

На правах рукописи



Шашков Денис Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ
БИОРАЗЛАГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Краснодар – 2023

Работа выполнена на кафедре радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кубанский государственный университет".

Научный руководитель: **Джимак Степан Сергеевич**, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бармина Екатерина Владимировна**, доктор физико-математических наук, лаборатория макрокинетики неравновесных процессов Научного центра волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН (филиал), заведующий лабораторией

Севостьянов Михаил Анатольевич, кандидат технических наук, лаборатория прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится « 9 » февраля 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.320.03 Кубанского государственного университета по адресу: 350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кубанского государственного университета и на сайте www.kubsu.ru

Автореферат разослан «__» 20__ года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



Зарецкая М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень проработанности темы исследования

В настоящее время важным направлением использования наночастиц серебра (AgНЧ) является их введение непосредственно в структуру поверхности биоразлагаемых материалов. Это связано с разработкой новых высокотехнологичных методов переработки искусственных и природных полимеров. В ряде случаев обработанные таким образом материалы проявили сильную антибактериальную активность в отношении патогенных грамотрицательных и грамположительных бактерий [1, 2].

Следует учитывать, что свойства наночастиц зависят от условий их синтеза, физико-химического состояния восстановителей и стабилизаторов. В результате синтезированные наночастицы серебра могут существенно различаться по размеру, седиментационной и агрегативной устойчивости и, как следствие, по антимикробной активности [3–7].

В ряде работ изучен процесс сорбции AgНЧ на поверхности биоразлагаемых материалов различного происхождения [8, 9], который продемонстрировал существенные различия в сорбционной активности наночастиц в зависимости от структуры отдельных волокон. Повышенные антимикробные и цитотоксические свойства AgНЧ наблюдаются для более мелких наночастиц диаметром около 10 нм и менее (по сравнению с той же концентрацией AgНЧ с большим средним размером). Поскольку AgНЧ имеют большую суммарную площадь поверхности, ионы серебра (Ag^+) могут быстрее высвободиться из них, и поэтому их концентрация в ране обычно выше. Мелкие AgНЧ обладают большей химической активностью и обеспечивают бактериостатический эффект. Проведены отдельные эксперименты, которые определяют, что скорость взаимодействия наночастиц серебра с органическими и неорганическими сильно зависит от их формы [10, 11].

Таким образом, актуальным и перспективным направлением дальнейших исследований в этой области является разработка методов, направленных на увеличение количества AgНЧ малого диаметра (от 1 нм до 10 нм [1, 12]) на поверхности биоразлагаемых материалов после дополнительной обработки волокон сорбированными наночастицами под действием физических факторов (воздействие температуры ниже 273 К и ультрафиолетового излучения). Согласно недавним исследованиям [13], циклическая заморозка может способствовать дополнительному образованию наночастиц серебра [14]. На основании этого необходимо провести комплекс исследований по влиянию циклического воздействия температуры и интенсивности потока ультрафиолетового излучения на процессы модификации сорбированных наночастиц и их динамическое равновесие на поверхности как синтетических, так и органических биоразлагаемых материалов.

Цель диссертационной работы: на основе экспериментальных и теоретических исследований установить влияние физических факторов (циклического воздействия температур в диапазоне от 295 К до 233 К, воздействия ультрафиолетового излучения в диапазоне (280...400) нм) на формирование и адсорбцию наночастиц серебра на поверхности органических и неорганических биоразлагаемых материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Исследовать сорбционную активность наночастиц серебра на органических (волокна коллагена и шёлка) и неорганических (волокна гомополимера гликолевой кислоты, полипропилена, полиэфира этиленгликоля и терефталевой кислоты, полиамида и полиэфирные волокна с покрытием из фторполимеров) биоразлагаемых материалах.

2. Изучить влияние циклической заморозки при формировании однородных по размеру наноструктур, содержащих серебро, на поверхности органических и неорганических биоразлагаемых материалов.

3. Разработать и исследовать физико-математическую модель синтеза наночастиц серебра при воздействии ультрафиолетового излучения.

4. Рассмотреть влияние физических факторов (циклического воздействия температур в диапазоне от 295 К до 233 К, воздействие ультрафиолетового излучения в диапазоне (280...400) нм) на скорость формирования и размеры наночастиц серебра с помощью построенной физико-математической модели.

5. Установить влияние синтезированных наночастиц серебра с учетом воздействия физических факторов (циклического воздействия температур, а также ультрафиолетового излучения) на функциональную активность гетерогенных систем.

Научная новизна диссертационной работы определяется основными результатами, приведенными ниже:

1. Разработана новая физико-математическая модель синтеза наночастиц серебра, учитывающая параметры компонент. С ее помощью продемонстрирована возможность выбора оптимальных параметров физических факторов, воздействующих на процесс синтеза (интенсивность потока ультрафиолетового излучения и концентрация исходных реагентов).

2. Впервые исследована сорбционная активность наночастиц серебра на органических и неорганических биоразлагаемых материалах. Было установлено, что циклическое воздействие температуры (в диапазоне от 295К до 233К) приводит к снижению размеров наночастиц на поверхности неорганических материалов (до 10 нм) и на поверхности органических материалов (до 5 нм). Механизмами реализации наблюдаемых эффектов являются: образование дополнительных межмолекулярных водородных связей и ван-дер-ваальсового взаимодействия, электростатического взаимодействия и различным поверхностным зарядом выбранных полимеров, ускорение окислительно-восстановительных реакций с участием ионов

серебра, и образование на поверхности неорганических материалов карбонильных групп и кислорода сложноэфирных групп, способных взаимодействовать с AgНЧ.

3. Впервые установлено, что количество наночастиц малого размера (1...10) нм, адсорбирующихся на поверхности органических биоразлагаемых материалов ($6,6 \pm 0,33$ частиц на мкм^2) на 41 % больше, чем на поверхности неорганических биоразлагаемых материалов ($3,9 \pm 0,2$ частиц на мкм^2).

Практическая значимость работы

Процесс формирования наночастиц серебра напрямую зависит как от исходной концентрации реагентов используемых при синтезе ($[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{OH}$), так и от интенсивности потока ультрафиолетового излучения в процессе синтеза. Также установлено, что на поверхности органических материалов сорбируется большее (на 41%) количество AgНЧ малого размера, чем на поверхности неорганических материалов. Дополнительное воздействие в виде многократной заморозки образцов позволяет значительно усилить этот процесс. Полученные материалы, содержащие AgНЧ на поверхности, оказывают воздействие на функциональную активность гетерогенных систем (в частности на грамотрицательные бактерии *P. aeruginosa*, *A. baumannii* и *E. coli*).

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что количество наночастиц малого размера (1-10 нм), адсорбирующихся на поверхности органических материалов ($6,6 \pm 0,33$ частиц на мкм^2) больше на 41%, чем на поверхности неорганических материалов ($3,9 \pm 0,2$ частиц на мкм^2).

2. Установлено, что десятикратное циклическое воздействие температуры (в диапазоне от 295 К до 233 К) приводит к снижению размеров наночастиц, адсорбирующихся на поверхности биоразлагаемых неорганических материалов (увеличение числа частиц до 10 нм с $5,5 \pm 0,28$ частиц на мкм^2 до $52,8 \pm 2,64$ частиц на мкм^2) и на поверхности органических материалов (увеличение числа частиц до 10 нм с $2,5 \pm 0,13$ частиц на мкм^2 до $57,5 \pm 2,88$ частиц на мкм^2) за счет образования дополнительных межмолекулярных водородных связей и ван-дер-ваальсового взаимодействия, электростатического взаимодействия и различным поверхностным зарядом выбранных полимеров, ускорения окислительно-восстановительной реакции с участием ионов серебра, и наличием в составе карбонильных групп и кислорода сложноэфирной группы, способных взаимодействовать с AgНЧ.

3. Разработана физико-математическая модель синтеза наночастиц серебра, которая позволяет рассчитывать влияние интенсивности потока ультрафиолетового излучения на скорость синтеза наночастиц. Установлено, что при уменьшении интенсивности потока ультрафиолетового излучения с 5850 люкс до 548,43 (в 4 раза) люкс размер наночастиц не изменяется, при этом увеличивается общая длительность синтеза наночастиц серебра на 21 минуту, в связи с уменьшением числа восстанавливаемых атомов серебра.

4. С помощью физико-математической модели были выполнены расчеты процесса синтеза наночастиц при изменении интенсивности потока ультрафиолетового излучения (от 5850 люкс до 1460 люкс) и исходной концентрации аммиачного комплекса серебра ($0,0589 \text{ м}^{-3}$; $0,589 \text{ м}^{-3}$; $5,89 \text{ м}^{-3}$; $58,9 \text{ м}^{-3}$ и 589 м^{-3}). Установлено, что при увеличении исходной концентрации аммиачного комплекса скорости образования димеров серебра повышается в 1,52 раза, изменение среднего размера наночастиц (до 80% частиц размером 40 нм), а также к слипанию мелких наночастиц в крупные агломераты. При уменьшении концентрации снижается средний размер наночастиц (до 50% наночастиц размером 5 нм), при этом возрастает время синтеза (до 66,7 часов).

5. Установлено увеличение на 41,6% эффекта воздействия синтезированных наночастиц серебра на функциональную активность гетерогенных систем (*P. aeruginosa*, *A. baumannii* и *E. coli*) на волокнах из кетгута с адсорбированными наночастицами серебра по сравнению с раствором нитрата серебра.

Личный вклад автора

Вклад автора в постановку цели и задач исследования, интерпретацию результатов, является определяющим. Автором проведены эксперименты по синтезу наночастиц серебра в различных условиях (циклическое изменение температуры и воздействие ультрафиолетового излучения различной интенсивности светового потока); исследованы процессы сорбции и десорбции наночастиц серебра на поверхности биоразлагаемых неорганических и органических материалов; разработана физико-математическая модель синтеза наночастиц серебра, учитывающая параметры компонент.

Степень достоверности

Эксперименты проведены на поверенном оборудовании. Используются стандартные методики исследований. Решение уравнений физико-математической модели произведено на основе стандартных численных методов, в частности методом Рунге-Кутты первого порядка. Для вычислений использовалась программа, разработанная авторским коллективом (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664915). Электронную микроскопию синтезированных образцов AgНЧ выполняли на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7500F в режиме детектирования обратно отраженных и вторичных электронов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были доложены автором на следующих конференциях и семинарах:

I Всероссийская конференция с международным участием «Физика и экология электромагнитных излучений» (Агой, 2017), Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий (Краснодар, 2020), Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и

молодых ученых ВНКСФ-27 (Екатеринбург, 2023), Фундаментальные исследования, инновационные технологии и передовые разработки в интересах долгосрочного развития Юга России (Ростов-на-Дону, 2023), Всероссийская научно-практическая конференция «Математические методы и модели в решении прикладных задач» (Краснодар, 2023), XXVIII международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2023).

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных изданиях, в том числе: в 7 статьях в рецензируемых российских и международных научных изданиях из списка ВАК и наукометрических библиографических баз Scopus и Web of Science.

Структура диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список цитированной литературы. Содержание диссертации изложено на 137 страницах, включая 37 рисунков. Список цитируемой литературы представлен 318 источниками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и степень проработанности исследования, определены цель и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту. Отражены научная новизна, практическая значимость, личный вклад автора и апробация работы.

Глава I «Анализ современного состояния исследований в области синтеза и применения наночастиц серебра»

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований в области функциональных наноматериалов. Проведен анализ методов получения наночастиц серебра, установлено, что актуальной задачей является разработка коммерчески выгодного, экономичного, безвредного для окружающей среды и менее трудоемкого пути синтеза. Рассмотрены различные области практического применения наночастиц. Проведен анализ научной литературы, посвященной исследованию синтеза наночастиц серебра. Показано, что для увеличения эффективности процесса формирования наночастиц серебра малого размера, необходимо использовать внешние физические воздействия. Сделан вывод о необходимости построения физико-математической модели с учетом воздействия ультрафиолетового излучения и исходной концентрации реагентов для расчета параметров внешних воздействий на процесс синтеза наночастиц серебра.

Глава 2 «Физико-математическая модель синтеза наночастиц серебра методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления»

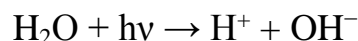
Для описания процесса синтеза наночастиц серебра была разработана физико-математическая модель, при этом был сделан ряд упрощений: температура постоянна, все параметры усреднены по пространству (зависимость от пространственных переменных не рассматривается).

Ниже описаны стадии процесса синтеза наночастиц серебра из аммиачного комплекса:

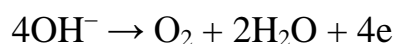
1. Под воздействием температуры молекула воды H_2O распадается с образованием двух ионов:



2. Квант ультрафиолетового (УФ) излучения $h\nu$ поглощается молекулой воды H_2O с образованием двух ионов:



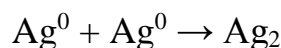
3. Четыре иона воды рекомбинируют, высвобождая свободные электроны:



4. Серебро восстанавливается в металлическую форму, поглощая электрон:



5. Сборка кластеров серебра. На второй стадии реализуется последовательная поатомная сборка кластеров серебра, начиная с двух и трехатомных структур (димеров и тримеров):



Для описания процесса синтеза были введены следующие коэффициенты:

- $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрация воды (количество на единицу объема, соответствующее 100%-й концентрации);
- n_{H^+} – концентрация ионов H^+ в воде;
- n_{OH^-} – концентрация ионов OH^- в воде;
- $n_{h\nu}$ – концентрация УФ-квантов;
- n_{e^-} – концентрация электронов;
- n_{AgNH_3} – концентрация аммиачного комплекса $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{OH}$;
- n_{Ag} – концентрация атомов серебра Ag ;

- n_{Ag_2} – концентрация димеров серебра Ag_2 .
 K_D – константа диссоциации воды при заданной температуре;
 K_R – константа рекомбинации воды при заданной температуре;
 K_{hv} – константа диссоциации воды при поглощении фотона;
 K_{OH} – константа рекомбинации ионов OH^- ;
 K_{e^-} – константа поглощения электронов;
 K_{Ag_2} – константа образования димеров серебра Ag_2 .

Значения констант приведены в табл.1, значения выражены в долях к общему объему реакционной смеси.

Таблица 1 – Значения переменных, входящих в уравнения 1-12.

Обозначение параметра	Значение параметра в момент времени $t=0$
n_{H_2O}	0,999714118
n_{H^+}	1,79949E-10
n_{OH^-}	1,76459e-4
n_{hv}	0,01967166
n_{e^-}	0
n_{AgNH_3}	0,000105933
n_{Ag}	0
n_{Ag_2}	0
K_D	4,60976e-10
K_R	4,6092992e-4
K_{hv}	1,96
K_{OH}	0,962705
K_{e^-}	2,777778646
K_{Ag_2}	4,0101

На основе принципов химической кинетики построены дифференциальные уравнения, описывающие процесс синтеза наночастиц [17]:

Уравнение для описания зависимости концентрации ионов H^+ от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{H^+}(t) = K_D n_{H_2O}(t) + K_{hv} n_{H_2O}(t) n_{hv}(t) - K_R n_{H^+}(t) n_{OH^-}(t) - K_e n_{AgNH_3}(t) n_e(t) n_{H^+}(t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{H^+} = K_D n_{H_2O} + K_{hv} n_{H_2O} n_{hv} - K_R n_{H^+} n_{OH^-} - K_e n_{AgNH_3} n_e n_{H^+}, \quad (2)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации ионов OH^- от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{OH^-}(t) = K_D n_{H_2O}(t) + K_{hv} n_{H_2O}(t) n_{hv}(t) - K_R n_{H^+}(t) n_{OH^-}(t) - 4K_{OH} n_{OH^-}^4(t), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{OH^-} = K_D n_{H_2O} + K_{hv} n_{H_2O} n_{hv} - K_R n_{H^+} n_{OH^-} - 4K_{OH} n_{OH^-}^4, \quad (4)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации электронов e^- от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(t) = 4K_{OH} n_{OH^-}^4(t) - K_e n_{AgNH_3}(t) n_e(t) n_{H^+}(t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e = 4K_{OH} n_{OH^-}^4 - K_e n_{AgNH_3} n_e n_{H^+}, \quad (6)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации аммиачного комплекса $[Ag(NH_3)_2]OH$ от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{AgNH_3}(t) = -K_e n_{AgNH_3}(t) n_e(t) n_{H^+}(t), \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{AgNH_3} = -K_e n_{AgNH_3} n_e n_{H^+}, \quad (8)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации атомов серебра Ag^0 от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{Ag^0}(t) = K_e n_{AgNH_3}(t) n_e(t) n_{H^+}(t) - 2K_{Ag_2} n_{Ag^0}^2(t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{Ag^0} = K_e n_{AgNH_3} n_e n_{H^+} - 2K_{Ag_2} n_{Ag^0}^2, \quad (10)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации димеров Ag_2 от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{Ag_2}(t) = K_{Ag_2} n_{Ag^0}^2(t), \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{Ag_2} = K_{Ag_2} n_{Ag^0}^2, \quad (12)$$

Задачи 1-12 была решена с помощью стандартных численных методов, в частности методом Рунге-Кутты первого порядка. Для вычислений использовалась программа, разработанная авторским коллективом (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

С помощью физико-математической модели процесса кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления были получены графики зависимости концентрации аммиачного комплекса, атомарного серебра и димеров серебра от времени (рисунки 1-4) при различной интенсивности

потока ультрафиолетового излучения. За единицу интенсивности потока УФ излучения взята величина 5850 люкс [17].

При исходных параметрах процесс восстановления серебра происходит быстро (рис 1.1), концентрация аммиачного комплекса (А) падает до нуля в первые 15 минут синтеза, это означает, что все серебро в растворе перешло в атомарную форму. Концентрация атомарного серебра (В) вначале резко возрастает (12 минута), до момента падения концентрации аммиачного комплекса до нуля, а затем плавно снижается в процессе формирования наночастиц. Концентрация димеров серебра (С) и, как следствие, наночастиц серебра практически не растет до момента насыщения раствора атомарным серебром. В дальнейшем при снижении концентрация атомарного серебра (В), процесс формирования наночастиц практически останавливается (51 минута).

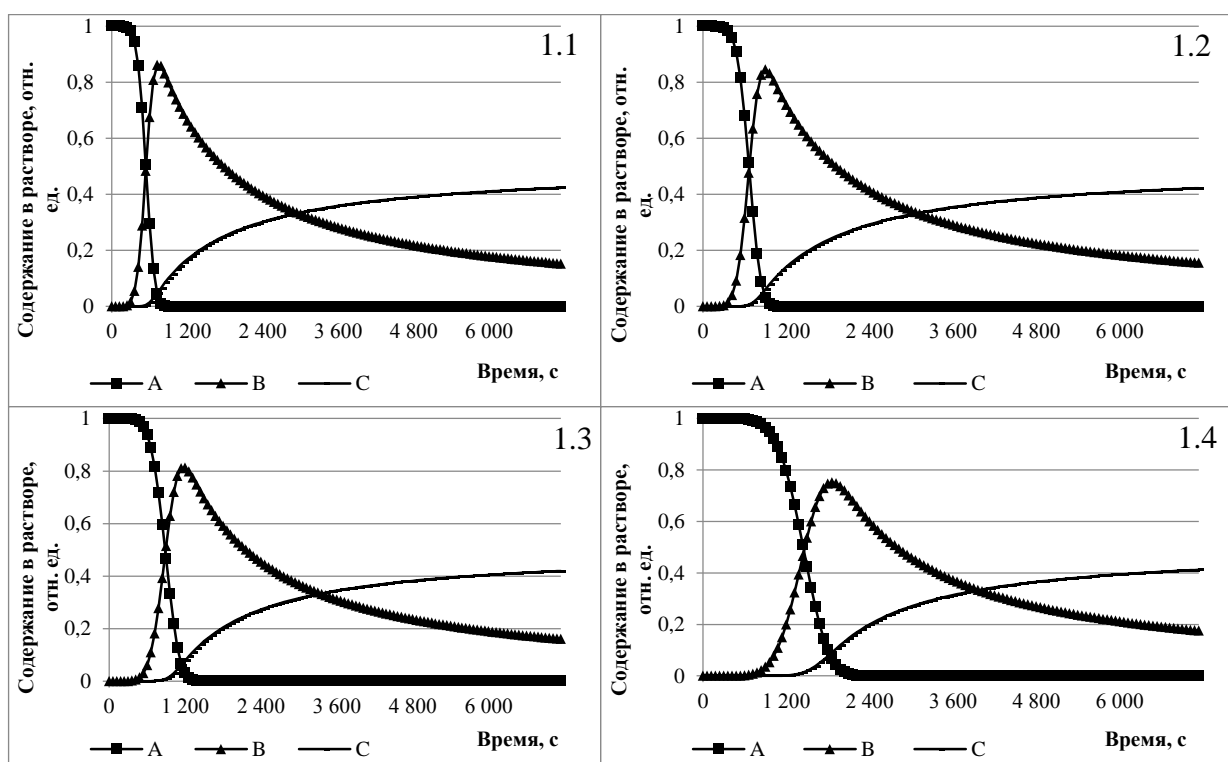


Рисунок 1 – Зависимость концентрации от времени при изменении интенсивности потока УФ излучения

Примечание: 1.1 – при 1 интенсивности потока УФ; 1.2 – при 0,75 интенсивности потока УФ; 1.3 – при 0,5 интенсивности потока УФ; 1.4 – при 0,25 интенсивности потока УФ; А – Зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В – Зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С – Зависимость концентрации димеров серебра от времени)

Интенсивность потока УФ, обратно пропорциональна времени преобразования аммиачного комплекса в атомарное серебро рис (1.1-1.4), Снижение интенсивности потока УФ излучения в 4 раза приводит к возрастанию времени синтеза наночастиц на 21 минуту. Размер наночастиц зависит от кривизны графика С, и в данном случае не изменяется.

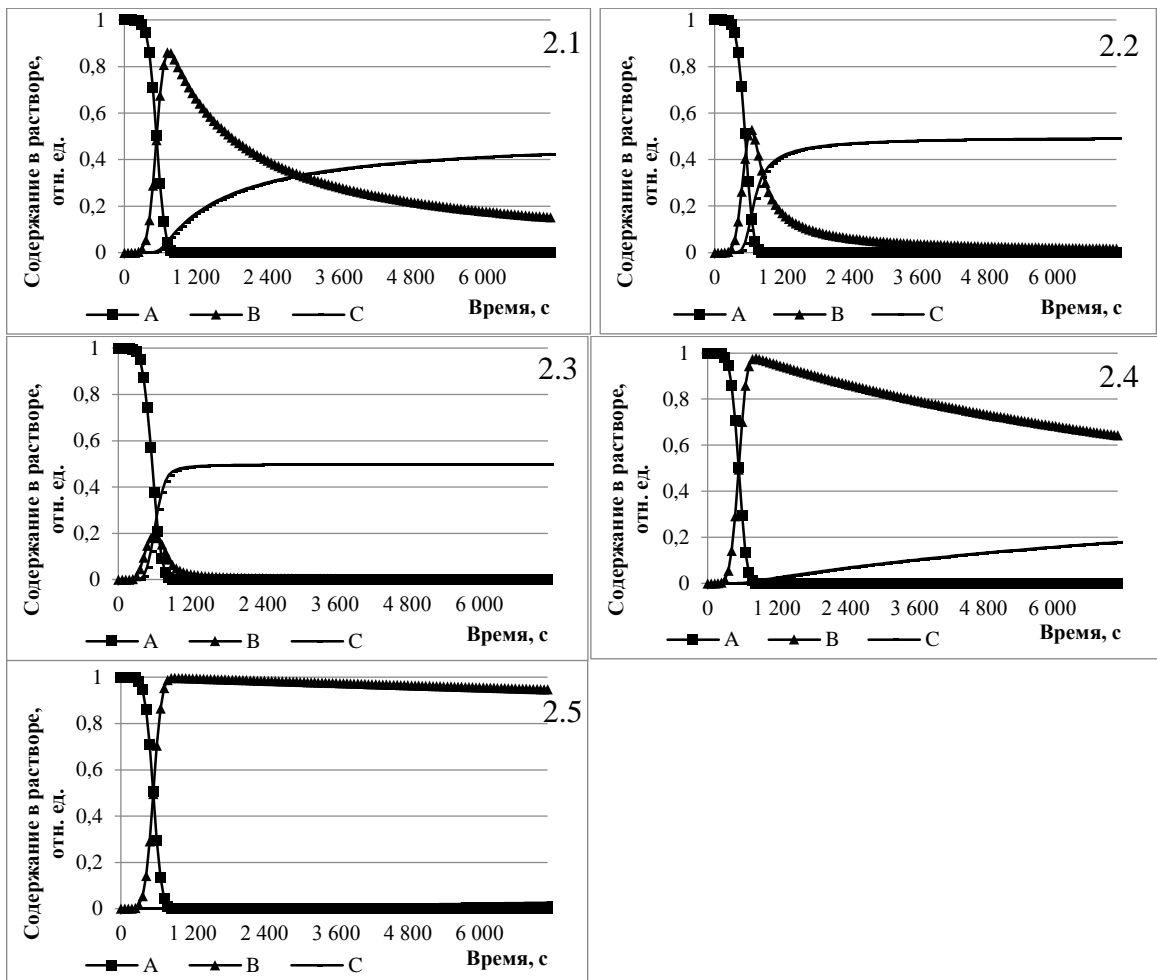


Рисунок 2 – Зависимость концентрации наночастиц от времени при изменении концентрации аммиачного комплекса серебра

Примечание: 2.1 – при исходной концентрации; 2.2 – при увеличении исходной концентрации в 10 раз; 2.3 – при увеличении исходной концентрации в 100 раз; 2.4 – при уменьшении исходной концентрации в 10 раз; 2.5 – при уменьшении исходной концентрации в 100 раз; А – Зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В – Зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С – Зависимость концентрации димеров серебра от времени).

При исходной концентрации аммиачного комплекса (рис. 2.1) процесс восстановления серебра происходит быстро, концентрация аммиачного комплекса (А) падает до нуля в первые 15 минут синтеза, это означает, что все серебро в растворе перешло в атомарную форму. Концентрация атомарного серебра (В) вначале резко возрастает, до момента падения концентрации аммиачного комплекса до нуля, а затем плавно снижается в процессе формирования наночастиц. Концентрация димеров серебра (С) и, как следствие, наночастиц серебра практически не растет до момента насыщения раствора атомарным серебром. В дальнейшем при снижении концентрация атомарного серебра (В), процесс формирования наночастиц практически останавливается. В следствии увеличения концентрации в 10 раз процесс

восстановления серебра происходит активнее, концентрация аммиачного комплекса (А) падает до нуля в первые 15 минут синтеза в обоих случаях, при том, что концентрация возросла. Концентрация атомарного серебра (В) в обоих случаях ведет себя одинаково, однако максимальное значение снижено на 41,5%, что означает повышенную скорость перехода атомарного серебра в форму наночастиц. Концентрация димеров серебра (С) и, как следствие, наночастиц серебра практически не растет до момента насыщения раствора атомарным серебром. В дальнейшем при снижении концентрация атомарного серебра (В), процесс формирования наночастиц практически останавливается.

Описанный процесс полностью согласуется с полученными ранее экспериментальными результатами [18, 19].

Дальнейшее увеличение концентрации аммиачного комплекса практически не влияет на время восстановления серебра, график аммиачного комплекса (А) снижается до нуля за одинаковое время (рис. 2.3). Изменение концентрации атомарного серебра (В) значительно меняется, уменьшаясь в 4,48 раза. В то же время скорость образования димеров серебра (С) возрастает в 1,52 раза.

Снижение концентрации аммиачного комплекса приводит к снижению скорости восстановления серебра (рис. 2.4), при уменьшении исходной концентрации в 10 раз, концентрация аммиачного комплекса (А) падает до нуля в первые 15 минут синтеза в обоих случаях, при том, что концентрация уменьшилась в 10 раз. Концентрация атомарного серебра (В) начинает падать линейно, что означает резкое уменьшение скорости формирования наночастиц. Концентрация димеров серебра (С) и, как следствие, наночастиц растет крайне медленно, чем исходный график. В дальнейшем при снижении концентрация атомарного серебра (В), процесс формирования наночастиц практически останавливается.

Дальнейшее уменьшение концентрации аммиачного комплекса (рис. 2.5) приводит к ещё большему уменьшению скорости формирования наночастиц. График зависимости димеров серебра (С) становится практически линейным, процесс синтеза занимает 66 часов 40 минут.

Из вышесказанного следует, что исходная концентрация аммиачного комплекса оказывает различное воздействие на процесс формирования наночастиц серебра. Повышение концентрации вызывает увеличение вероятности взаимодействия частиц и как следствие скорость формирования синтезируемых частиц. Снижение концентрации приводит к резкому увеличению времени синтеза наночастиц серебра.

Таким образом, для описания процесса синтеза наночастиц серебра методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления разработана и апробирована физико-математическая модель.

С помощью представленной модели получены временные зависимости концентрации исходных, промежуточных и конечных продуктов реакции. Получены зависимости процесса синтеза от исходной концентрации аммиачного комплекса серебра. Выявлено влияние ультрафиолетового излучения на процесс синтеза наночастиц.

Глава 3 «Исследование сорбционной активности наночастиц серебра на поверхности органических и неорганических биоразлагаемых волокон»

Проведено исследование сорбционной активности синтезированных путем кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления наночастиц серебра в составе гелевых композиций с желатином на волокнах естественного (кетгут) и искусственного (капроаг) происхождения [18, 19].

В экспериментах были использованы свежеприготовленные наночастицы серебра, полученные методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления. Метод предусматривает восстановление ионов серебра в присутствии поливинилпирролидона в условиях непрерывного перемешивания, а также комплексного совместного воздействия ультрафиолетового излучения (длина волны 280–400 нм) и ультразвуковых волн (частота излучения 1,7 МГц) в течение 60 минут. Затем полученный водный раствор наночастиц серебра разбавляли дистиллированной водой до концентрации наночастиц 5 мкг/мл, после чего при подогреве до 333 К вносили желатин, конечная концентрация которого составила 0,9%.

При экспозиции в гелевой композиции, содержащей наночастицы Ag, в первый час выявлена высокая сорбционная активность (частиц размером от 1 до 10 нм) по отношению к синтетическому материалу в сравнении с кетгутом, тогда как через 24 часа экспозиции наблюдали значительное возрастание доли AgНЧ (до 50%, $p < 0,05$) на коллагеновых волокнах, что превышало аналогичные показатели капроага на 46,4% ($p < 0,05$).

При этом через 24 часа (рис. 3) среднее количество наночастиц размером свыше 40 нм возросло на поверхности искусственного биоразлагаемого волокна, превышая аналогичные показатели содержания крупных AgНЧ на кетгута в 19 раз ($p < 0,05$).

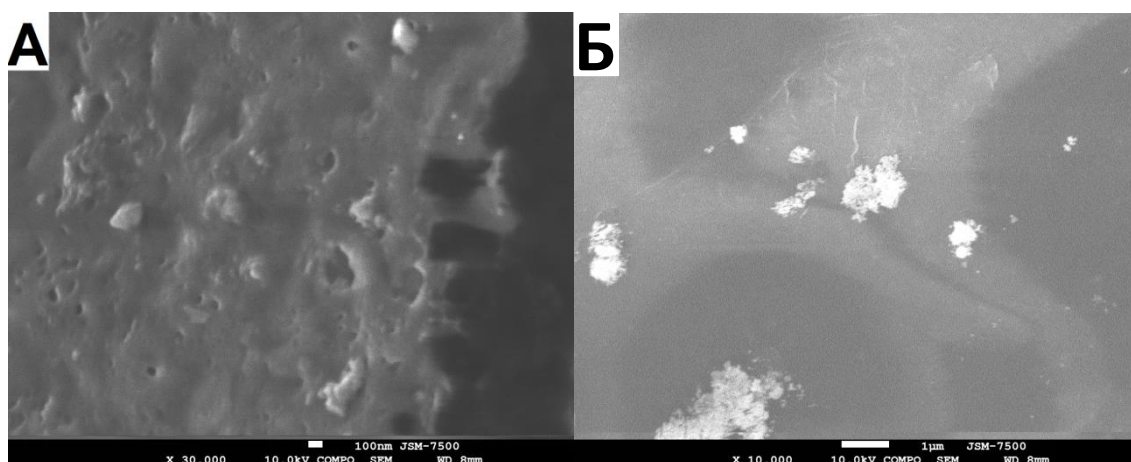


Рисунок 3 – Микрофотографии наночастиц серебра после экспозиции в аргогеле в течение 1 суток волокон кетгута (А) и капроага (Б)

Полученные данные говорят об повышении взаимодействия между различными по происхождению наночастицами серебра и функционализированной поверхностью коллагенового волокна, что, обусловлено повышенным сродством AgНЧ к карбоксильным, гидроксильным, карбонильным и первичными аминогруппам, а также азотсодержащим гетероциклическим боковым радикалам аминокислот, входящих в состав полипептидной цепи коллагена. Подобные их взаимодействия замедляют процесс десорбции и агломерации малых AgНЧ, что позволяет получить наночастицы до 10 нм для достижения ожидаемого антимикробного эффекта. Выявлено, что синтетические полимеры на основе полиамида 6.6, для создания функционализированных антимикробных материалов, должны быть помещены гелевую композицию (содержащей AgНЧ, полученные методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления), на один час, так как при данных условиях биоразлагаемые волокна естественного происхождения содержат на их поверхности исключительно агломератов размером свыше 40 нм. Подобные результаты были получены для других синтетических материалов (Фторекс, Дексон, Монофил, Полиэстер).

Проведено исследование сорбционной активности различных по происхождению наночастиц серебра на шовном материале, состоящем из органических и неорганических биоразлагаемых волокон, при циклической заморозке. [20-22]

В случае полированных коллагеновых волокон было доказано, что дополнительная механическая обработка поверхности волокна способствует сорбции на ее поверхности наиболее функционально активных наночастиц диаметром от 1 до 5 нм (рис. 4). Такое количество сравнительно малых наночастиц на поверхности волокон является следствием их образования в результате окислительно-восстановительной реакции между ионами серебра и катехиновыми фрагментами полимера, являющегося производным желатина. При этом в одном из исследований было указано, что получаемые AgНЧ размером до 20 нм проявляли значительный антимикробный эффект как в отношении грамотрицательных, так и грамположительных бактерий [16].

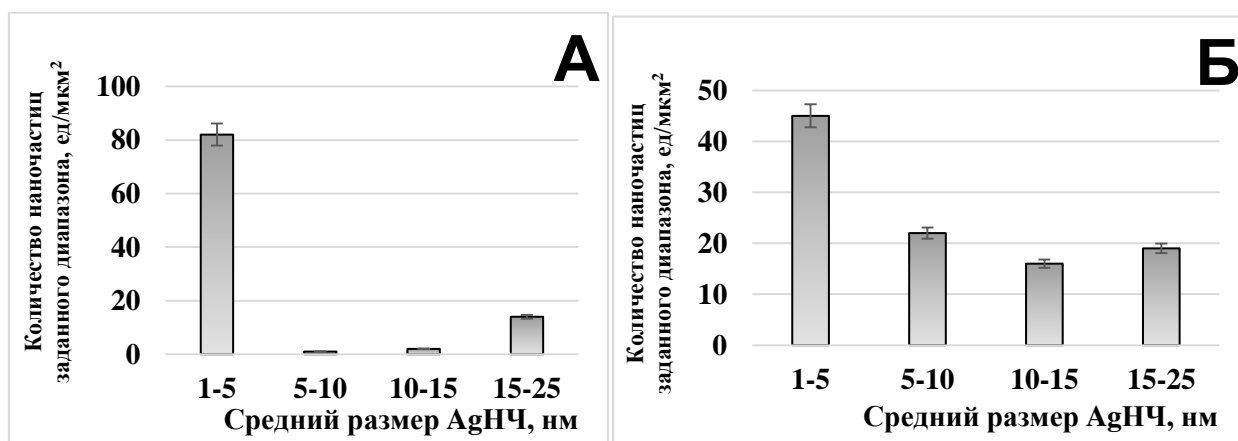


Рисунок 4 – Распределение наночастиц серебра по размерам, полученное при анализе электронной микрофотографии после экспозиции в аргогеле в течение 1 суток волокон кетгута (А) и капроага (Б)

Также они активно захватывались матрицей гидрогеля с последующим замедленным высвобождением их из этой матрицы (8,7% в течение 14 дней), что снижало цитотоксичность наночастиц, демонстрируя более высокую биосовместимость AgНЧ в сочетании с антибактериальной активностью *in situ*. Описанная окислительно-восстановительная реакция в данном эксперименте была ускорена за счет дополнительной циклической температурной обработки (до 233 К) волокон кетгута с сорбированными AgНЧ.

Анализ полученных микрофотографий позволил выявить увеличение общего количества AgНЧ после выполнения циклической заморозки/разморозки на поверхности шовного материала Монофил на основе полипропилена (рис. 5).

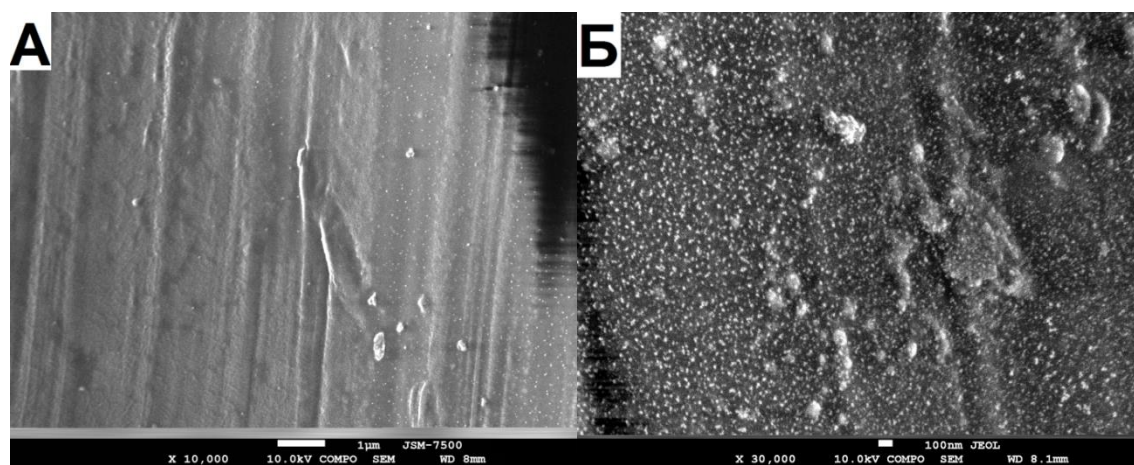


Рисунок 5 – Электронные микрофотографии шовного материала монофил на основе полипропилена до выполнения циклической заморозки при увеличении в 10 000 раз (А) и после при увеличении в 30 000 раз (Б).

Несмотря на увеличение общего количества наночастиц свыше 25 нм их относительное количество остается небольшим, что практически исключает возможную агрегацию наночастиц серебра, либо свидетельствует об активной десорбции сравнительно крупных Ag-содержащих частиц

Наблюдаемые явления сорбции и агломерации наночастиц на поверхности полированных коллагеновых волокон придают последним антисептические свойства, в том числе в отношении возбудителей бактериальных и вирусных инфекций. Преобладание в данном случае наночастиц диаметром до 5 нм (56,2% от общего количества сорбированных AgНЧ, рис. 6) может способствовать не только разрушению даже зрелых биопленок, формируемых на поверхности инфицированных ран, особенно при замедленном высвобождении наночастиц из гелевой композиции на основе желатина, но и возникновению за счет этого еще и дополнительных условий для снижения цитотоксичности наночастиц серебра *in situ*.

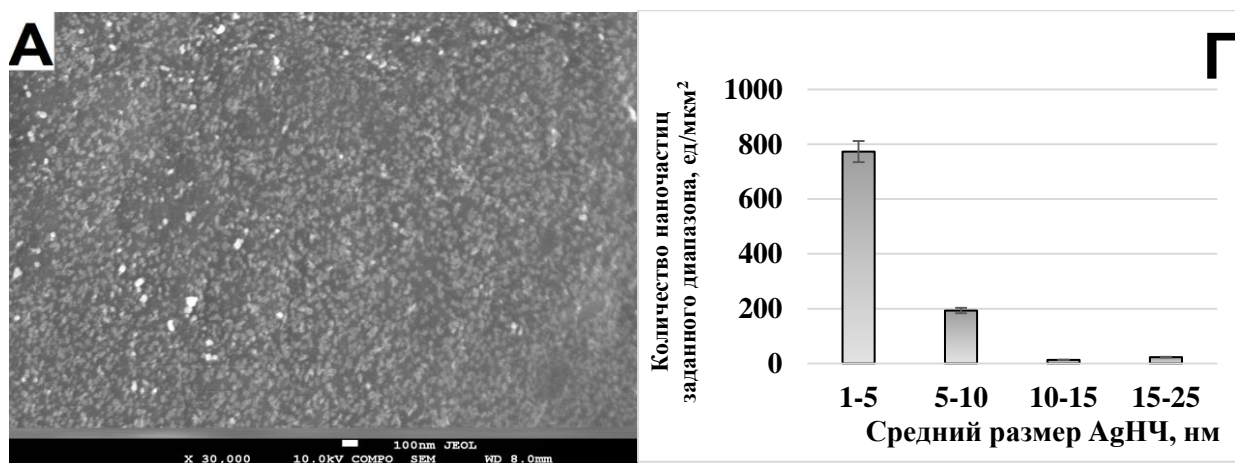


Рисунок 6 – Пример электронной микрофотографии полированного кетгута после температурной обработки методом 10-кратной заморозки/разморозки с увеличением в 30 000 раз при использовании разработанной гелевой композиции (А); дисперсия AgНЧ на электронных микрофотографиях в зависимости от размера наночастиц (Б).

Наилучшие результаты показали волокна естественного происхождения (в частности, коллагеновые), на их поверхности сорбировалось большее количество наночастиц меньшего размера, что, обусловлено схожестью AgНЧ с полипептидной цепью коллагена.

Применение циклической заморозки активирует линейную агрегацию AgНЧ на волокнах, что приводит к селективному ускорению регенерации ионов серебра на поверхности. Таким образом, циклическая заморозка способствует повышенной сорбции AgНЧ на поверхности материалов различной природы, однако лучшие результаты получены на полированных коллагеновых волокнах. Дополнительная механическая обработка поверхности волокна может способствовать сорбции на ее поверхности наиболее функционально активных наночастиц диаметром от 1 до 5 нм.

Глава 4 «Практическое применение материалов с наночастицами серебра»

Проведено исследование по сравнению функциональной активности бактерий при помещении в питательную среду отдельных компонент, принимающих участие в синтезе наночастиц, и самих наночастиц.

Установлено, что нитрат серебра в концентрации 1 и 10 мкг/мл не изменяет активность исследуемых образцов *P. aeruginosa* и *A. baumannii*: все тест-культуры давали видимый рост в жидкой питательной среде с препаратом (табл. 1), но в то же время подавляет активность *E. coli* в концентрации 10 мкг/мл. При концентрации нитрата серебра 50 мкг/мл видимый рост в жидкой питательной среде отсутствовал, однако контрольное измерение показало наличие отдельных живых особей. Полностью подавлял рост всех образцов нитрат серебра только в концентрации 100 мкг/мл.

Лиганд (поливинилпирролидон) не оказал никакого воздействия на

представленные образцы в концентрациях от 1 до 100 мкг/мл: все тест-культуры показали высокую функциональную активность в растворе. (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ антимикробной активности растворов наносеребра, нитрата серебра и лиганда

Бактерии	Исследуемое вещество											
	Нитрат серебра				Лиганд				Наночастицы серебра			
	Концентрация исследуемого вещества, мкг/мл											
	100	50	10	1	100	50	10	1	100	50	10	1
Количество изолятов, давших рост												
<i>P. aeruginosa</i>	0	0	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0
<i>A. baumannii</i>	0	0	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0
<i>E. coli</i>	0	0	0	5	5	5	5	5	0	0	0	0

Коллоидный раствор с наночастицами серебра, полученный методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления снижал активность во всех исследованных концентрациях (табл. 1).

Высокая активность раствора с наночастицами серебра в отношении условно-патогенных изолятов *E. coli* позволит использовать полученного коллоидного раствора в концентрации 1 мкг/мл в качестве основы для моющих средств, в том числе в социальных учреждениях при наличии аллергических реакций на традиционные моющие средства (лизоформин, аламинол и др.) у персонала и посетителей.

Кроме того, был проведен эксперимент по моделированию гнойной раны у лабораторных животных с применением раневых покрытий, содержащих AgНЧ. Установлено, что у группы животных, получавших лечение с применением наночастиц серебра, процесс заживления гнойной раны проходил значительно быстрее (был завершен на пятые сутки, у других групп более семи суток) и легче (на 40%) чем у других подопытных групп.

Полученные AgНЧ в комбинации с гелирующим агентом желатином имеют перспективы применения в медицине или ветеринарии для придания антибактериальных свойств шовному материалу.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработана и апробирована новая физико-математическая модель для описания процесса синтеза наночастиц серебра. С помощью модели исследовано влияние ультрафиолетового излучения на процесс синтеза наночастиц. Исходная интенсивность потока УФ излучения, принятая за единицу в модели, соответствует величине 5850 люкс с длиной волны 280-400 нм. Определены временные зависимости концентрации исходных, промежуточных и конечных продуктов реакции.

2. С помощью построенной математической модели исследовано влияние физических факторов (интенсивность потока ультрафиолетового излучения и концентрация исходных реагентов) на скорость формирования и размеры наночастиц серебра. При уменьшении интенсивности потока УФ излучения в 4 раза, время синтеза наночастиц увеличивается на 21 минуту (30 %) и практически не влияет на размер наночастиц. Повышение исходной концентрации аммиачного комплекса приводит к увеличению скорости образования димеров серебра в 1,52 раза, росту размеров наночастиц (до 80% частиц размером 40 нм) а также к объединению мелких наночастиц в крупные агломераты. Снижение концентрации приводит к уменьшению размера наночастиц (до 50% наночастиц размером 5 нм), но также увеличивает время синтеза (66,7 часов).

3. Установлено, что количество наночастиц малого размера (1-10 нм), адсорбирующихся на поверхности органических биоразлагаемых материалов $6,6 \pm 0,33$ частиц на мкм^2 , на поверхности неорганических биоразлагаемых материалов $3,9 \pm 0,2$ частиц на мкм^2 .

4. Установлено влияние циклической заморозки (в диапазоне от 295 К до 233 К) при формировании однородных наноструктур, содержащих серебро, на поверхности органических и неорганических биоразлагаемых материалов. Наилучшие результаты сорбции и агломерации наночастиц наблюдали на поверхности полированных коллагеновых волокон, увеличение числа частиц с 10 нм с $2,5 \pm 0,13$ частиц на мкм^2 до $57,5 \pm 2,88$ частиц на мкм^2 . В случае неорганических волокон было отмечено увеличение числа частиц до 10 нм с $5,5 \pm 0,28$ частиц на мкм^2 до $52,8 \pm 2,64$ частиц на мкм^2 .

5. Экспериментально установлено снижение функциональной активности грамотрицательных бактерий *P. aeruginosa*, *A. baumannii* на 50% и *E. coli* на 25% при воздействии на них наночастицами серебра по сравнению с раствором нитрата серебра (уменьшение выхода клеточной биомассы на 50% *P. aeruginosa*, *A. Baumannii* и на 25% *E. coli* при обработке нитратом серебра, уменьшение выхода клеточной биомассы на 100% *P. aeruginosa*, *A. Baumannii*, *E. coli* обработке наночастицами).

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

1. Джимаков С.С., Малышко В.В., Горячко А.И., Соколов М.Е., Басов А.А., Моисеев А.В., Шашков Д.И., Копытов Г.Ф., Барышев М.Г., Исаев В.А. Сорбционная активность наночастиц серебра // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 2 (734). С. 114-122.

2. Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Горячко А.И., Шарафан М.В., Чуркина А.В., Моисеев А.В., Шашков Д.И., Лясота О.М. Оценка выраженности сорбционной активности наночастиц серебра на биоразлагаемых волокнах естественного и искусственного происхождения // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 2 (758). С. 57-62.

3. Джимак С.С., Шашков Д.И., Малышко В.В., Моисеев А.В., Копытов Г.Ф. Формирование однородных наноструктур, содержащих серебро, на поверхности полимера гликолевой кислоты при циклической заморозке // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 6 (763). С. 62-67.

4. Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Басов А.А., Моисеев А.В., Власов Р.В., Фролов В.Ю., Шашков Д.И. Влияние циклической заморозки на сорбцию наночастиц серебра полированными коллагеновыми волокнами // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 8 (777). С. 86-90.

5. Шашков Д.И., Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Лыкова А.В., Моисеев А.В., Демин Н.Н., Джимак С.С., Барышев М.Г. Влияние циклической заморозки на динамику нанокластеров серебра на поверхности полипропиленовых и полиэфирных волокон // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 2 (771). С. 121-125.

6. Шашков Д.И., Малышко В.В., Дроботенко М.И., Джимак С.С. Физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2023. Т. 20. № 3. С. 86-92.

Дополнительные публикации

7. Malyshko V.V., Fedulova L.V., Sokolov M.E., Moiseev A.V., Basov A.A., Dorokhova A.A., Shashkov D.I., Dzhimak S.S. Effect of alginate fabric dressing with silver nanoparticles on the course of wound process in laboratory animals // Biophysics, 2023, 68(2), P 295–301.

8. Власов Р.В., Малышко В.В., Федосов С.Р., Шашков Д.И. Оптимизация физико-химических условий, используемых для получения наночастиц серебра // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-7. С. 1397-1400.

9. Шашков Д.И., Басов А.А., Джимак С.С., Малышко В.В., Елкина А.А. Исследование количества наночастиц серебра на поверхности кетгута при десятикратной циклической заморозке // В сборнике: Фундаментальные исследования, инновационные технологии и передовые разработки в интересах долгосрочного развития Юга России. материалы Международного научного форума, посвященного 20-летию ЮНЦ РАН. Ростов-на-Дону, 2023. С. 51-55.

10. Шашков Д.И. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на процессы свободнорадикального окисления // В сборнике: I Всероссийская конференция с международным участием "Физика и экология электромагнитных излучений". научные труды конференции. 2017. С. 78.

11. Шашков Д. И., Малышко В. В., Джимак С. С. Влияние циклической заморозки на динамику нанокластеров серебра на поверхности полипропиленовых и полиэфирных волокон // Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий, 2020, С. 181.

12. Шашков Д. И. Влияние циклической заморозки на динамику нанокластеров серебра на поверхности полипропиленовых и полиэфирных волокон // В сборнике: Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-27, 2023, С. 60.

Патенты

13. Малышко В.В., Джимаков С.С., Ломакина Л.В., Басов А.А., Шашков Д.И. Способ повышения количества и антибактериальной активности наночастиц серебра на шовном материале из шелка. Патент на изобретение 2770277 С1, 15.04.2022. Заявка № 2021125044 от 23.08.2021.

14. Шашков Д.И., Лясота О.М., Малышко В.В., Свидлов А.А., Джимаков С.С., Дроботенко М.И. Программа для расчета времени синтеза наночастиц серебра в зависимости от интенсивности потока физического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023664915, 10.07.2023. Заявка № 2023664174 от 07.07.2023.

Работа была поддержана грантами: проект госзадания Минобрнауки РФ Кубанскому государственному университету (FZEN-2020-0022) на 2020-2022 гг.; проект «Разработка и исследование наноструктурированных материалов с заданными свойствами» в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FZEN-2023-0006 на 2023-2025 гг.

Список цитируемой литературы

1. Baygar, T. Characterization of silk sutures coated with propolis and biogenic silver nanoparticles (AgNPs); an eco-friendly solution with wound healing potential against surgical site infections (SSIs). *Med. Sci.* 2020, 50(1), 258–266.

2. Thapa, R.; Bhagat, C.; Shrestha, P.; Awal, S.; Dudhagara, P. Enzyme-mediated formulation of stable elliptical silver nanoparticles tested against clinical pathogens and MDR bacteria and development of antimicrobial surgical thread. *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.* 2017, 16(1), 39. DOI: 10.1186/s12941-017-0216-y.

3. Edis, Z.; Haj Bloukh, S.; Ibrahim, M.R.; Abu Sara, H. "Smart" Antimicrobial Nanocomplexes with Potential to Decrease Surgical Site Infections (SSI). *Pharm.* 2020, 12(4), 361. DOI: 10.3390/pharmaceutics12040361.

4. Pandey, P.C.; Mitra, M.D.; Shukla, S.; Narayan, R.J. Organotrialkoxysilane-Functionalized Noble Metal Monometallic, Bimetallic, and Trimetallic Nanoparticle Mediated Non-Enzymatic Sensing of Glucose by Resonance Rayleigh Scattering. *Biosen. (Basel)* 2021, 11(4), 122. DOI: 10.3390/bios11040122.

5. Akter, S.; Huq, M.A. Biologically rapid synthesis of silver nanoparticles by *Sphingobium* sp. MAH-11(T) and their antibacterial activity and mechanisms investigation against drug-resistant pathogenic microbes. *Artif. C. Nanomed. Biotechnol.* 2020, 48(1), 672–682. DOI: 10.1080/21691401.2020.1730390.

6. Zhao, D.H.; Yang, J.; Yao, M.H.; Li, C.Q.; Zhang, B.; Zhu, D.; Zhao, Y.D.; Liu, B. An in situ synthesis of silver nanoparticle-loaded genetically engineered polypeptide nanogels for antibacterial and wound healing applications. *Dal. Trans* 2020, 49(34), 12049–12055. DOI: 10.1039/d0dt00751j.

7. Zapor, L. Effects of silver nanoparticles of different sizes on cytotoxicity and oxygen metabolism disorders in both reproductive and respiratory system cells. *Arch. Env.l Prot.* 2016, 42(4), 32–47. DOI 10.1515/aep-2016-0038.
8. Béltéky, P.; Rónavári, A.; Zakupszky, D.; Boka, E.; Igaz, N.; Szerencsés, B.; Pfeiffer, I.; Vágvölgyi, C.; Kiricsi, M.; Kónya, Z. Are Smaller Nanoparticles Always Better? Understanding the Biological Effect of Size-Dependent Silver Nanoparticle Aggregation Under Biorelevant Conditions. *Int. J. Nanomed.* 2021, 16, 3021–3040.
9. Ganash, E.A.; Altuwirqi, R.M. Size Control of Synthesized Silver Nanoparticles by Simultaneous Chemical Reduction and Laser Fragmentation in *Origanum majorana* Extract: Antibacterial Application. *Mater. (Basel)* 2021, 14(9), 2326.
10. Jeong, Y.; Lim, D.W.; Choi, J. Assessment of Size-Dependent Antimicrobial and Cytotoxic Properties of Silver Nanoparticles. *Adv. in Mater Sci. and Eng.* 2014, 763807. <https://doi.org/10.1155/2014/763807>.
11. Raza M.A., Kanwal Z., Rauf A., Sabri A.N., Riaz S., Naseem S. Size- and Shape-Dependent Antibacterial Studies of Silver Nanoparticles Synthesized by Wet Chemical Routes. *Nanomater. (Basel)* 2016, 6(4), 74. DOI: 10.3390/nano6040074.
12. Ho, C.H.; Odermatt, E.K.; Berndt, I.; Tiller, J.C. Long-term active antimicrobial coatings for surgical sutures based on silver nanoparticles and hyperbranched polylysine. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.* 2013, 24(13), 1589–5600. DOI: 10.1080/09205063.2013.782803.
13. Guo, X.; Yin, Y.; Tan, Z.; Liu, J. Environmentally Relevant Freeze-Thaw Cycles Enhance the Redox-Mediated Morphological Changes of Silver Nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52(12), 6928–6935. DOI: 10.1021/acs.est.8b00694.
14. Tan, Z.; Guo, X.; Yin, Y.; Wang, B.; Bai, Q.; Li, X.; Liu, J.; Jiang, G. Freezing Facilitates Formation of Silver Nanoparticles under Natural and Simulated Sunlight Conditions. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53(23), 13802–13811. DOI: 10.1021/acs.est.9b05926.
15. Dzhimak, S.S.; Malyshko, V.V.; Goryachko, A.I.; Sokolov, M.E.; Basov, A.A.; Moiseev, A.V.; Shashkov, D.I.; Kopytov, G.F.; Baryshev, M.G.; Isaev, V.A. Sorption activity of silver nanoparticles. *Rus. Phys. J.* 2019, 62(2), 314–322. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01714-y>.
16. Dzhimak, S.S.; Malyshko, V.V.; Goryachko, A.I.; Sokolov, M.E.; Moiseev, A.V., Basov, A.A. Adsorption of Silver Nanoparticles on Mono- and Polyfilament Fibers. *Nanotech. in Rus.* 2019, 14, 48–54. <https://doi.org/10.1134/S199507801901004X>.
17. Шашков Д.И., Малышко В.В., Дроботенко М.И., Джимаков С.С. Физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2023. Т. 20. № 3. С. 86-92.
18. Джимаков С.С., Малышко В.В., Горячко А.И., Соколов М.Е., Басов А.А., Моисеев А.В., Шашков Д.И., Копытов Г.Ф., Барышев М.Г., Исаев В.А.

Сорбционная активность наночастиц серебра // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 2 (734). С. 114-122.

19. Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Горячко А.И., Шарафан М.В., Чуркина А.В., Моисеев А.В., Шашков Д.И., Лясота О.М. Оценка выраженности сорбционной активности наночастиц серебра на биоразлагаемых волокнах естественного и искусственного происхождения // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 2 (758). С. 57-62.

20. Джимаков С.С., Шашков Д.И., Малышко В.В., Моисеев А.В., Копытов Г.Ф. Формирование однородных наноструктур, содержащих серебро, на поверхности полимера гликолевой кислоты при циклической заморозке // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 6 (763). С. 62-67.

21. Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Басов А.А., Моисеев А.В., Власов Р.В., Фролов В.Ю., Шашков Д.И. Влияние циклической заморозки на сорбцию наночастиц серебра полированными коллагеновыми волокнами // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 8 (777). С. 86-90.

22. Шашков Д.И., Копытов Г.Ф., Малышко В.В., Лыкова А.В., Моисеев А.В., Демин Н.Н., Джимаков С.С., Барышев М.Г. Влияние циклической заморозки на динамику нанокластеров серебра на поверхности полипропиленовых и полиэфирных волокон // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 2 (771). С. 121-125.

Шашков Денис Игоревич

Исследование влияния физических факторов на формирование наночастиц серебра на поверхности биоразлагаемых материалов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Печать оперативная.
Тираж 100 экз. Заказ №