

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 14.08.2026

Статья принята к публикации: 28.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 666.3+620.22+54.61

Разработка технологии антибактериальных покрытий для керамических изделий на основе наночастиц серебра

Арипова Мастура Хикматовна

д-р техн. наук, проф.

зав. кафедрой Технология силикатных материалов и редких, благородных металлов,

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: aripova1957@yandex.com

Яхьяев Умар Абдихакимович

ст. преп. кафедры

Технология силикатных материалов и редких и благородных металлов, Ташкентский химико-

технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: yaxyoyevumar0@gmail.com

Development of antibacterial coating technology for ceramic products based on silver nanoparticles

Aripova Mastura Khikmatovna

doctor of Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Technology of Silicate Materials and Rare and Noble Metals, Tashkent

Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Yakhyaev Umar Abdikhamovich

senior Lecturer

at the Department of Technology of Silicate Materials and Rare and Noble Metals, Tashkent

Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В настоящем исследовании разработана технология получения антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий на основе наночастиц серебра, синтезированных электрохимическим методом из отходов электротехнической промышленности. В качестве антибактериального компонента использовали наночастицы серебра, полученные методом электролиза. В ходе исследования изучены закономерности устойчивого диспергирования наночастиц серебра в составе глазури, сохранения их структурной стабильности в процессе обжига, а также особенности нанесения наносuspension методом распыления на поверхность керамических изделий и формирования прочного антибактериального покрытия после термической обработки. Подготовленные образцы обжигали при температуре 700–900 °С. Фазовый состав и морфологию полученных покрытий исследовали методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ). Результаты исследования показали, что содержание наночастиц серебра и режимы термической обработки оказывают непосредственное влияние на эффективность антибактериального покрытия. В частности, покрытия, полученные при оптимальном составе и температуре обжига, продемонстрировали высокую антибактериальную активность и эффективно подавляли рост бактерий. Также установлено, что полученные покрытия характеризуются высокой адгезией к поверхности керамических изделий, достаточной механической прочностью, а также высокой химической и термической стойкостью.

Abstract

In the present study, a technology was developed for producing antibacterial coatings on the surface of ceramic products using silver nanoparticles synthesized electrochemically from waste generated by the electrical engineering industry. Silver nanoparticles obtained by electrolysis were used as the antibacterial component. The study investigated the conditions required for the stable

Библиографическое описание: Арипова М.Х., Яхьяев У.А. Разработка технологии антибактериальных покрытий для керамических изделий на основе наночастиц серебра // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23373>

dispersion of silver nanoparticles within the glaze, the preservation of their structural stability during firing, as well as the characteristics of applying the nanosuspension to the surface of ceramic products by spraying and the formation of a durable antibacterial coating after thermal treatment. The prepared samples were fired at temperatures ranging from 700 to 900 °C. The phase composition and morphology of the resulting coatings were investigated using X-ray fluorescence analysis (XRF) and transmission electron microscopy (TEM). The results showed that the silver nanoparticle content and thermal treatment conditions have a direct effect on the performance of the antibacterial coating. In particular, coatings obtained at the optimum composition and firing temperature exhibited high antibacterial activity and effectively inhibited bacterial growth. It was also established that the resulting coatings exhibited high adhesion to the surface of the ceramic products, sufficient mechanical strength, as well as high chemical and thermal resistance.

Ключевые слова: наночастицы серебра, антибактериальное покрытие, керамика, глазурь, наносуспензия, электролиз, термическая обработка.

Keywords: silver nanoparticles, antibacterial coating, ceramics, glaze, nanosuspension, electrolysis, thermal treatment.

Благодарности и финансирование: Выражаем искреннюю благодарность коллективу лаборатории факультета химической технологии неорганических веществ Ташкентского химико-технологического института за оказанную помощь и содействие в проведении исследований и получении результатов, представленных в данной статье.

Acknowledgements and Funding: We express our sincere gratitude to the laboratory team of the Faculty of Chemical Technology of Inorganic Substances at the Tashkent Institute of Chemical Technology for their valuable assistance and support in conducting the research and obtaining the results presented in this article.

Введение

Современное технологическое развитие сопровождается увеличением объёмов производства различных видов продукции, что приводит к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду. В частности, наблюдаются выбросы пыли и газов в атмосферу, накопление отработанных электротехнических отходов, нарушение экологического равновесия, изменение климата, рост сезонной заболеваемости и появление новых штаммов вирусов [5].

Резистентность к антибиотикам является одной из наиболее актуальных проблем современного мирового здравоохранения. Результаты исследований показали, что около 79 % бактерий устойчивы к одному или нескольким антибиотикам, что приводит к значительному увеличению смертности, развитию осложнений и росту затрат на здравоохранение. Загрязнение больниц, предприятий пищевой промышленности и промышленных объектов патогенными микроорганизмами вызывает серьёзную обеспокоенность. В связи с этим особое значение приобретает внедрение эффективных профилактических и защитных мер.

Высокая распространённость патогенных микроорганизмов, особенно среди детей, способствует развитию инфекционных заболеваний, ухудшению состояния здоровья и снижению качества жизни населения [1].

В связи с ростом численности населения увеличивается количество посетителей в залах ожидания медицинских учреждений, что способствует распространению инфекций, передающихся воздушно-капельным путём [2]. Для снижения указанных негативных последствий одним из перспективных направлений является расширение применения керамических материалов, обладающих гигиеническими и антибактериальными свойствами, не только в строительстве, но и в медицине, пищевой промышленности и санитарно-гигиенической сфере [11].

Однако даже гладкая поверхность керамических изделий остаётся восприимчивой к микробному загрязнению. В связи с этим нанесение антибактериальных покрытий на поверхность керамических изделий является одной из актуальных научно-технических задач [10].

Последние достижения в области нанотехнологий существенно изменили подходы к диагностике, лечению и профилактике различных заболеваний [3]. Антибактериальные покрытия играют важную роль в медицинских учреждениях в качестве эффективного средства предотвращения распространения патогенных микроорганизмов и разрыва цепи передачи инфекций [9].

Наночастицы серебра (Ag) обладают уникальными биомедицинскими свойствами и находят широкое применение в различных областях медицины. Кроме того, они характеризуются высокой антибактериальной активностью по сравнению с наночастицами многих других металлов [4]. Наночастицы серебра способны подавлять метаболическую активность микроорганизмов и вызывать гибель бактериальных клеток. Благодаря этим свойствам они широко применяются в качестве эффективного антибактериального компонента [7].

Наночастицы Ag обладают широким спектром антибактериальной активности, а их нанесение на керамическую поверхность позволяет эффективно подавлять рост микроорганизмов [8]. Наночастицы Ag размером 20–25 нм характеризуются большой удельной площадью поверхности, что усиливает их взаимодействие с микроорганизмами и способствует значительному повышению антибактериальной эффективности. Кроме того, температурные характеристики плавления наночастиц Ag были изучены рядом исследователей [6]; соответствующие данные представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость температуры плавления наночастиц Ag от их размера

№	Авторы	Размер (нм)	Температура плавления °С
1	Цзяньлей Цюй, Луцзинь Янь, Янь Ван	3	542
2	Мин Фэй Гу, Тинтин Лю, Синьци Хао.	5,10,20	663,841,886.
3	Майкл А. Асоро, Даниэль Ковар, Джозеф Джозеф Дамиано, Пауло Дж., Феррейра.	5,10,15,20,25,30,50.	480,520,560,600, 627,652,960
4	Хасан А. Аларифи, Мустафа Атис.	4,6,8,9,12.	602,487,794,827,847.

Материалы и методы

Размер, форма и удельная площадь поверхности наночастиц являются основными факторами, определяющими их антибактериальные свойства. Температура плавления наночастиц Ag изменяется в зависимости от их размера.

На первом этапе в качестве растворителя для переработки электротехнических отходов использовали азотную кислоту (HNO_3). Содержащийся в полученном растворе нитрат серебра (AgNO_3) осаждали в виде хлорида серебра (AgCl) с использованием соляной кислоты (HCl). Полученный AgCl очищали, после чего методом цементации железом восстанавливали серебро с получением порошка, из которого изготавливали чистый серебряный анод.

При электрохимическом синтезе в качестве анода использовали серебро (Ag), в качестве катода платину (Pt), а в качестве электролита деионизированную воду. Для регулирования окислительно-восстановительных процессов и поддержания необходимого значения pH в электролит добавляли азотную кислоту (HNO_3).

Для предотвращения агрегации наночастиц Ag использовали поливинилпирролидон (ПВП) и (ПВС). В процессе электролиза рабочие поверхности катода и анода имели коническую форму. С целью предотвращения агрегации наночастиц и интенсификации массопереноса ионов электроды вращали со скоростью 300–400 об/мин. Для обеспечения непрерывной циркуляции электролита дополнительно использовали перистальтический насос.

При pH = 3, температуре 50–60 °C, плотности тока 1–5 мА/см², расстоянии между электродами 1–2 см и продолжительности синтеза 40 мин были получены наночастицы серебра размером 20–25 нм.

Для проведения электрохимического синтеза установка СЕ 105 для исследования коррозионных процессов была конструктивно усовершенствована и оснащена дополнительными функциональными элементами.

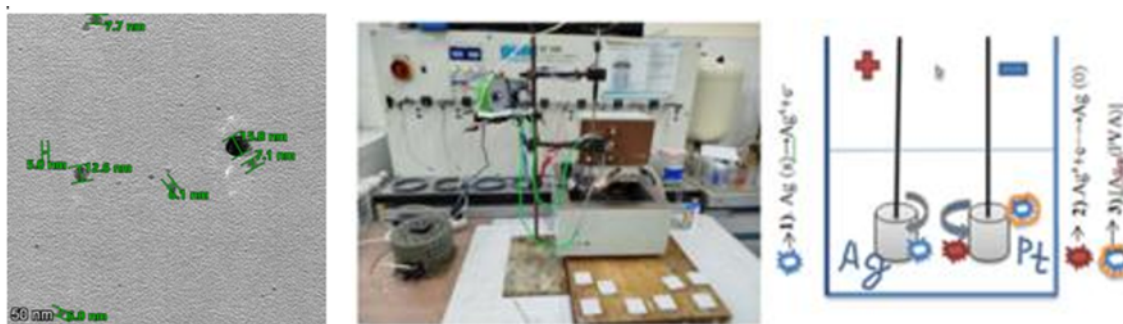


Рисунок 1. Процесс синтеза наночастиц Ag электрохимическим методом и результаты ТЭМ-анализ полученного образца. По результатам ТЭМ анализа установлено, что размер наночастиц составляет 5 – 15 нм

На следующем этапе была изучена система $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$ с целью определения области стеклообразования на основе местного сырья при получении фриттованной глазури. В исследуемой системе были установлены следующие предельные содержания компонентов, мас. %: 46 SiO_2 ; 15 Al_2O_3 ; 16 CaO ; 8 MgO ; 6 K_2O ; 6 Na_2O .

Шихтовые составы опытных образцов стекла, синтезированных в системе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$, приведены в таблице 2.

Варку стекла осуществляли в лабораторных условиях в печи с карбидкремниевыми (SiC) нагревателями при температуре 1400 ± 10 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч.

Таблица 2.

Состав шихты экспериментального стекла

Название сырья	серийный номер содержимого					
	1	2	3	4	5	6
Песок	37,19	29,3	31,01	31,85	31,72	37,01
Гельглин	4,38	10,57	6,23	3,57	5,15	4,36
Микрокальцит	6,54	16,14	1,89	13,1	2,9	6,51
Кальцинированная сода	4,13	5,17	6,25	6,82	2,8	4,11
Доломит		-	28,34		8,96	
Нитрат калия	8,05	4,35	4,12	8,07	4,7	8,01

Химический состав стёкол, определённый рентгенофлуоресцентным методом, приведён в таблице 3.

Таблица 3.

Химический состав опытных стекол

Номер состава	Массовый состав, %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
1	45	6,0	0,048	5,0	0,065	5,0	3,0
2	38,0	14,0	0,051	13,0	0,172	0,374	4,0
3	42,0	10,0	0,070	15,0	7,0	3,0	5,0
4	39,0	5,0	0,047	10,0	0,132	5,0	5,0
5	38,0	7,0	0,047	6,0	2,0	3,0	2,0
6	45,0	6,0	0,048	5,0	0,065	5,0	3,0

Исследована зависимость физико-химических свойств стекол, синтезированных в системе $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$, от их состава а также приведена их визуальная характеристика.

Таблица 4.

Технологические свойства экспериментальных составов стекла

Номер состава	Оптимальная температура обжига стекла, °С	Визуальное описание стекла	Температура кристаллизации стекланной гранулы, °С
1	1300	прозрачный и блестящий	600
2	1350	прозрачный	700
3	1350	прозрачный	800
4	1400	прозрачный	900

Номер состава	Оптимальная температура обжига стекла, °С	Визуальное описание стекла	Температура кристаллизации стеклянной гранулы, °С
5	1350	тусклый	850
6	1400	тусклый	1000

Из данных таблицы 3 видно, что стёкла составов 1, 2, 3 и 4 по сравнению с другими составами характеризуются высокой прозрачностью, при этом состав 1 отличается наиболее выраженным блеском. Наиболее низкая температура плавления глазурного покрытия также наблюдается для состава 1.

В исследовании были изучены два метода формирования антибактериальной поверхности: 1) введение приготовленной наносuspension в состав сырой глазури (фритты) с последующим нанесением глазури на поверхность изделия; 2) распыление наносuspension на поверхность готовой (обожженной) керамической плитки с последующей термической обработкой. В ходе исследования были изучены степени разбавления наносuspension водой для обеспечения её равномерного распределения по керамической поверхности. По результатам эксперимента установлено, что для формирования однородного биоцидного слоя на поверхности площадью 10 м² требуется 1 г наночастиц Ag.

Химический состав и структурные изменения покрытия были подробно изучены методами электронной микроскопии и химического анализа на примере керамических образцов, обожженных при температуре 700 – 1000 °С.

Повышение твёрдости наночастиц серебра обусловлено уменьшением размера частиц, проявлением квантового-размерного эффекта на поверхности, ограничением подвижности атомов и увеличением влияния поверхностной энергии, что способствует повышению их механической прочности.

Изучение процесса плавления стекол и их свойств позволило подобрать состав стекла для глазурования керамической плитки и получить прозрачную фритту в системах SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO-K₂O-Na₂O. Свойства глазури, полученной на основе разработанной фритты, представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Структура, фазовый состав и физико-химические свойства глазури без добавления наночастиц Ag

Содержание	Фазовый состав	Структура	ГТКК x10 ⁷ , K ⁻¹	Химическая стойкость, класс	Визуальные свойства (прозрачность, блеск, цвет)
Фритта	Стекло	аморфная	67	A	прозрачный, блестящий

Таблица 6.

Свойства биоцидной глазури, содержащей оптимальное количество наночастиц Ag

Оглавление	Фазовый состав	Структура	ТКК x10 ⁷ , K ⁻¹	Химическая стойкость, класс	Визуальные свойства (прозрачность, блеск, цвет)
3	Стекло	аморфная	60	A	хриплый, желтый

В таблице 6 представлены свойства глазурного покрытия с оптимальным содержанием наночастиц Ag. Из представленных данных видно, что введение Ag в состав глазури приводит к образованию кристаллов Ag, незначительно увеличивает значение ИИТК и придаёт глазури желтоватый оттенок. По мере увеличения содержания наночастиц Ag появляются различные оттенки желтого цвета. Введение наночастиц Ag в состав глазури не оказывает влияния на её химическую стойкость.

Проведённые исследования показали, что экспериментальные составы, синтезированные в процессе термической обработки, характеризуются отсутствием видимых дефектов, достаточной вязкостью расплава и удовлетворительными технологическими свойствами. Температура плавления исследованных образцов находилась в диапазоне 900–1000 °С. В качестве оптимального был выбран состав 1, обеспечивающий сравнительно низкую температуру плавления и хорошие визуальные характеристики.

Фритту, полученную из стекла состава 1, использовали для глазурования керамической плитки. На её основе была приготовлена фриттованная глазурь, содержащая 90 % фритты и 10 % каолина. Полученную глазурную суспензию наносили методом распыления на поверхность сформованной необожжённой керамической плитки, после чего образцы подвергали обжигу при температуре 1050 °С.

Для придания глазурованной керамической поверхности антибактериальных свойств на неё наносили методом распыления наносуспензии Ag различного состава с последующей термической обработкой при температурах 700, 750, 800 и 900 °С. Проведение данных экспериментов позволило определить оптимальную температуру термической обработки, а также оптимальный расход наночастиц Ag на 10 м² керамической поверхности.

Было изучено влияние количества наночастиц Ag на антибактериальные свойства образцов, полученных при температурах 700–750 °С. Образец с расходом 0,5 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности не проявил выраженной антибактериальной активности. При расходе 0,7 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. При увеличении количества наночастиц Ag до 1,0; 1,25 и 1,5 г была отмечена выраженная антибактериальная активность покрытия.

Также было исследовано влияние количества наночастиц Ag на антибактериальные свойства образцов, подвергнутых термической обработке при температуре 800 °С. Образцы с расходом 0,5 и 0,7 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности не проявили выраженной антибактериальной активности. При расходе 1,0 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. Образец с расходом 1,25 г также не продемонстрировал выраженного антибактериального эффекта, тогда как при расходе 1,5 г была отмечена высокая антибактериальная активность.

При температуре 900 °С образцы с расходом 0,5 и 0,7 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности также не проявили выраженной антибактериальной активности. При расходе 1,0 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. Образцы с расходом 1,25 и 1,5 г наночастиц Ag не продемонстрировали выраженного антибактериального эффекта.

Результаты и обсуждение

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что наиболее эффективное антибактериальное действие на керамической поверхности площадью 10 м² достигалось при нанесении суспензии, содержащей 1,0 г наночастиц серебра, с последующей термической обработкой при температуре 700 °С.

Установлено, что данный состав обладает высокой антибактериальной активностью в отношении таких патогенных микроорганизмов, как *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus haemolyticus* и *Escherichia coli*, обеспечивая значительное подавление их жизнеспособности за короткий промежуток времени.

Повышение температуры термической обработки выше 700 °С, вероятно, способствует диффузии наночастиц Ag в стеклообразную фазу и/или их укрупнению, что приводит к снижению площади активной поверхности и, как следствие, к уменьшению биоцидной активности покрытия. В связи с этим температура 700 °С была определена как оптимальная для формирования антибактериального покрытия.

Таблица 7.

Результаты способности экспериментальных составов нейтрализовать микробиологические штаммы

№	<i>Staphylococcus aureus</i> (S.A.), КОЕ 10 ⁶	<i>Staphylococcus haemolyticus</i> (S.G.), КОЕ 10 ⁵	<i>Escherichia coli</i> (Л.Н.Э.К.), КОЕ 10 ⁴
1	погибшие	погибшие	погибшие
2	погибшие	погибшие	погибшие
3	погибшие	погибшие	погибшие

Согласно результатам анализа было установлено, что формирования антибактериального покрытия на керамической плитке площадью 100 м² требуется 10 г наночастиц Ag, что соответствует расходу 0,01 мг/см².

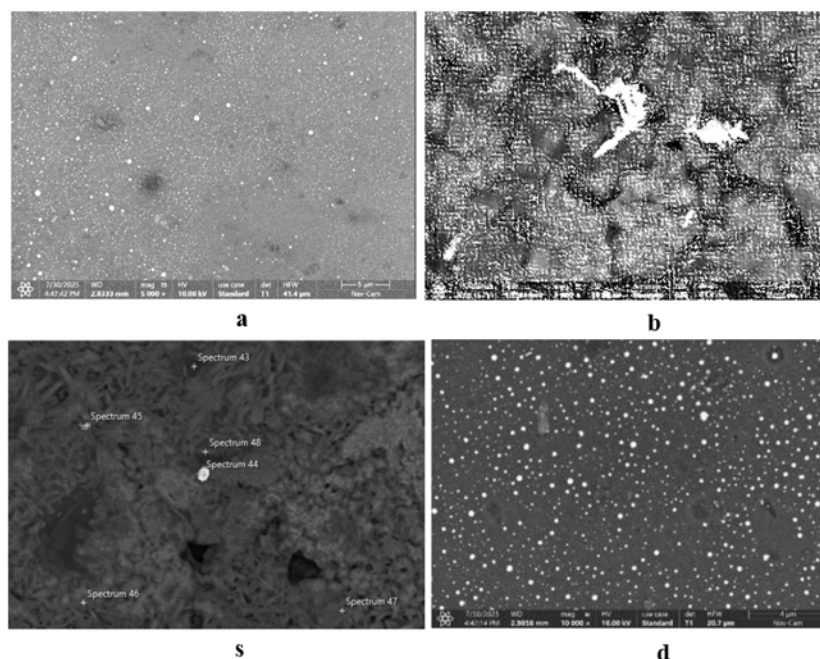


Рисунок 2. Результаты электронно-микроскопического анализа по определению размера и формы синтезированных наночастиц Ag

На рисунке 2(а) представлена морфология поверхности, сформировавшейся после распыления наносuspензии на предварительно обожжённую керамическую поверхность и последующей термической обработки при температуре 800 °С.

Установлено, что часть наночастиц Ag в наносuspензии с исходным размером до 50 нм под воздействием температуры претерпевает разделение и/или перегруппировку с образованием кластеров размером 5–10 нм.

По мере уменьшения размера частиц Ag увеличивается доля поверхностных атомов, а характер их перемещения в кристаллической решётке изменяется вследствие проявления размерных эффектов. Кроме того, высокое энергетическое состояние поверхностных атомов, обусловленное наличием неполностью координированных связей и увеличением поверхностной энергии, может способствовать повышению сопротивления структуры механической деформации.

На рисунке 2(б) представлена микроструктура образца, полученного после распыления наносuspензии на невысушенный глазурный слой с последующим обжигом при температуре 1000 °С, по данным трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ). Под воздействием высокой температуры была выявлена частичная агрегация наночастиц.

Хотя твёрдость металлического серебра составляет 2,5–3 единицы по шкале Мооса, введение наночастиц Ag размером 20–50 нм может способствовать повышению твёрдости поверхности вследствие измельчения структуры и формирования более дисперсной микроструктуры. Это свидетельствует о том, что керамическое покрытие обладает не только биоцидными свойствами, но и достаточно высокой эксплуатационной стойкостью.

На рисунке 2(в) представлены результаты ТЭМ-анализа образца, полученного после термической обработки при температуре 1000 °С, при этом наносuspензия была непосредственно введена в состав глазурного шликера. Изображение показывает, что значительная часть наночастиц диффундировала в более глубокие слои стекловидной фазы глазури. Тем не менее биоцидная активность на поверхности покрытия сохраняется, что

может быть связано с контролируемой диффузией и постепенным высвобождением ионов серебра через стеклянную матрицу, обеспечивающим пролонгированное антибактериальное действие.

На рисунке 2(г) представлено ТЭМ-изображение антибактериального слоя, полученного методом распыления наносuspензии на поверхность предварительно обожжённой керамической плитки. Анализ показал, что основная часть частиц имеет размер 30–60 нм, при этом в отдельных локальных областях наблюдаются частицы размером около 20 нм.

Высокая антибактериальная эффективность полученного покрытия может быть обусловлена большой удельной площадью поверхности наночастиц Ag, прочной адгезионной связью с керамической фазой, высокой механической стабильностью сформированной структуры, а также контролируемым высвобождением ионов серебра.

Кроме того, формулировки о законе Холла–Петча и механической прочности я сделал более осторожными, потому что без прямых измерений твёрдости утверждать значительное повышение твёрдости слишком категорично.

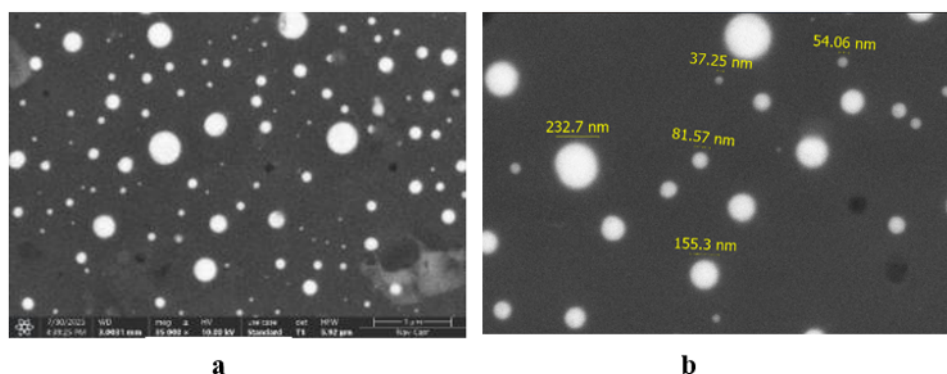


Рисунок 3. Морфологическая характеристика синтезированных наночастиц серебра, адгезионная стабильность и анализ термических свойств покрытия

На рисунке 3(а) представлены ТЭМ-изображения слоя наночастиц Ag, полученного методом распыления наносuspензии на поверхность предварительно обожжённой керамической плитки. Изображения показывают, что наночастицы преимущественно имеют сферическую форму и характеризуются высокой степенью кристалличности. Равномерное и достаточно плотное распределение частиц по поверхности свидетельствует о хорошей совместимости наносuspензии с керамической основой и способствует формированию однородного покрытия. Отсутствие выраженной агломерации частиц указывает на их высокую дисперсность и устойчивое распределение по поверхности.

На рисунке 3(б) показана роль стабилизаторов, используемых в процессе синтеза, таких как поливинилпирролидон (ПВП) и поливиниловый спирт (ПВС), в обеспечении дисперсности наночастиц. Наночастицы, стабилизированные полимерной оболочкой, характеризуются равномерным распределением и хорошим взаимодействием с поверхностью глазури, что способствует формированию структурно однородного и прочного композиционного слоя после термической обработки.

По одним ТЭМ-изображениям такие свойства напрямую доказать нельзя; для этого обычно нужны отдельные испытания на адгезию или дополнительные методы анализа.

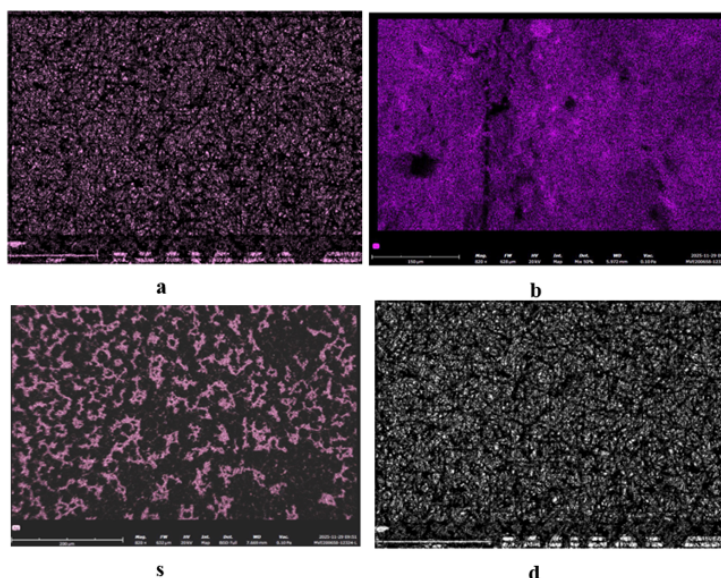
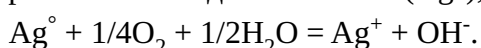


Рисунок 4. Влияние температурного режима на морфологию, агрегацию наночастиц серебра (Ag) и биоцидную активность покрытия (результаты СЭМ-анализа)

Результаты термогравиметрического анализа (ТГА) поверхности, покрытой наночастицами серебра, показали, что покрытие сохраняет свою стабильность до температуры 300 °С. Учитывая, что максимальная тепловая нагрузка на керамическую плитку в бытовых условиях не превышает 100 °С, был сделан вывод о высокой термической стабильности разработанного антибактериального покрытия. На рисунке 4(а) представлено СЭМ- изображение поверхности керамики, модифицированной при температуре 700 °С. Установлено, что наночастицы Ag равномерно распределены по поверхности, имеют сферическую форму и размеры в диапазоне 20–50 нм. Гладкая микроморфология препятствует механическому прикреплению бактерий, а высокая степень кристалличности наночастиц обеспечивает контролируемое и длительное высвобождение ионов серебра. На рисунке 4(б) представлено СЭМ- изображение поверхности покрытия, сформированного при температуре 750 °С. Размер наночастиц составляет 20–60 нм, при этом сохраняется их сферическая морфология. Биоцидная активность покрытия обусловлена окислением атомов серебра и высвобождением ионов (Ag^+), что описывается следующим уравнением реакции:



Покрытие, сформированное при данной температуре, обладает высокой коррозионной стойкостью и характеризуется прочной химической адгезией к керамической основе. На рисунке 4 (с) показано состояние агрегации наночастиц в образце, обработанном при температуре 800 °С. В результате высокой концентрации наносuspензии и достижения температурой критического уровня для наночастиц наблюдается их слияние (коалесценция). Исследование показало, что вследствие уменьшения удельной площади поверхности наночастиц Ag антибактериальная эффективность данного образца значительно снизилась. На рисунке 4(д) представлен анализ поверхности образца после термической обработки при температуре 900 °С в течение 60 минут. Поскольку наносuspензия была разбавлена в соотношении 1 г на 10 м², поверхности, агрегация наночастиц на поверхности практически не наблюдалось, несмотря на высокую температуру. Наночастицы были дискретно и равномерно распределены по поверхности керамики, что способствует сохранению стабильных антибактериальных свойств покрытия.

Разработка технологической системы получения антибактериальных покрытий с наночастицами серебра (Ag).

На основе полученных результатов были разработаны комплексные технологические схемы электрохимического синтеза наночастиц серебра и формирования стабильных антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий (рисунок 5). На первом этапе сырьевые компоненты, такие как кварцевый песок, глина, микрокальцит, сода, доломит и нитрат калия, подаются из специальных бункеров (1–6) и после механической обработки в сепараторах и мельницах (7–22) с помощью высокоточных дозаторов (23–24) в заданных соотношениях поступают на конвейерную ленту (25). Дозированная смесь гомогенизируется в смесителе-гомогенизаторе (26), после чего направляется во вращающуюся печь (28), где при температуре 1300 °С осуществляется синтез фритты. Полученный стеклорасплав гранулируется в водной среде, после чего гранулированная фритта совместно с каолином (31) и водой подается в шаровую мельницу (33), где готовится базовый глазурный шликер с заданной степенью дисперсности. Полученный шликер поступает в смеситель (35), где на данном этапе в систему вводятся наночастицы серебра, синтезированные электрохимическим методом. В результате интенсивного перемешивания формируется нанокпозиционная биоцидная суспензия. Подготовленный модифицированный глазурный шликер через дозаторы (36)

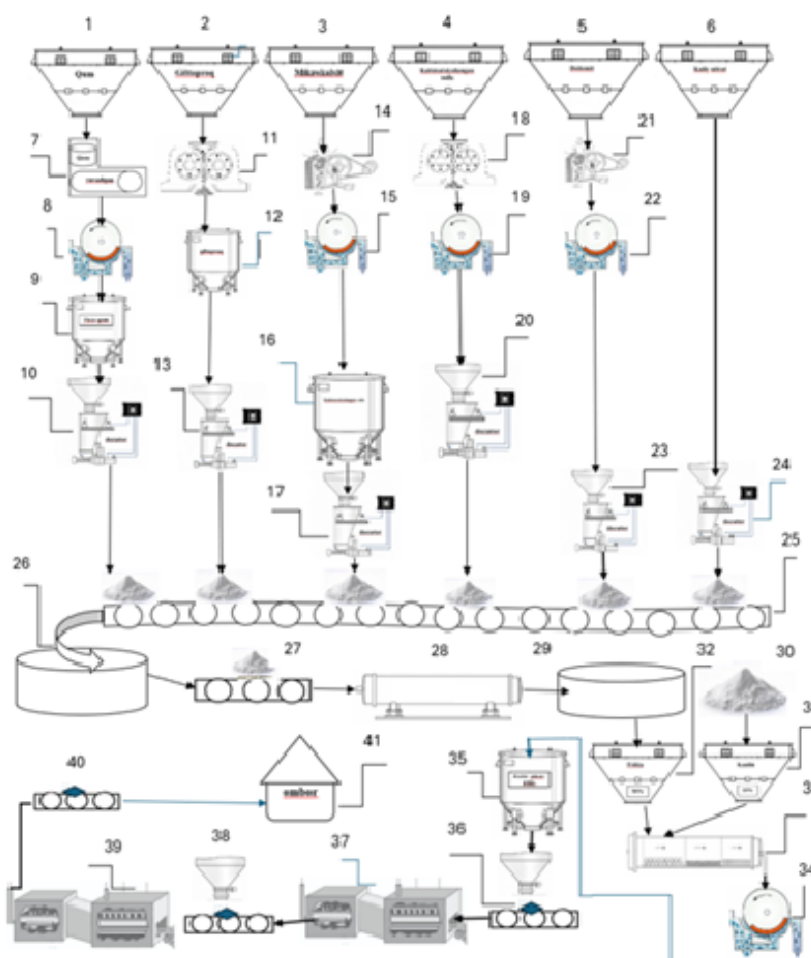


Рисунок 5. Комплексная технологическая схема формирования стабильных антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий

1 – бункер для кварцевого песка; 2 – бункер для глины; 3 – бункер для микрокальцита; 4 – бункер для кальцинированной соды; 5 – бункер для доломита; 6 – бункер для нитрата калия; 7 – установка для промывки песка; 8 – магнитный сепаратор; 9 – бункер; 10 – дозатор; 11 – валковая дробилка; 12 – бункер для глины; 13 – дозатор для глины; 14 – щековая дробилка; 15 – магнитный сепаратор; 16 – бункер для микрокальцита; 17 – дозатор; 18 – валковая дробилка; 19 – магнитный сепаратор; 20 – дозатор; 21 – щековая дробилка; 22 – магнитный сепаратор; 23 – дозатор; 24 – дозатор; 25 – конвейерная лента; 26 – смеситель; 27 – конвейерная лента; 28 – вращающаяся печь; 29 – водяной бассейн; 30, 31 – бункер для каолина; 32 – бункер для фритты; 33 – шаровая мельница; 34 – магнитная мельница; 35 – бункер; 36 – установка для нанесения глазури на керамическую поверхность; 37 – печь; 38 – установка для распыления наносuspензии на поверхность; 39 – печь; 40 – конвейерная лента; 41 – склад готовой продукции.

По результате гравиметрического анализа, основанного на определении разности между начальной и конечной массами анода в процессе электролиза, было установлено, что в 100 мл наносuspензии содержится 0,25 мг наночастиц Ag. Средний размер полученных наночастиц составляет 50 нм, а их теоретическое количество равно приблизительно $3,82 \times 10^2$ частиц. Согласно расчетам, 100 мл наносuspензии данной концентрации достаточно для модификации керамической поверхности площадью 25 000 см². Композиционное покрытие готовили путём введения наносuspензии, содержащей 0,25 мг наночастиц Ag к 0,5 кг базового глазурного шликера с последующей термической обработкой при температуре 1000 °C в течение 50 минут. Результаты исследования показали, что вследствие формирования стекловидной (глазурной) фазы в процессе высокотемпературного обжига и ограниченной термостойкости наночастиц часть наночастиц Ag диффундирует в глубокие слои глазури. В результате около 50 % наночастиц, Ag, нанесённых с целью придания поверхности антибактериальных свойств, не сохраняются в поверхностном слое а оставшаяся часть подвергается окислительным процессам, что приводит к заметному снижению антибактериальной эффективности покрытия.

В настоящем исследовании была синтезирована базовая наносuspензия для формирования антибактериальной поверхности. В качестве основы была выбрана наносuspензия Ag, полученная с использованием поливинилового спирта (ПВС) и поливинилпирролидона (ПВП). Выбор данных стабилизаторов обусловлен результатами экспериментальных исследований, согласно которым температура плавления наночастиц серебра размером 5–100 нм зависит от их размера. Было установлено, что температура плавления наночастиц размером 5–10 нм составляет около 663 °C, а для наночастиц размером 20 нм — около 886 °C, в связи с чем температурные режимы обработки были выбраны с учетом размеров наночастиц. Установлено также, что органическое вещество, использованное для предотвращения агрегации Ag-наночастиц в составе суспензии, полностью разлагается при температуре около 300 °C.

С целью получения антибактериального покрытия с использованием наночастиц Ag были исследованы два технологических способа формирования покрытия.

Как правило, размер наночастиц Ag составляет от 1 до 100 нм. Благодаря чрезвычайно большой удельной поверхности значительно увеличивается площадь контакта между серебром и бактериями либо вирусами, что существенно повышает бактерицидную

эффективность материала. Таким образом, применение серебра в форме наночастиц позволяет уменьшить концентрацию Ag в сотни раз при полном сохранении его бактерицидных свойств. Антибактериальная активность серебра объясняется взаимодействием ионов Ag с тиольными группами цистеина, входящими в состав ферментов микроорганизмов, что приводит к нарушению их биологической активности.

Бактерицидная добавка, созданная на основе наночастиц Ag, является одним из современных достижений отечественной нанобиотехнологии. При длительном применении синтетических антибиотиков их терапевтическая эффективность снижается вследствие появления устойчивых к ним микроорганизмов. Развитие антибиотикорезистентности обусловлено как мутациями самих микроорганизмов, так и приобретением ими фрагментов ДНК от других организмов. В отличие от антибиотиков, на протяжении многих тысячелетий бактерии и вирусы не способны выработать устойчивость («иммунитет») к серебру. Серебро является безопасным для млекопитающих (в том числе человека), пресмыкающихся, растений и других многоклеточных живых организмов.

Специально модифицированные наночастицы серебра способны длительное время сохранять свои биоцидные свойства. Благодаря этому более рациональным является не применение наносеребра в качестве самостоятельного дезинфицирующего средства, а его введение в состав красок, лаков и других материалов, что позволяет снизить материальные, временные и трудовые затраты при обеспечении долговременной антибактериальной защиты.

Заключение

По результатам гравиметрического анализа, основанного на определении разности начальной и конечной массы анода в процессе электролиза, установлено, что в 100 мл наносuspензии содержится 0,25 мг наночастиц Ag. Средний размер частиц составляет около 50 нм, а расчётное их количество — приблизительно $3,82 \times 10^2$. Такой объём suspension достаточен для модификации керамической поверхности площадью до 25 000 см².

Композиционное покрытие получали путём введения 100 мл наносuspензии, содержащей 0,25 мг Ag, в 0,5 кг базового глазурного шликера с последующим обжигом при 1000 °C в течение 50 мин. Установлено, что при высокотемпературном обжиге часть наночастиц диффундирует в глубокие слои стекловидной фазы, а часть подвергается окислительным превращениям, вследствие чего их содержание в поверхностном слое снижается и, соответственно, уменьшается антибактериальная эффективность покрытия.

Для формирования антибактериальной поверхности использовали наносuspензию Ag, стабилизированную поливиниловым спиртом (ПВС) и поливинилпирролидоном (ПВП). Выбор температурных режимов проводили с учётом зависимости температуры плавления наночастиц серебра от их размера: для частиц 5–10 нм она составляет около 663 °C, а для частиц размером около 20 нм — порядка 886 °C. Органические стабилизаторы, применяемые для предотвращения агрегации наночастиц, разлагаются при температуре около 300 °C.

С целью получения антибактериального покрытия были исследованы два технологических способа нанесения наночастиц Ag. Благодаря высокой удельной поверхности наночастицы серебра обладают повышенной контактной активностью по отношению к микроорганизмам, что способствует выраженному бактерицидному эффекту

даже при низкой концентрации Ag. Антибактериальное действие серебра связано, в частности, с взаимодействием ионов Ag с тиольными группами белков и ферментов микроорганизмов, что приводит к нарушению их жизненно важных функций.

Использование наночастиц серебра в составе лакокрасочных и керамических покрытий представляет практический интерес благодаря возможности длительного сохранения биоцидных свойств и формирования долговременной антибактериальной защиты поверхности.

Список литературы

1. Беломеря В.Н., Бочарова К.А., Юрченко А.С., Павленко Е.В., Бурцев А.Р. Приоритетные возбудители грибковых и бактериальных инфекций: тенденции развития и влияние на эпидемиологическую обстановку в РФ // *Microbiology Independent Research Journal*. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 1–18. – DOI: 10.18527/2025121118.RU.
2. Ибрагимов П.С. Распространение и профилактика воздушно-капельных инфекций среди детей // *Вестник Ассоциации Пульмонологов Центральной Азии*. – 2025. – Т. 8, № 3. – С. 267–270.
3. Файзуллина З.Р., Жиленко А.А., Исламгулов А.Х., Черная Е.А., Точиева А.И., Санова А.А. ..., Матвиец А.К. Роль нанотехнологий в диагностике и лечении злокачественных новообразований женской репродуктивной системы // *Акушерство, гинекология и репродукция*. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 590–607.
4. Хамраева З.Т., Шонахунов Т.Э., Ахмедова З.Р., Мирхолисов М.М. У., Юнусов Х.Э., Сарымсаков А.А. Изучение антимикробной активности наночастиц серебра и оксида цинка на целлюлозном носителе // *Universum: химия и биология*. – 2023. – № 9–1 (111). – С. 32–37.
5. Харина Г.В., Анахов С.В. Экологическая безопасность человека в техносфере: учебное пособие. – Екатеринбург: РГППУ, 2023. – 186 с.
6. Яхяев У.А., Арипова М.Х., Мкртчян Р.В., Мухторова Д.А. Получение наноразмерных частиц серебра методом электролиза из серебрясодержащего электротехнического лома // *Химия и химическая технология*. – 2025. – № 2. – DOI: 10.70189/1992–9498.1672.
7. Bruna T., Maldonado-Bravo F., Jara P., Caro N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – Т. 22, № 13. – Art. 7202. – DOI: 10.3390/ijms22137202.
8. Dissanayake K.K., Rifky M., Samadiy M., Attanayake D., Gunasena S., Senaarachchi R., Kurniawan T.A. Innovations and challenges in meat color measurement technologies: a critical review // *Journal of Food Measurement and Characterization*. – 2026. – Т. 20, № 4. – P. 3703–3723. – DOI: 10.1007/s11694-025-03796-4.
9. Rakhimkulov S., Absattorov D., Bori-khonov B., Yakubov E., Abdullayev B., Samadiy M. Synthesis and application of zinc oxide nanoparticles // *Research Journal of Chemistry and Environment*. – 2024. – Т. 28, № 01. – P. 953–963.

10. Reinosa J.J., Enríquez E., Fuertes V., Liu S., Menéndez J., Fernández J.F. The challenge of antimicrobial glazed ceramic surfaces // *Ceramics International*. – 2022. – Т. 48, № 6. – P. 7393–7404. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.12.121.
11. Yılmaz G.E., Göktürk I., Ovezova M., Yılmaz F., Kılıç S., Denizli A. Antimicrobial nanomaterials: a review // *Hygiene*. – 2023. – Т. 3, № 3. – P. 269–290. – DOI: 10.3390/hygiene3030020.

References

1. Belomerya, V., Bocharova, K., Yurchenko, A., Pavlenko, E. & Burtsev, A. [Priority causative agents of fungal and bacterial infections: development trends and impact on the epidemiological situation in the Russian Federation. *Microbiology Independent Research Journal*]. Т. 12. – 2025 (In Russ.)
2. Ibragimov P.S. [Transmission and prevention of airborne infections among children] // *Vestnik Assotsiatsii Pul'monologov Tsentral'noj Azii*. – 2025. – Vol. 8, No. 3. (In Russ.)
3. Fajzullina Z.R., Zhilenko A.A., Islamgulov A.Kh., Chernaya E.A., Tochieva A.I., Sanova A.A., & Matviets A.K. (2025). [The role of nanotechnology in the diagnosis and treatment of malignant neoplasms of the female reproductive system. *Obstetrics, Gynecology and Reproduction*, 19(4), 590–607] (In Russ.)
4. Khamraeva Z.T., Shonakhunov T.E., Akhmedova Z.R., Mirkholisov M.M.U., Yunusov Kh.E., & Sarymsakov A.A. (2023). [Study of antimicrobial activity of silver nanoparticles and zinc oxide on a cellulose carrier. *Universum: Chemistry and Biology*, (9–1 (111)), 32–37] (In Russ.)
5. Kharina G.V. & Anakhov S.V. [Environmental safety of humans in the technosphere: educational manual]. – 2023. (In Russ.)
6. Yakhyaev U.A., Aripova M.Kh., Mkrtchyan R.V., Mukhtorova D.A. [Obtaining nanosized silver particles by electrolysis from silver-containing electrical scrap] // *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. – 2025. – No. 2. – DOI: 10.70189/1992–9498.1672. (In Russ.)
7. Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P. & Caro, N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International journal of molecular sciences*, 22(13), 7202. – 2021.
8. Dissanayake K.K., Rifky, M., Samadiy, M., Attanayake, D., Gunasena, S., Senaarachchi, R. & Kurniawan T.A. (2026). Innovations and challenges in meat color measurement technologies: a critical review // *Journal of Food Measurement and Characterization*. – 2026. – Vol. 20, No. 4.
9. Rakhimkulov, S., Absattorov, D., Bori-khonov, B., Yakubov, E., Abdullayev, B., & Samadiy, M. (2024). Synthesis and application of zinc oxide nanoparticles. *Synthesis*, 25(01).
10. Reinosa J.J., Enríquez, E., Fuertes, V., Liu, S., Menéndez, J., & Fernández, J.F. (2022). The challenge of antimicrobial glazed ceramic surfaces. *Ceramics International*, 48(6), 7393–7404.
11. Yılmaz G.E., Gektyurk I., Ovezova M., Yılmaz F., Kılıç S., Denizli A. [Yılmaz, G.E., Göktürk, I., Ovezova, M., Yılmaz, F., Kılıç, S., & Denizli, A. Antimicrobial nanomaterials: a review. *Hygiene*]. Т. 3. – 2023 (In Russ.)