692.
20. Губин С.П. Химия кластеров. Основы классификации и строение. - М.: Наука. 1987. - 263 с.
21. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. - М.: Физматлит, 2001. - 224 с. '
22. Петрунин В.Ф. Ультрадисперсные (нано-) материалы и нанотехнологии // Инженерная физика. - 2001. - № 4. - С. 20-27.
23. Трусов Л.И., Холмянский В.А. Островковые металлические пленки. - М.: Металлургия, 1973. - 182 с.
24. Алымов М.И., Аверин С.И., Евстратов Е.В. Термическая нестабильность нанокристаллического железа // Физика и химия обработки материалов. -
25. -№4.-С. 90-91.
26. Борман В.Д., Лай С.Ч., Пушкин М.А. и др. Об использовании процесса Костера-Кронига для исследования перехода нанокластеров металла в неметаллическое состояние // Письма в ЖЭТФ. - 2002. - Т. 76, № 7. - С. 520-525.
27. Сухович Е.П., Унгурс И.А. Методы изготовления ультрадисперсных порошков металлов // Известия АН Латв. ССР. - 1983. - №4 (429). - С. 63­

77.

1. Андриевский Р.А. Получение и свойства нанокристаллических тугоплавких соединений // Успехи химии. - 1994. - Т. 63, № 5. - С. 431— 448.
2. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. - М.: Металлургия, 1991.-207 с.
3. Ген М.Я., Зискин М.С., Петров Ю.И. Исследование дисперсности аэрозолей алюминия в зависимости от условий их образования // Доклады АН СССР. - 1959. - Т. 127, № 2. - С. 366-368.
4. Механохимический синтез в неорганической химии: Сб. научн. тр. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991.-259 с.
5. Ададуров Г.А. Физико-химические превращения веществ в ударных волнах с участием газов // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. - 1990. - Т. 35, № 5. - С. 595-599.
6. Белошапко А.Г., Букаемский А.А., Ставер А.М. Образование ультрадисперсных соединений при ударноволновом нагружении пористого алюминия. Исследование полученных частиц // Физика горения и взрыва. - 1990. - Т. 26, № 4. - С. 93-98.
7. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. - М.: Наука, 1980. - 284 с
8. Сабуров В.П., Черепанов А.Н., Жуков М.Ф. и др. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов // Низкотемпературная плазма. - Т.
9. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. - 312 с.
10. Фоминский Л.П. Некоторые аспекты электроэрозионного способа получения окиси алюминия // Электронная обработка материалов. - 1980. -№ 1. - С. 46-49.
11. Писаренко С.И., Лунина М.А. Исследование состава высокодисперсных частиц железа и олова, полученных электроконденсационным методом // Журнал физической химии. - 1977. - Т. 51, № 8. - С. 2050-2052.
12. Анисимов С.И., Имис Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. - М.: Наука, 1970. - 272 с.
13. Анциферов В.Н., Шмаков А.М., Халтурин В.Г., Айнагос А.Ф. Лазерный синтез ультрадисперсных порошков оксида алюминия // Порошковая металлургия. - 1995. - № 1/2. - С. 1-4.
14. Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Г. и др. Исследование характеристик оксидных нанопорошков, получаемых при испарении мишени импульсно­периодическим СОг-лазером // Журнал технической физики. - 2002. - Т. 72, №11.-С. 76-82.
15. Соковнин С.Ю., Котов Ю.А., Алябьев Д.И. и др. Проект установки для получения нанопорошков // Радиационная физика и химия неорганических материалов: Труды 12-ой междунар. конф. Томск, 2003. - С. 453^56.
16. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии. - Минск: Наука и техника, 1983. - 151 с.
17. Мартынюк М.М. Роль испарения и кипения жидкого металла в процессе электрического взрыва // Журнал технической физики. - 1974. - Т. 44, №
18. -С. 1262-1270.
19. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. - Томск: Издательство Томского университета, 2002. - 154 с.
20. Naime Е. Electrical experiments by Mr. Edward Naime // Phil. Trans. Roy. Soc. London. - 1774. - Vol. 6. - P. 79-89.
21. Faraday M. Division by the Leyden deflagration // Proc. Roy. Inst. 1857. - Vol. 8. - P. 356.
22. Anderson J.A. Proc. Nati. Acad. Sci. U.S. - 1920. - Vol. 6. - P. 42-43; Astrophys. J. - 1920. - Vol. 51. - P. 37^3.
23. Exploding wires. N.Y.: Plenum Press, 1959. - Vol. 1. Перевод:

Взрывающиеся проволочки / Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Иностранная литература, 1963. - 342с.

1. Exploding wires. N.Y.: Plenum Press, 1964. - Vol. 2. Перевод:

Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Мир. 1965.-360 с.

1. Exploding wires. N.Y.: Plenum Press, 1965. - Vol. 3.
2. Exploding wires. N.Y.: Plenum Press, 1968. - Vol. 4.
3. Кварцхава И.Ф., Плютто A.A., Чернов A.A., Бондаренко В.В. Электрический взрыв металлических проволок // Журнал

экспериментальной и теоретической физики. - 1956. - Т. 30, № 1. - С. 42­

53.

1. Лебедев С.В. Взрыв металла под действием электрического тока // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1957. - Т. 32, № 2. -С. 199-207.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. - Киев: Наукова думка, 1986. - 208 с.
3. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. - Киев: Наукова думка, 1977. - 127 с.
4. Новое в разрядно-импульсной технологии: Сб. научн. трудов. - Киев: Наукова думка, 1979. - 152 с.
5. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. - Киев: Наукова думка. 1990. - 208 с.
6. А.с. № 399505/25 СССР. Давыдов А.С., Ларионов Н.И., Чередников М.М. Способ получения порошка и дроби из металлов и сплавов и устройство для осуществления этого способа. Заявл. 24.06.1949.
7. Мартынюк М.М., Цапков В.И., Пантелейчук О.Г. и др. Исследование физических свойств металлов методом импульсного нагрева // Препринт № 1102 Ун-та дружбы народов им. П. Лумумбы. 1972. - 130 с.
8. Семкин Б.В. Электрический взрыв в конденсированных средах. - Томск: ТПИ, 1979.-90 с.
9. Назаренко О.Б., Танбаев Ж.Г., Шардин Р.В. Анализ эффективности разрушения бетона при электрическом взрыве проводников // Физика импульсных воздействий на конденсированные среды: Тез. докл. VI научн. школы. Николаев, 1993. - С. 68.
10. Назаренко О.Б. Особенности формирования продуктов электрического взрыва проводников в конденсированных средах: Дис. ...к.т.н. Томск, 1996.- 129 с.
11. Chace W.G., Levine N.A. Classification of wire explosions // J.Appl.Phys. - 1960.-Vol. 31, №7.-P. 1298-1303.
12. Чейс В. Введение // Электрический взрыв проводников: Сб. научн. тр. - М.: Мир, 1965.-С. 7-11.
13. Ткаченко С.И. Моделирование ранней стадии электрического взрыва проводника // Журнал технической физики. - 2000. - Т. 70, № 7. - С. 138—

140.

1. Очеретин В.Н. Сравнительное исследование взрыва проволочек в воде и воздухе // Электронная обработка материалов. - 1969. - № 1. - С. 52-54.
2. Seydel U., Schoefer R., Jager Н. Temperatur und Druck explodierender Drahte beim Verdampungsbeginn // Z. Naturforsch. - 1975. - V. 30a. - P. 116.
3. Schwarz U. Uber die erzeugung von Hochspannungsimpulsen mit Drahtexplosionen aus induktiven Energiespeichem // Ph. D. dissertation. - TU Braunsxhweig, 1977. - P. 44.
4. Ushakov V.Ya., Ilyin A.P., Nazarenko O.B. et al. Ultrafine powders produced with wire electrical explosion (Production and properties) // KORUS’97: Proc. of the Ist Korea-Russian Int. Symp. on science and technology. - Ulsan, 1997. - P. 167-171.
5. Ильин А.П., Трушина Л.Ф., Родкевич Н.Г. Электрохимические свойства электровзрывных энергонасыщенных порошков меди и серебра // Физика и химия обработки материалов. - 1995. - № 3. - С. 122-125.
6. Ильин А.П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок // Физика и химия обработки материалов. - 1994. - № 3. - С. 94-97.
7. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // Известия ТПУ. - 2003. - Т. 306, №1. - С. 133-139.
8. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные среды. - М.: Химия, 1989. - 464 с.
9. Дамаскин Б.Б., Петрий О.П., Подловченко Б.И. и др. Практикум по электрохимии. - М.: Высшая школа, 1991. - С. 165-166.
10. Котов Ю.А., Яворовский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // Физика и химия обработки материалов. - 1978. - № 4. - С.24-29.
11. Котов Ю.А., Саматов О.М. Характеристики порошков оксида алюминия, полученных импульсным нагревом проволоки // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1994. - № 10/11. - С. 90-94.
12. Азаркевич Е.И., Котов Ю.А., Мурзакаев А.М. Исследование образования порошков металла и оксида при электрическом взрыве алюминиевых проволок // Физикохимия ультрадисперсных систем: Тез. докл. IV Всеросс. конф. - М.: МИФИ, 1998. - С. 86-87.
13. Глазунов Г.П., Канцедал В.П., Корниенко JI.A. и др. Некоторые свойства дисперсных порошков, полученных электрическим взрывом проводников в газе высокого давления // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Атомное материаловедение. - 1978. - Вып. 1 (1). - С. 21-24.
14. Jiang W., Yatsui К. Pulsed wire discharge for nanosize powder synthesis // IEEE Transactions on plasma science. - 1998. - Vol. 26, № 5. - P. 1498-1501.
15. Suzuki Т., Keawchai K., Jiang W., Yatsui K. Nanosize A1203 powder production by pulsed wire discharge // Jpn. J. Appl. Phys. - 2001. - Vol. 40, №
16. - Part 1.- P. 1073-1075.
17. Шаманский B.B., Степанян E.B., Юрмазова T.A. и др. Влияние условий получения и хранения на дисперсность электровзрывных нанопорошков металлов // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы II Всерос. науч. конф. - Томск, 2002. - Т. 2. - С. 228-230.
18. Иванов Ю.Ф., Седой B.C. Частицы и кристаллиты при электрическом взрыве // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. Сб. научн. трудов VI Всероссийской конф. - М.: МИФИ. - С. 102-106.
19. Котов Ю.А., Ри Ч.К., Багазеев И.В. и др. Получение нанопорошков меди электрическим взрывом проволоки. Исследование их окисления при хранении и при нагреве в воздухе//Физикохимия ультрадисперсных (нано) систем: Сб. научн. трудов VI Всерос. (междунар.) конф. - М.: МИФИ. - 2003.-С. 279-285.
20. Азаркевич Е.И., Котов Ю.А., Медведев А.И. Получение порошков оксида меди методом ЭВП // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Сб. научн. трудов VI Всероссийской, (междунар.) конф. - М.: МИФИ, 2003. - С. 114-117.
21. Ляшко А.П., Савельев Г.Г., Тихонов Д.В. Морфология, фазовый состав и окисление порошков, полученных электрическим взрывом латунных проволочек // Физика и химия обработки материалов. - 1992. - № 6. - С.127-130.
22. Ильин А.П., Тихонов Д.В. Морфология, фазовый и химический состав порошков, полученных при электрическом взрыве проводников из сплава олово-свинец // Физика и химия обработки материалов. - 2001. - № 3. - С. 68-71.
23. Азаркевич Е.И., Бурнушова Л.А., Ильин А.П. и др. О возможности получения порошков сплавов и интерметаллических соединений методом электрического взрыва проволок из разнородных металлов // Получение, свойства и применение энергонасыщенных ультрадисперсных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Российской конф. - Томск: НИИ высоких напряжений при ТПУ, 1993. - С. 39-40.
24. Johnson R.L., Siegel В. Chemistry of electrical wire explosions in hydrocarbons // J. of Electrochemical Society. - 1968. - Vol. 155, № 1. - P. 24-28.
25. Cook E., Siegel B. Carbide synthesis by metal explosions in acetylene // J. Inorg. Nucl. Chem. - 1968. - Vol. 30. - P. 1699-1706.
26. Зелинский В.Ю., Яворовский H.A., Проскуровская Л.Т., Давыдович В.И. Структурное состояние алюминиевых частиц, полученных методом электрического взрыва // Физика и химия обработки материалов. - 1984. - № 1.-С. 57-59.
27. Хабас Т.А. Энергонасыщенные ультрадисперсные порошки металлов в технологии керамических материалов // Стекло и керамика. - 1997. - №
28. -С. 27-30.
29. Петров Ю.И. Физика малых частиц. - М.: Наука, 1982. - 112 с.
30. Ильин А.П., Громов А.А., Тихонов Д.В. Проблемы пассивации ультрадисперсных порошков алюминия // Перспективные материалы. -
31. -№2.-С. 95-101.
32. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. - М.: Энергия, 1973.-233 с.
33. Эрглис К.Э. Защита электронной аппаратуры и измерительных систем от внешних помех // Приборы и техника эксперимента. -1969.-№3.-С. 3-17.
34. Буланов В.Я., Кватер Л.И., Долгаль Т.В. и др. Диагностика металлических порошков. - М.: Наука, 1983. - 280 с.
35. Кварцхава И.Ф., Бондаренко В.В., Плютто А.А. и др. Осциллографическое определение энергии электрического взрыва проволок // Журнал технической физики. - 1956. - Т. 31, в. 5 (11). - С. 745-751.
36. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Tikhonov D.V., Grigoriev A.N., Nazarenko O.B. Electrical explosion as a metal treatment by electrical current of high power // Proc. of 20th Int. Conf. on Heat Treatment. - Czechia, Jihlava, 2004. - P. 419— 422.
37. Волков B.M., Шайкевич И.А. Изучение конфигурационных концевых эффектов при электрическом взрыве проводников // Известия вузов. Физика. - 1975. - Т. 158, № 7. - С. 138-139.
38. Назаренко О.Б., Астанкова А.В. Об использовании электровзрывных ультрадисперсных порошков для очистки жидкостей от примесей // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы 9-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2003. - С. 75 - 78.
39. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Скоропад Л.В. Анализ способов повышения дисперсности электровзрывных нанопорошков // Физико­технические проблемы атомной энергетики и промышленности (производство, наука, образование): Тез. докл. междунар. научно-практич. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2004. - С. 102.
40. Астанкова А.П., Назаренко О.Б. Влияние добавок химически активных газов на дисперсность электровзрывных нанопорошков // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды I Всеросс. конф. студентов и молодых ученых. - Томск: Изд-во ТПУ, 2004. - С. 68 - 69.
41. Петросян В.И., Дагман Э.И. К теории электрического взрыва в вакууме // Журнал технической физики. - 1969. - Т. 39, № 11. - С. 2084-2091.
42. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B., Yablunovskii G.V. Mechanism of metal destruction and formation of particles in electrical explosion of wires // KORUS’2003: Proc. of the 7th Korea-Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Ulsan, 2003. - V. 1. - P. 217-220.
43. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. - 148 с.
44. Григорьев А.Н., Тихонов Д.В. Связь параметров электрического взрыва проводников с характеристиками получаемых нанопорошков // Современные техника и технологии: Материалы 10-ой междунар. научно- практич. конф. - Томск, 2004.
45. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение нанопорошков вольфрама методом электрического взрыва проводников // Известия Томского политехнического университета. -
46. - Т. 308, № 4. - С. 68-70.
47. Будович B.JL, Кужекин И.П. О влиянии неоднородностей проводника на импульс напряжения при электрическом взрыве // Журнал технической физики. - 1976. - Т. 46, № 4. - С. 737-740.
48. Будович B.JL, Закстельская О.А., Котова И.С., Кужекин И.П. Роль структурных неоднородностей проводника при электрическом взрыве // Журнал технической физики. - 1978. - Т. 48, № 6. - С. 1219-1223.
49. Мартынюк М.М., Пантелейчук О.Г., Цапков В.И. Плавление металлических проводников под действием мощных импульсов тока // ПМТФ. - 1972. - № 4. - С. 108-111.
50. Гревцев Н.В., Золотухин В.Д., Кашурников В.М. и др. О характере вскипания меди при импульсном нагреве проходящим током // Теплофизика высоких температур. - 1977. - Т. 15, № 2. - С. 362-369.
51. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Tikhonov D.V., Grigoriev A.N., Nazarenko O.B. Metal heat treatment by short impulse of electrical current // Proc. of 20th Int. Conf. on Heat Treatment. - Czechia, Jihlava, 2004. - P. 175-176.
52. Назаренко О.Б. О влиянии микроструктуры проводника на процесс его нагрева до плавления // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов 10-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск, Изд-во ТПУ, 2004.-С. 386-389.
53. Веригин Д.А., Лепустин А.В., Назаренко О.Б. О влиянии структуры проводника на неоднородность нагрева при электрическом взрыве // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов 11­ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск, Изд-во ТПУ, 2005. - С. 347-350.
54. Химическая энциклопедия в 5-ти т. Т.2. - М.: Советская энциклопедия, 1990.-С. 269.
55. Каламазов Р.У., Цветков Ю.В., Кальков А.А. Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. - М.: Металлургия, 1988. - 192 с.
56. Зеликман А.Н., Никитина Л.С. Вольфрам. - М.: Металлургия, 1978. - 272 с.
57. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1983. - 359 с.
58. Макквиллэн М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах. - М.: Металлургия, 1967. - С. 12.
59. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. - М.: Высшая школа, 1973. - 655 с.
60. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B., Yablunovskii G.V. Current status and future development of the electroexplosive technology // KORUS’2003: Proc. of the 7th Korea-Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Ulsan, 2003. - V.l. - P. 175-178.
61. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение и свойства электровзрывных нанопорошков сплавов и интерметаллидов // Известия Томского политехнического университета. - 2005. - Т. 308, № 4. -С. 71-73.
62. Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. - Томск: НИИ ПММ, 1989. - 214 с.
63. Проскуровская Л.Т. Ультрадисперсний порошок алюминия как активатор спекания // Получение, свойства и применение энергонасыщенных ультрадисперсных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Российской конф. - Томск: НИИ высоких напряжений при ТПУ, 1993. - С. 97-98.
64. Лернер М.И., Давыдович В.И. Образование высоко дисперсной фазы при электрическом взрыве проводников // Получение, свойства и применение энергонасыщенных ультрадисперсных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Российской конф. - Томск. НИИ ВН, 1993. - С. 23-24.
65. Ильин А.П., Ушаков В .Я., Назаренко О.Б. и др. Анализ процессов фазообразования в условиях ЭВП // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Тез. докл. VIII науч. школы. - Николаев, 1997. -С. 41.
66. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. - М.: Мир. 1969.-С. 12.
67. Азаркевич Е.И., Бекетов И.В., Котов Ю.А. и др. Характеристики электровзрывных порошков оксида титана // Физико-химия ультрадисперсных систем: Сб. научн. трудов V Всероссийской конф. - Екатеринбург: УрО РАН, 2000. - Ч. 1. - С. 104-108.
68. Котов Ю.А., Бекетов И.В., Багазеев А.В. и др. Характеристики порошков №0, полученных электрическим взрывом проволоки // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Сб. науч. трудов VI Всероссийской (междунар.) конф. - М.: МИФИ, 2003. - С .153-156.
69. Ильин А.П., Ан В.В., Тихонов Д.В. и др. Размерные зависимости характеристик частиц и нанопорошков // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Материалы VII Всероссийской конф. - М.: МИФИ, 2005. - С.145-146.
70. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. - М.: Изд-во МГУ, 1976.-232 с.
71. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрический разряд в воде. - М.: Наука, 1971.-155 с.
72. Бекер JI., Вархал Р. Изучение реакций вода-металл с помощью техники взрывающихся проволочек // Электрический взрыв проводников. - М.: Мир, 1965.-С. 239-259.
73. Лепинь Л.К. Вопросы окисления металлов в воде и водных растворах // Известия АН Латв. ССР. Сер. хим. - 1981. -№ 1. - С. 12-25.
74. Колотыркин Я.М., Алексеев Ю.В. / Электрохимия. - 1995. - Т. 31. - С. 5-10.
75. Колгатин С.Н. Простые и интерполяционные уравнения состояния азота и воды // Журнал технической физики. - 1995. - Т.65, № 7. - С. 1-9.
76. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. - Томск: ТГУ, 1975.-256 с.
77. Куликов И.С. Термодинамика оксидов: Справочник. - М.: Металлургия, 1986.-344 с.
78. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. - М.: Наука, 1972. - 284 с.
79. Ананьин В.Н., Беляев В.В., Романенков В.Е. и др. Гидротермальное окисление алюминиевых порошков различной дисперсности // Известия АН БССР. Сер. хим. наук. 1988. - № 5. - С. 17-20.
80. Торопов Н.А., Барзаковский В.П., Бондарь И.А. и др. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Вып. 2. Металл-кислородные соединения силикатных систем. - Л.: Наука, 1969. - 372 с.
81. Ринан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Химия металлов. Т. 1. - М.: Мир, 1972.-С. 296.
82. Ляшко А.П., Савельев Г.Г., Ильин А.П. и др. Особенности взаимодействия субмикронных порошков алюминия с жидкой водой // Кинетика и катализ. - 1990. - Т. 31, № 4. - С.967-972.
83. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Ушаков В.Я. и др. Получение высокотемпературной модификации у-АЬОз с помощью электрического взрыва проводников в воде // Журнал технической физики. - 1996. - Т. 66, №12. -С. 131-133.
84. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В .Я. Формирование химических соединений при электрическом взрыве металлических проводников в жидкостях // Известия вузов. Физика. - 1996. - № 6. - С. 9-14.
85. Назаренко О.Б., Ушаков В.Я., Ильин А.П. Электровзрывной метод получения суспензии гидроксида алюминия // Вода, которую мы пьем: Тез. докл. междунар. научно-технич. конф. - М., 1995. - С. 61-62.
86. Патент РФ № 2078045. Способ получения порошка оксида алюминия/ Назаренко О.Б., Ильин А.П., Краснятов Ю.А. Приор, от 19.07.95.
87. Shiyan L.N., Serikov L.V., Smekalina T.V. and Vasiliev A.A. EPR studies of aluminum oxide phase compositions // React. Kinet. Catal. Lett. - 1990. - V. 41, №2.-P. 291-294.
88. Патент РФ № 2078434. Способ получения гидроксида алюминия/ Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. Приор, от 12.05.94.
89. Назаренко О.Б. Регулирование характеристик электровзрывных ультрадисперсных порошков // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Материалы VI Всеросс. (междунар.) конф. - М.: МИФИ, 2002. - С. 295-296.
90. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. Регулирование дисперсного состава электровзрывных порошков оксида алюминия // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 3. - С. 57-59.
91. Назаренко О.Б. Получение нанопорошков оксида алюминия методом электрического взрыва проводников // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов 10-ой Всеросс. научно-техн. конф. - Томск, Изд-во ТПУ, 2004. - С. 383-386.
92. Енохович А.С. Краткий справочник по физике. - М.: Высшая школа, 1976.-288 с.
93. Патент РФ № 2079396. Способ получения высокодисперсных порошков соединений металлов с неметаллами / Назаренко О.Б., Ильин А.П. Приор, от 19.07.95. Опубл. Бюл. №
94. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. - М.: Наука, 1971. - 268 с.
95. Ильин А.П., Назаренко О.Б, Ушаков В.Я. Электрический взрыв проводников как метод синтеза химических соединений // ХИМРЕАКТОР-14: Тез. докл. XIV междунар. конф. по химическим реакторам. - Новосибирск, 1998. - С. 215-216.
96. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Шубин Б.Г. Перспективы применения электрического взрыва проводников для очистки сточных вод // Высоковольтные техника и электротехнология: Межвуз. сб. науч. тр., вып.2. - Иваново, 1999. - С. 49-50.
97. Павлов И.Е. Фазовый состав продуктов электровзрыва тугоплавких соединений // Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности: Тез. докл. II Всесоюз. научно-технич. конф. - Киев: Наукова думка, 1980. - С. 258-259.
98. Павлов И.Е. Особенности продуктов, полученных при электрическом взрыве смесей титана и ТЮ2 *И* Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности: Тез. докл. II Всесоюз. научно-технич. конф. - Николаев, 1988. - С. 97.
99. Ильин А.П., Каратеева Е.А., Назаренко О.Б. Тихонов Д.В. Применение ультрадисперсных порошков для очистки воды // Техника и технология очистки и контроля качества воды: Сб. трудов междунар. научно-техн. конф. Томск, 1999. - С.90-92.
100. Патент РФ № 2101337. Способ очистки воды от газов, ионов металлов и органических соединений / Ильин А.П., Краснятов Ю.А., Назаренко О.Б. и ДР.
101. Amelkovich Yu.A., Nazarenko О.В. Application of electroexplosive nanopowders for water purification // KORUS’2004: Proceedings of the 8th

Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. - Tomsk,

1. - Vol. 1.- P. 195-197.
2. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Шиян Л.Н. и др. Использование электрического взрыва проводников для очистки сточных вод // Контроль и реабилитация окружающей среды: Тез. докл. междунар. симпозиума. - Томск, ИОА СО РАН, 1998. - С. 180.
3. Розовский Г.И., Вяшкалис А.И. Химическое меднение. - Вильнюс: РИНТИП, 1966.-60 с.
4. Ushakov V.Y, Ilyin А.Р., Nazarenko О.В. at al. Methods of dispersion, phase and chemical composition of wires electrical explosion products regulation // Proc. of 43rd Int. Scientific Colloquium. - Ilmenau, Germany, 1998. - P. 797­799.
5. Назаренко О.Б., Ильин А.П. Получение нанопорошков карбидов и нитридов металлов при электрическом взрыве проводников в жидких углеводородах // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 2. - С. 85-87.
6. Siegel В., Johnson R.L. A thermal model of wire explosion in methane // Exploding Wires. - N.Y.: Plenum Press, 1968. - Vol. 4.
7. Ilyin A.P., Nazarenko O.B., Krasnyatov Y.A., Tikhonov D.V., Ushakov V.Y. Synthesis of metal carbides, oxides and nitrides with wire electric explosion // SIBCONVERS’95: Abstr. of the scientific conference on the use of researc conversion results in the Siberian institutions of higher education for intematioinal cooperation. - Tomsk: Tomsk State Academy of Control Systems and Radioelectronics, 1995. - P. 55.
8. Самсонов Г.В., Витрянюк B.K., Чаплыгин Ф.Ч. Карбиды вольфрама. - Киев: Наукова думка, 1974. - 73 с.
9. Гусев А.И., Ремпель А.А. Структурные фазовые переходы в нестехиометрических соединениях. - М.: Наука, 1988. - 308 с.
10. Химическая энциклопедия в 5-ти т. Т.4. - М.: Науч. изд-во «Большая Российская энциклопедия», 1995.-С. 1176.
11. Гельфонд Л.А., Семкин Б.В. Экспериментально-расчетные оценки составляющих энергобаланса при пробое комбинированных сред // Журнал технической физики. - 1985. - Т. 55, № 11. - С. 2220-2222.
12. Андрушкевич В.В., Семкин Б.В., Шубин Б.Г. Оптические исследования ударных волн, возникающих при взрыве проводника в твердом теле // Техника высоких напряжений. - Томск, ТПУ. - 1973. - С. 55.
13. Шубин Б.Г. Исследование термодинамических и гидродинамических характеристик начальной стадии импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков // Дисс....к.ф.-м.н. - Томск, 1977. - 188 с.
14. Назаренко О.Б. Влияние условий синтеза на свойства электровзрывных нанопорошков карбидов металлов // Известия Томского политехнического университета. - 2003. - Т. 306, № 6. - С. 62-66.
15. Nazarenko О., Tikhonov D., Ilyin A., Ushakov V. Environment density or dynamic viscosity as parameter of regulation of composition of wire electrical explosion products // KORUS’2001: Proceedings. - Tomsk, 2001. - V. 1. - P. 358-360.
16. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Тихонов Д.В., Ушаков В.Я. Плотность или динамическая вязкость окружающей среды как параметр регулирования состава продуктов электрического взрыва проводников // Высокоэнергетические процессы и наноструктуры: Материалы межрегион. научно-техн. конф. - Красноярск, 2001. - С. 33.
17. Назаренко О.Б. Исследование состава продуктов электровзрыва алюминиевой проволочки в жидких углеводородах // Тр. Обл. научно- практич. конф. молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям. - Томск, 1995. - С. 68.
18. Ильин А.П., Краснятов Ю.А., Ларионов С.А. Применение электровзрывных ультрадисперсных порошков в качестве добавок к маслам // Получение, свойства и применение энергонасыщенных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Российской конф. - Томск: НИИ ВН при ТПУ, 1993. - С. 83.
19. Ильин А.П., Медведев Г.А., Петрунин В.Ф. Динамические эффекты в процессе трения при плакировании ультрадисперсными порошками // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Тез. докл. VI Всерос. конф. - М.: МИФИ, 2002. - С. 397.
20. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. - М.: Высшая школа, 1981.-679 с.
21. Ильин А.П., Назаренко О.Б. Модифицирование минеральных масел электрическим взрывом проводников // Высоковольтные техника и электротехнология: Межвуз.сб. науч.тр. - Вып.1. - Иваново, 1997. - С. 71­

73.

1. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Рихерт С.В. Влияние суспензии «моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь - низколегированная сталь» // Известия ТПУ. - 2004. - Т. 307, № 3. - С. 77-79.
2. Камалов З.Г., Валеев И.Ш. Изменение структурного состояния меди под действием мощных импульсов тока // Физика и химия обработки материалов. -2000. - № 2. - С. 67-72.
3. Колгатин С.Н., Лев М.Л., Перегуд Б.П. и др. Разрушение медных

7 2

проводников при протекании по ним тока плотностью большей 10 А/см // Журнал технической физики. - 1989. - Т. 59, № 9. - С. 123-133.

1. Гаврилов В.Н. Динамика разлета продуктов электрического взрыва проводников: Дис к.ф.-м.н. - Екатеринбург, 1993. - 112 с.
2. Гаврилов В.Н., Литвинов Е.А. Получение частиц методом электрического взрыва проводника // Прикладная математика и техническая физика. - 1993. - № 6. - С. 28-35.
3. Bennet F.D. High-temperature exploding wires // Progress in high- temperature physics and chemistry. - N.Y.: Pergamon-Press, 1968. -Vol. 4. - P. 4-63.
4. Беннет Ф. Волна испарения в металлах // Физика высоких плотностей энергии. - М.: Мир, 1974. - С. 273-279.
5. Кривицкий Е.В., Литвиненко В.П. О механизме взрыва проводников импульсом тока // Журнал технической физики. - 1976. - Т. 46, № 10. - С. 2081-2087.
6. Азаркевич Е.И., Седой B.C. Неприменимость модели Беннета для расчета напряжения на взрывающихся проволочках // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: Сб. научн. тр. - Новосибирск: Наука, 1976. - С. 59-61.
7. Чейс У. Краткий обзор исследований по взрывающимся проволочкам // Взрывающиеся проволочки. - М.: Иностранная литература, 1963. - С. 9­

17.

1. Мартынюк М.М. Взрывной механизм разрушения металлов мощным потоком электромагнитного излучения // Журнал технической физики. - 1976. - Т. 46, № 4. - С. 741-746.
2. Абрамова К.Б., Злотин Н.А., Перегуд Б.П. Магнитогидродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников: разрушение проводников электрическим током // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1975. - Т. 69, № 6. - С. 2007-2012.
3. Котов Ю.А., Седой B.C. Подобие при электрическом взрыве проводников // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: Сб. научн. тр. - Новосибирск: Наука, 1976. - С. 56­

59.

1. Колгатин С.Н., Шнеерсон Г.А. Особенности нагрева плазмы при электрическом взрыве проводников в сверхсильном магнитном поле // Письма в ЖТФ. - 1994. - Т. 20, № 5. - С. 67-71.
2. Волков А.А., Гребнев Е.В., Дыдыкин П.С. и др. Исследование электрического взрыва проволочек микросекундными импульсами тока в продольном магнитном поле // Журнал технической физики. - 2002. - Т. 72, №. 5. \_С. 115-120.
3. Воробьев B.C., Малышенко С.П. Термодинамика фазового равновесия жидкость-пар в присутствии неоднородного поля // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1997. Т. 111, № 6. - С. 2016.
4. Воробьев B.C., Малышенко С.П., Ткаченко С.И., Фортов В.Е. Чем инициируется взрыв проводника с током? // Письма в ЖЭТФ. - 2002. - Т. 75, №8.-С. 445-449.
5. Кокаревич Г.П. К вопросу об энергопреобразовании при электрическом взрыве проводников // Получение, свойства и применение энергонасыщенных ультрадисперсных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Российской конф. - Томск: НИИ ВН при ТПУ, 1993.-С. 15-16.
6. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Некоторые результаты исследования электрического взрыва проводников // Физика и химия обработки материалов. - 1976. - № 1. - С. 6-14.
7. Лебедев С.В. О механизме электрического взрыва металлов // Теплофизика высоких температур. - 1980. - Т. 18, № 2. - С. 273-279.
8. Weber F.N., Shear D.D. Exploding wire particle size by light scattering measurement // J. Appl. Phys. - Vol. 40, № 9. - P. 3854-3857.
9. Лебедев C.B., Хайкин С.Э. Некоторые аномалии в поведении металлов, нагреваемых импульсами тока большой плотности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1954. - Т. 26, №. 5. - С. 629.
10. Искольдский А.М., Пикус В.К., Энельбаум Я.Г. Электрический взрыв проводников. Устойчивость фронта фазового превращения. Препринт № 32 ИАиЭТАИ СССР. - Новосибирск: ИАиЭ, 1976.
11. Яблуновский Г.В. Вопросы энергетики малых металлических частиц. Деп. ВИНИТИ, г. Черкассы, № 1163-XII-86. - С. 6-16.
12. Ильин А.П., Тихонов Д.В. Диссипация энергии и диспергирование металлов в условиях электрического взрыва проводников // Физика и химия обработки материалов. - 2002. - № 6. - С. 60-62.
13. Кан Р.У., Хаазен П.Т. Физическое металловедение: Т.2 Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами. - М.: Металлургия. 1978. - 624 с.
14. Смирнов Б.В. Кластерная плазма // Успехи физических наук. - Т. 170, №
15. -С. 495-534.
16. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Nazarenko О.В. Electric Explosion of Wires in Multicomponent Reactionary Liquid Ambiences as Method for Producing Nanopowder of Complex Composition // KORUS’2005: Proc. of the 9th Korea- Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Novosibirsk, 2005. — P. 211— 213.
17. Пасечник JI.JI., Старчик П.Д., Федорович O.A. Измерение температуры плазмы подводного взрыва проволочек в условиях развитых нестабильностей в канале разряда // Теория и практика электрогидравлического эффекта: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1978.-С. 43-49.
18. Гулый Г.А., Королев Ю.В., Пасечник Л.Л. и др. Нагрев плазмы в канале мощного подводного взрыва проводников // Теория и практика электрогидравлического эффекта: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1978.-С. 36-42.
19. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов. Справочник. - Челябинск: Металлургия, 1988. - 320 с.
20. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник. Ред. А.П.Зефиров. - М.: Атомиздат, 1965. - 460 с.
21. Kwon Y.S., Ilyin А.Р., Tikhonov D.V., Nazarenko O.B. Installation “UDP-5” for nanopowders production by wire electrical explosion // KORUS’2004: Pro.s of the 8th Korea-Russia Int. Symp. on Science and Technology. - Tomsk, 2004. -V. 1.-P. 227-229.
22. Ильин А.П., Попенко E.M., Громов А.А. и др. Характеристики горения в воздухе агломерированных сверхтонких порошков алюминия // Физика горения и взрыва. - 2002. - Т. 38, № 6. - С. 66-70.
23. Филиппов П.В. Модифицирование полиэтилена высокого давления добавками ультрадисперсных порошков. АР дисс....к.т.н. - Томск, 2003. - 22 с.
24. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Ушаков В.Я. Возможности и перспективы развития электровзрывного метода получения порошков // Физикохимия ультрадисперсных систем: Материалы V Всеросс. конф.- Москва, 2000. - С. 77-79.
25. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Установка для получения порошков металлов, сплавов и химических соединений электрическим взрывом проволоки. Патент РФ № 2247631. Приор.05.11.2003. Опубл. 10.03.2005, бюл. №7.
26. Розовский П.В. Математические аспекты задач охраны воздушного бассейна. - М.: Наука, 1984. - С. 65-68.
27. Виноградов А.В., Волков В.А., Гидаспов В.Ю., Розовский П.В. О влиянии остаточного газа на расширение плотного газового облака в вакуумной камере и его взаимодействие с мишенью или со стенкой // ЖТФ. - 1993. - Т. 63, №. 11. - С. 20-24.
28. Виноградов А.В., Волков В.А., Гидаспов В.Ю., Розовский П.В. Взаимодействие расширяющегося газового облака с перфорированным экраном // ЖТФ. - 1997. - Т. 67, № 5. - С. 19-22.
29. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы газодинамики дисперсных систем. - М.: Энергия, 1974. - 480 с.
30. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - М.: Изд-во АН ССР, 1955. - 352 с.