Ложкомоев Александр Сергеевич. Гибридные адсорбенты на основе наноструктурного бемита: получение, свойства, применение;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»], 2021

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

**Ложкомоев Александр Сергеевич**

На правах рукописи

****

**ГИБРИДНЫЕ АДСОРБЕНТЫ  
НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРНОГО БЕМИТА:  
ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**

1. **- Нанотехнологии и наноматериалы (Химия и химическая технология)**

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Тамбов-2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

[Введение 8](#bookmark2)

ГЛАВА 1. Наноструктуры AlOOH: синтез, свойства, применение (обзор литературы) 17

1. Г идро(сольво)термальная стратегия получения иерархических

микро/наноструктур AlOOH 18

1. Получение наноструктур Al2O3\*nH2O окислением массивного

алюминия 34

1. Образование иерархических микро/наноструктур AlOOH при

реакции алюминия с водой 37

1. Образование иерархических микро/наноструктур AlOOH при

гидролизе нитрида алюминия 44

1. [Реакция с водой электровзрывных нанопорошков Al и AlN 47](#bookmark9)
2. [Адсорбционные применения наноструктур AlOOH 53](#bookmark10)
3. [Волокнистые материалы с оболочкой из наноструктур AlOOH 58](#bookmark11)

[ГЛАВА 2. Экспериментальная часть 62](#bookmark12)

1. [Методики синтеза НП Al и Al/AlN 62](#bookmark13)
2. [Методы характеризации прекурсоров и продуктов гидролиза 63](#bookmark14)
3. [Определение активного алюминия в НП 63](#bookmark15)
4. [Определение массовой доли нитрида алюминия в НП 64](#bookmark16)
5. [Электронно-микроскопические исследования 65](#bookmark17)
6. [Определение размеров агломератов 66](#bookmark18)
7. [Изучение фазового состава порошков 66](#bookmark19)
8. [Определение текстурных характеристик 67](#bookmark20)
9. [Определение ^-потенциала 67](#bookmark21)
10. [Термический анализ продуктов превращения 68](#bookmark22)
11. Методики исследований закономерностей окисления водой НП

Al и Al/AlN 68

1. Методика выделения промежуточных продуктов реакции с

различной степенью превращения 70

1. Методики изучения влияния дисперсности прекурсоров на

свойства продуктов гидролиза 70

1. [Методика гидролиза НП водяным паром 71](#bookmark26)
2. [Методика гидротермального окисления НП Al и Al/AlN 71](#bookmark27)
3. [Методика изучения старения 71](#bookmark28)
4. Методика термической обработки продуктов реакции НП Al и

Al/AlN с водой 72

1. Методики иммобилизации наноструктур бемита на волокнах и

гранулах 73

1. Иммобилизация наноструктур бемита на различных

подложках 73

1. Методика гидрофилизации полимерных волокон

холодной плазмой 73

1. Методики исследования влияния плазменной обработки

полимерных волокон на их физико-химические характеристики 75

1. Методика модификации наноструктур бемита коллоидным

серебром 76

1. Методика получения гибридного адсорбента на основе

наноструктур бемита и ацетатцеллюлозных микроволокон 77

1. Методики изучения адсорбции наноструктур и гибридного

адсорбента в статических и динамических условиях 77

1. [Характеристики адсорбатов 77](#bookmark37)
2. [Адсорбция в статических условиях 79](#bookmark38)
3. [Адсорбция в динамических условиях 80](#bookmark39)
4. Определение массовой концентрации алюминия,

метиленового голубого, эозина, таниновой кислоты методом фотоколориметрии 81

1. Определение массовой концентрации Zn2+, Cd2+, Pb2+,

**з**

Cu , NO3 , H2AsO4 методом инверсионной вольтамперометрии 82

1. Определение концентрации латексных наносфер методом

нефелометрии 83

1. Определение концентрации микроорганизмов

микробиологическими методами анализа 83

1. Определение физико-механических свойств гибридного

адсорбента 84

1. [Определение размера пор «методом пузырька» 84](#bookmark45)
2. [Определение разрывной длины 84](#bookmark46)
3. [Определение пропускной способности 85](#bookmark47)
4. [Методики биотестирования гибридного адсорбента 85](#bookmark48)
5. Методика определения миграции компонентов в водную

вытяжку 87

1. Методики оценки токсичности и ранозаживляющего действия

[гибридного адсорбента 87](#bookmark99)

1. Оценка in vivo острой токсичности наноструктур бемита. 88
2. Оценка острой токсичности и местно-раздражающего

действия гибридного адсорбента 89

1. Исследование возможных мутагенных свойств

гибридного адсорбента 90

1. Оценка ранозаживляющей способности гибридного 93

адсорбента

1. [Обработка результатов 93](#bookmark55)

[ГЛАВА 3. Закономерности превращения электровзрывных НП Al и Al/AlN в водных средах 95](#bookmark58)

1. [Закономерности превращения НП Al 95](#bookmark59)
2. [Характеризация НП Al 95](#bookmark60)
3. [Закономерности взаимодействия НП Al с водой 98](#bookmark61)
4. Закономерности взаимодействия НП Al с водяным паром.. 105
5. [Закономерности окисления водой НП Al в гидротермальных условиях 107](#bookmark63)
6. [Закономерности превращения НП Al/AlN 109](#bookmark64)
7. [Характеризация НП Al/AlN 109](#bookmark65)
8. Влияние условий синтеза на закономерности окисления

НП Al/AlN 113

1. [Состав порошка 113](#bookmark67)
2. [Температура 117](#bookmark68)
3. [Начальный уровень рН 120](#bookmark69)
4. [Деагломерация прекурсора 121](#bookmark70)
5. Промежуточные продукты реакции окисления водой НП

Al/AlN 123

1. [Окисление НП Al/AlN в гидротермальных условиях 126](#bookmark72)
2. [Окисление в парах воды 128](#bookmark73)
3. Присутствие в реакционной среде микрогранул и

микроволокон 130

1. Механизм образования иерархических микро/наноструктур

бемита 139

Выводы по Главе 3 147

[Глава 4 Влияние термообработки наноструктур на их физико-химические характеристики 149](#bookmark76)

1. [Особенности терморазложения наноструктур 149](#bookmark77)
2. [Исследование текстурных характеристик наноструктур 153](#bookmark78)
3. [Электрокинетические характеристики наноструктур 157](#bookmark79)
4. Влияние термообработки на формирование кислотно-основных

центров поверхности наноструктур 159

1. Влияние термообработки наноструктур на изменение типов

поверхностных центров 162

1. Влияние термообработки наноструктур на адсорбцию

органических молекул 166

Выводы по Главе 4 176

[ГЛАВА 5. Разработка гибридных адсорбентов на основе иерархических микро/наноструктур бемита 178](#bookmark83)

1. Особенности формирования иерархических микро/наноструктур

бемита на поверхности стеклянных микроволокон 178

1. Формирование иерархических микро/наноструктур бемита на

поверхности полимерных микроволокон 184

1. Адсорбционные характеристики гибриднго бдсорбента на основе

ацетатцеллюлозных микроволокон и наноструктур бемита 190

1. Адсорбция неорганических ионов в динамическом

режиме 190

1. [Адсорбция метиленового голубого 192](#bookmark89)
2. [Адсорбция эозина 194](#bookmark91)
3. [Адсорбция таниновой кислоты 200](#bookmark93)
4. Адсорбция латексных сфер и живых культур

микроорганизмов 204

1. Вероятные механизмы адсорбции и роль зарядовых

взаимодействий 209

Выводы по Главе 5 213

[ГЛАВА 6. Функциональные свойства и применение гибридного адсорбента 215](#bookmark98)

* 1. Пропускная и удерживающая способность гибридного

адсорбента 215

* 1. [Удаление бактерий из водных растворов 218](#bookmark101)
  2. [Удаление из воды бактериального эндотоксина 219](#bookmark102)
  3. Импрегнирование гибридного адсорбента коллоидным серебром 220
  4. [Оценка токсичности гибридного адсорбента 227](#bookmark104)
     1. Биотестирование разработанного материала на

гидробионтах и люминисцентных бактериях 227

* + 1. Оценка *in vivo* острой токсичности наноструктур бемита.. 233
    2. Оценка острой токсичности и местно-раздражающего

действия гибридного адсорбента 234

* + 1. Исследование возможных мутагенных свойств

наноструктур бемита и гибридного адсорбента 235

* 1. [Фильтры AquaVallis на основе гибридного адсорбента 238](#bookmark109)
     1. Ресурсные испытания картриджей AquaVallis на основе

гибридного адсорбента 243

* 1. Перевязочный материал VitaVallis на основе гибридного

адсорбента 245

* + 1. Сравнение перевязочного материала на основе гибридного

адсорбента с аналогами 254

Выводы по Главе 6 257

[Заключение 259](#bookmark113)

[Список использованных источников 261](#bookmark114)

Приложение А. Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы ООО «Аквелит» 287

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Разработка новых высокоэффективных сорбционных материалов является актуальной задачей в связи с постоянным ростом уровня загрязнения воды антибиотками, красителями, бактериями и др., а также в связи с ужесточением требований к чистоте питьевой и технической воды. Актуальной областью использования сорбционных материалов является также создание перевязочных материалов для лечения инфицированных ран, основанного на очистке их от патогенной микрофлоры. В первую очередь это обусловлено мерами, направленными на борьбу с распространением антибиотикоустойчивых штаммов бактерий. Новым классом материалов, который активно исследуется для решения вышеописанных проблем, являются иерархические микро/наноструктуры. Совокупность таких свойств, как стабильность пористой структуры, большая площадь удельной поверхности и химическая активность, наличие системы открытых пор с большой долей доступной поверхности отвечают требованиям, предъявляемым к высокоэффективным и технологичным адсорбентам.

Перспективным компонентом сорбционных материалов являются иерархические микро/наноструктуры оксидов и гидроксидов алюминия, демонстрирующие высокую адсорбцию ряда опасных загрязнителей. Иерархические микро/наноструктуры оксида алюминия, которые обычно получают гидро- или сольвотермальным методом из солей алюминия в присутствии темплатов, загрязнены компонентами реакционной среды, что нежелательно в пищевых и биомедицинских приложениях. Кроме того, наноструктуры в форме порошка имеют ряд ограничений, вызванных пылением, недостаточной впитывающей способностью, уносом порошка в динамических режимах фильтрации. В связи с этим, актуальной задачей является разработка и развитие новых способов получения иерархических микро/наноструктур на основе оксидов алюминия, а также разработка гибридных адсорбентов на их основе.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно­исследовательских работ ИФПМ СО РАН «Научные основы создания перспективных композитных материалов и покрытий с функционализированной структурой для биомедицинских приложений» и на разных этапах была поддержана грантами: «Разработка технологии получения нановолокон на основе оксидов металлов для адсорбционных процессов» (ГК № 02.447.11.2008, 2005­2006 гг.); «Нетканый фильтрующий материал с применением нановолокон для очистки воздушных сред от загрязнений органического и неорганического происхождения» (ГК № 88, 2006-2007 гг.); «Разработка технологии и организация промышленного производства наносорбентов и устройств на их основе для получения микробиологически чистых растворов биомедицинского назначения и для пищевой индустрии» (ГК № 02.527.12.9010, 2007-2009 гг.); «Разработка промышленного образца антисептического перевязочного материала на основе нановолокон» (ГК № 242, 2008-2009); «Разработка технологических режимов получения нановолокон для образцов антисептического перевязочного материала» (2008-2009 гг.); «Разработка нового класса антисептических

материалов на основе электроположительных кристаллических нановолокон неорганических материалов» (ГК № 02.513.12.3047, 2008-2009 гг.); «Разработка научных основ синтеза антимикробного сорбента с дополнительными функциональными свойствами на основе трехкомпонентных наночастиц состава Al/AlN/Zn, Al/AlN/Fe, Al/ AlN/Cu» (2012 г.); «Разработка технологии и создание производства нового класса антисептических материалов различного назначения на основе кристаллических сорбентов нитридов металлов» (ГК № 14.527.12.0001, 2011-2013 гг.); Программ Президиума РАН - 27.17: ФНМ «Разработка научных основ синтеза нового антисептического материала на основе электроположительных нановолокон и изучение его антимикробных свойств» 2009-2010 гг., ФНМ-4 «Исследование механизмов антимикробного и ранозаживляющего действия нового антисептического материала на основе наноструктурного оксигидроксида алюминия» 2011 г; проект Российского научного фонда 14-23-00096 «Изучение факторов, обуславливающих

**9**

противоопухолевую активность низкоразмерных наноструктур на основе гидроксида алюминия, и исследование механизма их действия на опухолевые клетки» (2017-2019 гг.); проект ФЦП 14.604.21.0156 «Разработка наноматериалов на основе оксидов и гидроксидов Al и Fe, обеспечивающих направленную ионную модификацию биологических сред и потенцирование действия лекарственных препаратов, и создание на их основе эффективных гемостатических средств с антимикробным эффектом» (2017-2019 гг.).

**Степень разработанности темы исследования.** Наноструктуры на основе оксидов, гидроксидов и оксигидроксидов алюминия интересны как с практической точки зрения, так и для фундаментальной науки. Особый интерес представляют микро/наноструктуры в виде цветка. Это относительно новый объект, исследование синтеза, свойств и областей применения которого началось с развитием нанотехнологий и ведется в последние десятилетия. Несмотря на ряд исследований, посвященных взаимодействию электровзрывного нанопорошка алюминия с водой, авторами которых являлись Савельев Г.Г., Ляшко А.П., Ильин А.П., Яворовский Н.А., Волкова Г.И, Иванов В.Г., Громов А.А., Коршунов А.В. и др., данный процесс не рассматривался как способ получения наноструктурных оксидов, оксигидроксидов и гидроксидов алюминия с различной морфологией, текстурными и структурно-фазовыми характеристиками. Проведенные автором работы комплексного исследования процесса окисления водой нанопорошка (НП) алюминия (Al) и алюмонитридной композиции (Al/AlN) в различных условиях, позволили установить закономерности образования полых сфер, покрытых нанолистовыми структурами оксигидроксида алюминия в фазе бемита (AlOOH), гексагональных стержней байерита и нанопластинок бемита. Окисление НП Al и Al/AlN позволяет получать в мягких условиях наноструктуры AlOOH в виде цветка, не загрязненные анионами, что неизбежно при получении подобных наноструктур из солей алюминия.

Ф. Теппер и Лисецкий В.Н. создавали волокнистый сорбционный материал

на основе стеклянных и целлюлозных микроволокон, покрытых нановолокнами

оксигидроксида алюминия. При этом в своих работах они не рассматривали

**10**

закономерности формирования наноструктр оксида алюминия на макроповерхностях с различными характеристиками и не выявляли общие закономерности формирования гибридных адсорбентов при окислении нанопорошков алюминия в присутствии дисперсных частиц или полимерных микроволокон. Соискателем впервые разработаны способы получения гибридного адсорбента с использованием электровзрывных нанопорошков на основе Al и полимерных микроволокон, проведены исследования закономерностей формирования наноструктур AlOOH на поверхности различных микроволокон при окислении адсорбированных на их поверхности электровзрывных наночастиц (НЧ) Al или Al/AlN.

**Цель работы:**

Разработка научно-технических основ создания гибридных сорбционных материалов с положительным зарядом поверхности, включающих иерархически организованные микро/наноструктур бемита, для очистки воды и лечения ран.

Для достижения цели работы необходимо было решить следующие **задачи**:

* определить закономерности протекания реакции с водой электровзрывных нанопорошков Al и Al/AlN в зависимости от температуры, соотношения реагентов, давления, состава нанопорошков;
* исследовать характеристики продуктов реакции, в том числе после термической обработки;
* исследовать адсорбционные свойства синтезированных наноструктур по отношению к модельным загрязнителям разных классов: растворенных соединений, коллоидных частиц, живых культур микроорганизмов;
* разработать способ получения и испытать гибридный адсорбент, содержащий в качестве активного компонента иерархические микро/наноструктуры бемита.

**Научная новизна.**

1. Окисление водой электровзрывных порошков Al и Al/AlN в зависимости от

условий синтеза (состав порошков, температуры, рН, соотношение реагентов)

приводит к формированию частиц в виде иерархических микро/наноструктур

высокодисперсного бемита, нанопластинок бемита и гексагональных стержней

**11**

байерита. AlN в составе нанопорошков способствует полной конверсии Al и снижению времени его окисления за счет выделяющегося аммиака в процессе гидролиза. Предложен механизм формирования иерархических микро/наноструктур высокодисперсного бемита при окислении электровзрывных порошков Al и Al/AlN.

1. Сорбционные характеристики наноструктур, полученных окислением водой электровзрывных порошков Al и Al/AlN, определяются преобладанием на их поверхности основных центров Бренстеда, обуславливающих положительный заряд поверхности частиц в воде и обеспечивающих высокую скорость и большую емкость адсорбции по отношению к отрицательно заряженным частицам - анионам и микроорганизмам.
2. Впервые установлены закономерности формирования наноструктур бемита на поверхности полимерных волокон при окислении водой НЧ Al/AlN. Показано, что основной вклад в сорбционные свойства гибридного адсорбента вносит наноструктурный бемит.
3. Впервые проведены комплексные исследования токсичности *in vitro* и *in vivo* гибридного адсорбента. Показано, что материал не обладает цитотоксическим и генотоксическим действием. По ГОСТ 12.1.007-76 материал относится к IV классу опасности - «малоопасные вещества».
4. Разработаны научно-технические основы создания гибридных адсорбентов из полимерных микроволокон и наноструктурного бемита с положительным зарядом поверхности, которые заключаются в установлении оптимального состава и характеристик исходных материалов, оптимальных режимов формирования наноструктур бемита на поверхности полимерных волокон, а также в комплексных исследованиях гибридного адсорбента.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в диссертационном исследовании данные расширяют знания о реакции НЧ на основе алюминия с водой и о механизме формирования наноструктурных оксидов, гидроксидов и оксигидроксидов в объеме раствора и на твердых поверхностях различного состава.

Разработанные в диссертационном исследовании способы получения наноструктур бемита (AlOOH) и способы модифицирования ими волокнистых полимерных материалов, в частности, ацетатцеллюлозных микроволокон, закономерности их формирования и результаты исследования их сорбционных характеристик легли в основу технологии производства материала, производимого компанией ООО «Аквелит» (г. Томск) в виде промышленных партий высокотехнологичной медицинской продукции - сорбционно­бактерицидного перевязочного материала VitaValHs (ТУ 9393-002-73745952-2012) и основного компонента сменных фильтрующих элементов AquaVallis (ТУ 3697­016-01538612-2006). Производимая продукция имеет регистрационную документацию и Сертификаты соответствия, необходимые для реализации на территории РФ и за рубежом. Документы разработаны с использованием результатов диссертационного исследования. Предложенные технические решения защищены 7 патентами.

**Методология и методы исследования** основаны на изучении особенностей взаимодействия с водой наночастиц Al и Al/AlN в различных условиях и на исследовании характеристик продуктов окисления. Для этого были использованы методы аналитической химии, физико-химических и микробиологических методов анализа, в том числе: просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, инверсионная вольтамперометрия, спектрофотомерия, ИК-спектроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, эенргодисперсионный анализ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности формирования иерархических микро/наноструктур бемита в воде при линейном нагреве до 60 °С, с оценкой влияния состава и морфологии прекурсоров - электровзрывных нанопорошков Al и Al/AlN, на изменение температуры и состава реакционной среды, скорость реакции, конверсию и характеристики продуктов.
2. Параметры окисления водой электровзрывных нанопорошков Al и Al/AlN,

позволяющие получать наноструктурные и наноразмерные частицы с различной

**13**

морфологией в виде иерархических микро/наноструктур размером до 2 мкм, состоящих из нанолистов бемита толщиной 2-5 нм, гексагональных стержней байерита размером 50-500 нм и нанопластинок бемита размером 50-100 нм и толщиной 5-30 нм.

1. Особенности изменения морфологии, текстурных, зарядовых и сорбционных свойств иерархических микро/наноструктур бемита, гексагональных стержней байерита и нанопластинок бемита при термической обработке в интервале температур 300-1280 °С.
2. Способ получения гибридного адсорбента для микробиологической очистки воды и лечения ран с содержанием наноструктур 30-40 масс. %, включающий гетероадагуляцию НЧ Al и AlN/Al на поверхности микроволокон, реакцию НЧ с водой, формирование *in situ* иерархических микро/наноструктур бемита.
3. Теоретическое и экспериментальное обоснование адсорбции гибридным адсорбентом органических и неорганических анионов, отрицательно заряженных микро- и наночастиц в статических и динамических условиях за счет зарядовых взаимодействий.

**Личный вклад автора.** Автором диссертации проведено обоснование направления исследования, определена цель, задачи, осуществлен выбор путей и методов их решения. Самостоятельно разработана структура диссертационного исследования. Автором лично проведены исследования химического поведения электровзрывных порошков Al и Al/AlN в водных средах; проведены исследования морфологии, физико-химических и адсорбционных свойств наноструктур; разработаны методы получения гибридных адсорбентов; адсорбционная активность по отношению к модельным загрязнениям, включая живые культуры микроорганизмов, выполнялись совместно со Сваровской Н.В. и Лернером М.И., кинетические исследования выполнялись совместно с Бакиной О.В. и Казанцевым С.О. Токсическое действие и гигиеническая оценка материала осуществлялась в ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России (г. Томск) под руководством д.м.н., профессора В.Ю. Сереброва и д.м.н., А.А. Чучалина; в Лаборатории лекарственной токсикологии НИИ фармакологии СО РАМН (г.

**14**

Томск) под руководством д.м.н. А.А.Чурина и в ГУ НИИЭЧиГОС им. А.Н. Сысина РАМН (г. Москва) под руководством д.м.н. Р.И. Михайлова; в НИИ фармакологии и регенеративной медицины им. Е. Д. Гольдберга под руководством д.м.н. Дыгая А.М. Соискатель принимал участие в постановке задач, обсуждении и постановке методик испытаний, а также анализе полученных результатов биотестирования. Автором лично проведены анализ и обобщение полученных результатов, сформулированы выводы диссертационного исследования.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов обусловлена использованием современных физико-химических методов анализа и стандартных методик исследования и воспроизводимостью экспериментальных данных. Результаты диссертационного исследования были доложены на следующих конференциях: International Conference Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (Томск, 2015­2019); International Conference on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems (Томск, 2014); XII International Conference of Nanostructured Materials (Москва, 2014); 1-й Международной Российско-Казахстанской конференции по химии и химической технологии (Томск, 2011); Международном научно-практическом семинаре «Современные проблемы очистки воды. Наночастицы в водных объектах»; V Российско-Германском семинаре (Карлстом, Томск, 2010); IX Всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем» (Ижевск, 2010); Международной научно-технической конференции НФМ’10 «Нанотехнологии функциональных материалов» (С.-Петербург, 2010); V Международной конференции HEMs-2010 «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (Бийск, 2010); Научной конференции «Фундаментальные науки - медицине» (Новосибирск, 2010); Третьей Всероссийской конференции по наноматериалам НАНО-2009 (Екатеринбург, 2009); II Всероссийской конференции по наноматериалам НАНО- 2007 совместно с IV Международным семинаром «Наноструктурные материалы 2007: Беларусь - Россия» (Новосибирск, 2007); IV Международной научной

**15**

конференции «Химия, химическая технология и биотехнология на рубеже тысячелетий» (Томск, 2006); Третьей Всероссийской конференции (с международным участием) «Химия поверхности и Нанотехнология» (СПБ - Хилово, 2006); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2006).

**Публикации.** Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в 29 работах: 17 статей в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, из которых 7 опубликованы в переводных версиях журналов, индексируемых в БД SCOPUS; 7 статей в рецензируемых иностранных журналах, индексируемых в БД Web of Science и SCOPUS; 1 монография, 7 патентов. Также материалы диссертации опубликованы в тезисах докладов научных конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 288 стр. текста, включая 35 таблиц, 144 рисунка и 229 наименований литературных источников.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность и признательность сотрудникам ИФПМ СО РАН д.т.н. Лернеру М.И., к.х.н. Сваровской Н.В., к.х.н. Бакиной О.В., к.т.н. Глазковой Е.А., Казанцеву С.О за активную поддержку и помощь при проведении экспериментальных исследований; д.ф.-м.н. Шаркееву Ю.П. за ценные советы при подготовке диссертации; к.ф.-м.н. Миллеру А.А. за помощь при проведении электронно-микроскопических исследований; к.м.н. Пехенько В.Г. за помощь и консультации при проведении микробиологических экспериментов; директору ООО «Аквелит» Кириловой Н.В. за доведение научной разработки до высоктехнологичной продукции; чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Псахье С.Г. за поддержку, полезное общение и предоставленную возможность заниматься данной научной проблематикой, а также интересными исследовательскими проектами как в рамках настоящей работы, так и в течение работы в ИФПМ СО РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Электровзрывные нанопорошки Al и Al/AlN при взаимодействии с водой в зависимости от температуры, рН, давления и агрегатного состояния воды образуют бемит с морфологией нанопластинок, иерархических микро/наноструктур из нанолистов и байерит с морфологией гексагональных стержней.
2. Иерархические микро/наноструктуры бемита в виде полых сфер формируются при окислении нанопорошка Al в воде при условии сохранения поверхностного оксидного слоя наночастиц Al.
3. Реакционная способность нанопорошков Al/AlN увеличивается с ростом доли нитрида алюминия, в основном за счет снижения длительности индукционного периода, что связано с выделением аммиака при реакции нитрида алюминия с водой и повышения рН реакционной среды. Нанопорошки Al/AlN, содержащие более 60 масс. % нитрида алюминия при температуре 60 °С реагируют с водой без индукционного периода.
4. Наноструктуры оксида алюминия сохраняют морфологию предшественников при термической обработке вплоть до 1000 °С. При переходе в y-Al2O3 гексагональных стержней байерита площадь удельной поверхности

л

возрастает до 254 м /г за счет появления микропор.

1. Синтез наноструктур бемита может быть проведен *in situ* на различных подложках. Сплошность покрытия, формирующегося по механизму гетеронуклеации, определяется величиной свободной поверхностной энергии подложки и наличием поверхностных дефектов.
2. Токсичность гибридного адсорбента соответствует IV классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76 - «малоопасные вещества», отсутствие цитотоксичности и генотоксичности установлено комплексом исследований *in vitro* и *in vivo,* что подтверждает безопасность использования гибридного адсорбента в системах очистки воды и при лечении поверхностных ран.
3. Положительный заряд поверхности гибридного адсорбента обуславливает высокую эффективность удаления бактерий, вирусов, бактериального эндотоксина и других отрицательно заряженных в воде частиц, что позволяет использовать его в фильтрах микробиологической очистки воды.

Гибридный адсорбент при использовании в качестве перевязочного материала ускоряет процесс заживления инфицированных ран за счет удаления и удержания раневого экссудата, в том числе патогенной микрофлоры, стимуляции краевой эпителизации, защиты формирующейся грануляционной ткани от высыхания и ускорения ее созревания.