

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.17:631.147:669-1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

Технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров с бактериостатическими свойствами

I.B. Опарина¹, А.Ю. Иванников², М.А. Каплан³, М.А. Севостьянов⁴, А.Г. Колмаков⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт metallurgии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; Москва, Россия

¹ ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>

² ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>

³ i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>

⁴ cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>

⁵ imetranlab10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

Аннотация. Серебро (Ag) применяют в сельском хозяйстве при обеззараживании воды, защите растений и животных, при обработке органических отходов. Для изготовления мембранных фильтров с серебром необходимо разработать технологию, обеспечивающую стабильность процесса получения порошка узкого гранулометрического состава. Исследования проведены с целью разработки и апробации технологической цепочки производства мембранных фильтров с включением Ag. Разработана автоматизированная система управления процессом плазменной атомизации, обеспечивающая контроль давления, скорости подачи проволоки, температуры, расхода газа и воды. Представлена функциональная схема управления плазмотроном. Из коррозионной стали 316L с 0,2% Ag методом порошковой металлургии при температуре 1000...1200°C получен антибактериальный порошок с размером фракций 160...200 мкм, из которого изготовлен пористый мембранный фильтр. Проведенные испытания «методом дисков» выявили четко выраженную зону ингибирования роста *Pseudomonas spp.* диаметром 10...13 мм, что подтверждает контактный механизм бактериостаза, реализованный за счет введения 0,2% серебра в матрицу стали 316L. В результате исследований созданы фильтры со стабильной и воспроизводимой проницаемостью (в среднем 25,3 мкм²), сочетающие функции механической фильтрации и антимикробной защиты. Разработанная технология открывает перспективу их применения в системах водоочистки для нужд сельского хозяйства и других отраслей. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку долговечности бактерицидного действия в реальных эксплуатационных условиях и расширение номенклатуры микроорганизмов.

Ключевые слова: технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров; фильтр; серебро; сталь 316L; система управления процессом плазменной атомизации; схема управления плазмотроном; бактериостаз

Финансирование: Госзадание № 075-00319-25-00

Для цитирования: Опарина И.Б., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Севостьянов М.А., Колмаков А.Г. Технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров с бактериостатическими свойствами // АгроИнженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 67-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

ORIGINAL ARTICLE

Technology for the production of silver-containing membrane filters with bacteriostatic properties

I.B. Oparina¹, A.Yu. Ivannikov², M.A. Kaplan³, M.A. Sevostyanov⁴, A.G. Kolmakov⁵

^{1,2,3,4,5} A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science at the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

Abstract. Silver (Ag) is used in agriculture for water disinfection, plant and animal protection, and the treatment of organic waste. Producing membrane filters containing silver requires a technology that ensures the stability of obtaining powder with a narrow particle size distribution. The authors conducted the study to develop and test a technological chain for the production of silver-containing membrane filters. The authors have designed an automated control system for the plasma atomization process, ensuring control over pressure, wire feed rate, temperature, gas, and water flow. The article presents a functional diagram for controlling the plasma torch.

An antibacterial powder with a fraction size of 160 to 200 μm was obtained from corrosion-resistant steel 316L with 0.2% Ag using powder metallurgy at a temperature of 1000 to 1200°C, from which a porous membrane filter was fabricated. Tests conducted using the “disk method” revealed a clearly defined zone of inhibition of *Pseudomonas spp.* growth with a diameter of 10 to 13 mm, confirming the contact mechanism of bacteriostasis achieved by introducing 0.2% Ag into the 316L steel matrix. The key research outcome is the production of filters with stable and reproducible permeability (averaging 25.3 μm^2), combining the functions of mechanical filtration and antimicrobial protection. The developed technology opens up prospects for their application in water treatment systems for the needs of agriculture and other industries. Further research will focus on evaluating the durability of the bactericidal action under real operating conditions and expanding the range of tested microorganisms.

Keywords: technology for the production of silver-containing membrane filters; filter; silver; 316L steel; plasma atomization process control system; plasma torch control diagram; bacteriostasis

Funding: State Assignment No. 075-00319-25-00

For citation: Oparina I.B., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Sevostyanov M.A., Kolmakov A.G. Technology for the production of silver-containing membrane filters with bacteriostatic properties. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):67-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

Введение

Приоритетным направлением повышения сельскохозяйственных ресурсов в современных условиях становится создание новых материалов, влияющих на показатели урожайности сельскохозяйственных культур, защиты растений, продуктивности животноводства. И вместе с тем обращают на себя внимание материалы, прошедшие многолетние испытания с подтвержденной эффективностью, но представленные в новых формах, полученных с применением инновационных технологий. К таким материалам относится серебро – естественный антисептик с уникальными свойствами.

В растениеводстве серебро (Ag) применяют в качестве естественного антисептика, способного вызывать гибель более 650 видов бактерий [1]. Установлено, что ионная форма серебра подавляет жизнедеятельность различных микробов [2] путем воздействия на белки и ферменты бактерий. Это приводит к сбоям в трансмембранным транспорте, вызывает окислительный стресс и препятствует нормальному метаболизму.

Анализ фитотоксичности, накопления и транспорта различных форм серебра (ионные, наночастицы и объемные) в сое (*Glycine max*) и пшенице (*Triticum aestivum*) [3], показал, что разные формы Ag демонстрируют дифференциальную токсичность. Восходящий транспорт AgNP (20...50 нм) был более существенным по сравнению с объемным Ag (1...3 мкм). Исследователями [4] обнаружено, что композиты с серебром подавляют колыцевую гниль картофеля и оказывают стимулирующее воздействие на картофель *in vitro*.

Подтверждена целесообразность применения в ветеринарии препаратов, содержащих серебро, в профилактических и лечебных целях [4, 5].

Установлено, что выпойка цыплят-бройлеров коллоидным серебром в дозе 1 мл/1 л воды позволила получить высокие зоотехнические показатели. Зарубежные исследователи [6], изучая микроорганизмы в условиях *in vivo* и *in vitro*, выявили снижение инфекционных болезней животных, вызванных золотистым стафилококком и кишечной палочкой. Авторами [7] выявлена способность кластерного серебра концентрацией 50 мкг/мл и выше ингибировать рост тест-культур (*Salmonella typhimurium* ATCC1353, *Salmonella pullorum* ATCC19945, *Staphylococcus aureus* ATCC25923, *Escherichia coli* Б-5, *Proteus vulgaris* ATCC13315, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853) в 1,5...2 раза сильнее антибиотиков (амоксициллин, тетрациклин, стрептомицин, левомицетин). Выявлена способность кластерного серебра подавлять развитие бактерий в искусственно контамированных субстратах на примере куриного помета.

Анализ городских и промышленных сточных вод показал пригодность большинства из них для орошения сельскохозяйственных культур [8]. Для предотвращения отрицательного воздействия на природную среду предлагается ретехнологизация очистных сооружений канализации в соответствии с требованиями орошения кормовых культур и древесных насаждений путем доочистки сточных вод серебросодержащими фильтрами [8].

Серебро можно применять и в мембранных фильтрах. При добавлении серебра в нержавеющую сталь AISI 304 проявляются антибактериальные свойства в отношении кишечной палочки. Антибактериальные испытания проводились в соответствии со спецификацией JIS Z2801:2000 [9].

Исследование микроструктуры и антибактериальных свойств аустенитной стали 316L с добавлением

модифицирующих элементов Ag и Nb (0,06 мас.% Ag и 0,1 мас.% Nb) показало, что ниобий приводит к измельчению зерна 316L и улучшает распределение Ag в матрице [10]. Сталь 316L с серебром обладает высокой антибактериальной активностью, повышает устойчивость к золотистому стафилококку, в то время как избыток серебра склонен к образованию сегрегаций и снижению коррозионной стойкости.

Результаты исследований нержавеющей стали 2205 DSS, легированной серебром, обнаружили бактерицидное действие в отношении *Escherichia coli* (100%) и золотистого стафилококка (99,5%) [11]. Взаимная растворимость серебра и железа незначительна как в твердом, так и в жидком состоянии. После 12-часовой гомогенизационной обработки при температуре 1200°C растворимость серебра в γ-аустенитной и α-ферритной фазах увеличена на 0,10 и 0,09% соответственно.

Установлено, что мембранны, содержащие на своей поверхности нерастворимые соли серебра в количестве 5,11...9,06 масс.% и размером частиц 0,1...5 мкм, полностью обеззараживают воду в динамических условиях [12] без значительного снижения удельной производительности мембран. Наиболее равномерное распределение серебра по всей поверхности мембранны и максимальное содержание достигаются при обработке мембранны раствором AgNO_3 .

Таким образом, анализ литературы подтверждает стратегическую значимость серебра для решения ключевых задач АПК, связанных с обеззараживанием воды, защитой растений и животных, а также обработкой органических отходов. Для развития этого направления требуется разработка технологической цепочки получения антибактериальных фильтров.

Цель исследований: разработка автоматизированной системы управления установки плазменной атомизации для получения порошка коррозионностойкой стали с серебром со стабильными физико-механическими характеристиками и создание мембранныго фильтра из полученного порошка для очистки воды в АПК.

Материалы и методы

На основе анализа данных литературы выбрана коррозионностойкая сталь 316L (03X17H10M2), легированная 0,2% Ag. Выплавленные слитки (316L + 0,2% Ag) подвергли прокатке, ротационной ковке и волочению, термообработке и полировке. Поэтапная обработка и характеристики полученной проволоки описаны в работе [13].

Исследования проведены в ИМЕТ РАН на установке плазменной атомизации [14]. Подаваемая в плазменную струю проволока нагревалась

до температуры плавления материала. Распыление проволоки проводили в газоплотной камере, состоящей из корпуса, системы подачи плазмообразующего газа, охлаждающей системы и катода с катододержателем.

Перед началом работы выполняли проверку положения газовых клапанов, регулирующих подачу и отвод рабочих газов из камеры. Клапаны должны находиться в закрытом положении. Для предотвращения вероятности окисления получаемого порошка производилась откачка атмосферных газов из камеры вакуумным насосом. При достижении в камере достаточного давления 10 Па подается дискретный сигнал от регулятора 2TPM1 на отключение насоса. Измерение остаточного и избыточного давления обеспечивает датчик ПД100И.

Для создания защитной атмосферы через регулируемый клапан происходит заполнение рабочей камеры инертным газом – аргоном. При достижении в камере давления 90 кПа с датчика ПД100И подается дискретный сигнал на закрытие клапана и замыкание контактора источника питания Incut200HA плазмотрона. Расход газа определяется цифровыми индикаторами расхода (PFMC7102).

Протекающие газоразрядные процессы в камере способствуют сильному разогреву пространства до температур 100...150°C. Для предотвращения перегрева камеры применяется система охлаждения. Вода поступает в рубашку охлаждения через регулируемый клапан. На патрубке подачи и отвода воды расходомер фиксирует ее расход и температуру (датчик ДТС3044). Эти параметры необходимы для оценки рассеиваемой в камере энергии, а также для определения засорения рубашки охлаждения. Засорение начинает проявляться при снижении расхода отводимой воды.

Для поджига дежурной дуги подается питание (40 А, 100 В) на гафниевый катод и промежуточную вставку. Газ разогревается дугой и ионизируется. Одновременно включается двигатель, который подает проволоку под срез плазмотрона. Промежуточная вставка отключается из цепи, и анодный потенциал переключается на проволоку. Анодная привязка электрической дуги к концу проволоки интенсифицирует процесс плавления материала.

В зависимости от материала и диаметра проволоки устанавливается скорость ее движения. Скорость подачи проволоки контролирует тахометр TX01-RS. Для управления электродвигателем (мощностью до 1,5 кВт) установлен преобразователь частоты ПЧВ3. Для предотвращения аварии при возникновении нештатной ситуации – например, при прекращении подачи проволоки по какой-либо

причине (обрыве, заломе), срабатывает светосигнальная колонна МТ45, которая подключена ко второму выходу TX01-RS.

Электрическая дуга приводит к перегреву свободного конца проволоки и его оплавлению. Газовый поток уносит образующийся жидкий металл, дробит его. Под действием поверхностного натяжения капли приобретают сферическую форму. Интенсивный теплообмен перегретого расплава с инертной атмосферой приводит к затвердеванию частиц, которые попадают в циклон и скапливаются в бункере-накопителе. Выгрузка порошка из бункера осуществляется в ручном режиме для его рассева и отбора целевой фракции.

Для стабильной работы установки заменили систему управления на основе релейной логики на современную систему с возможностью контроля процесса и оперативного редактирования уставок для корректировки технологического процесса.

Для аттестации сферического порошка использовали стандартные приборы и методы. Исследование морфологии порошка коррозионной стали, легированной серебром, анализ микроструктуры выполняли на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-IT500, оснащенном системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY. Исследования проводили в режиме вторичных электронов. При выполнении электро-микроскопических исследований образцы фиксировались на подложке с использованием токопроводящего углеродного клея (чтобы порошок в процессе откачки вакуума не разлетался).

Гранулометрический анализ проводили на приборе Analysette 22 NanoTec с использованием метода лазерной дифракции.

Мембранные фильтры с заданной пористостью изготовили методом порошковой металлургии [15]. При этом использовали свободную засыпку с последующим спеканием при температуре 1000...1200°C. Для получения достаточной проницаемости использовали полученные сферические порошки крупной фракции (160...200 мкм). Проницаемость полученных образцов исследовалась путем пропускания через них воды.

Антибактериальную активность фильтра оценивали стандартным методом диффузии в агар (метод дисков). На поверхность питательного агара в чашках Петри наносили суспензию тест-культуры *Pseudomonas spp.* плотностью 1×10^9 КОЕ/мл, равномерно распределяя ее для получения сплошного газона. Избыток суспензии удаляли аспирацией. Чашки выдерживали при комнатной температуре в течение 30-40 мин для подсыхания поверхности агара.

Испытуемый кусочек фильтра накладывали на засеянную поверхность агара в центре чашки, обеспечивая плотный контакт по всей площади. Инкубацию проводили при температуре 37°C в течение 18-24 ч.

Результаты и их обсуждение

Разработанная автоматизированная система обеспечивает управление основными функциями: включение/выключение насоса; управление клапаном подачи газа; подача проволоки и сигнализация обрыва или прекращение подачи; управление водяным клапаном, запуск расходомера.

Управление процессом плазменного распыления обеспечивает система, включающая в себя средства автоматизации ОВЕН: регулятор TX01-RS; два регулятора 2TPM1; преобразователь частоты ПЧВЗ; датчик температуры ДТС3044; датчик давления ПД100И; светосигнальная колонна.

Функциональная схема установки с автоматизированной системой управления показана на рисунке 1.

Для измерения, регистрации и автоматического регулирования температуры и давления (воды и газа) в системе установлены два двухканальных цифровых регулятора 2TPM1 (рис. 2). Регулятор осуществляет как независимое управление по двум каналам, так и совместную работу каналов. В задачах регулирования и сигнализации второй вход обеспечивает регулировку по двум величинам с вычислением среднего значения. Поскольку регулятор работает с разными типами датчиков, то на одном приборе можно контролировать две физические величины (в нашем случае это температура и давление). Измеряемые и настраиваемые параметры могут передаваться по интерфейсу RS-485 на ПК.

Тахометр с ПЧВ (рис. 3) выполняет регулировку скорости подачи проволоки. При нештатной ситуации (например, при обрыве проволоки) срабатывает звуковая сигнализация. Выходным элементом служит электромагнитное реле (4...20 мА, 0...10 В). При необходимости прибор соединяется с ПК по интерфейсу RS-485 (Modbus RTU/ASCII).

Разработанная система управления процессом плазменной атомизации в автоматическом режиме обеспечивает высокую точность управления. Это позволяет получать однородный порошок со стабильными характеристиками требуемого размера, формы и распределения, что является критически важным для применения в аддитивных технологиях. В случае нештатной ситуации, например, прекращения подачи проволоки вследствие ее обрыва или замятия, перегрева оборудования и т.п., система автоматически активирует звуковой сигнал и отключает подачу питания.

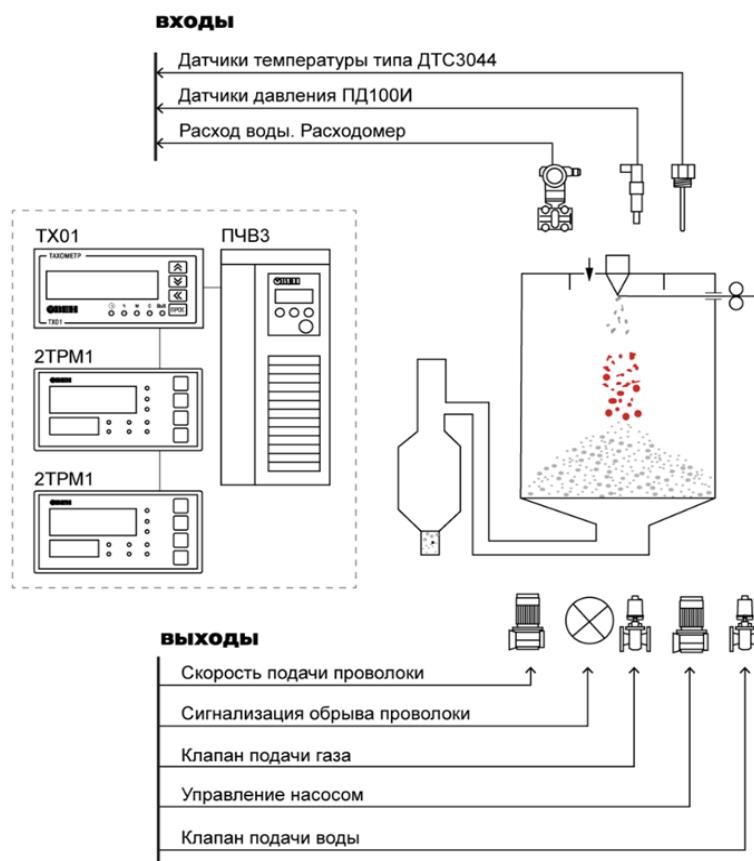


Рис. 1. Функциональная схема управления плазмotronом

Fig. 1. Functional diagram of plasma torch control

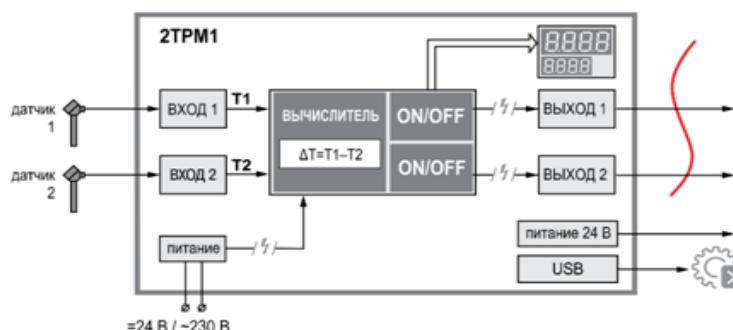


Рис. 2. Функционал регулятора 2TPM1

Fig. 2. Functional diagram of the 2TPM1 controller

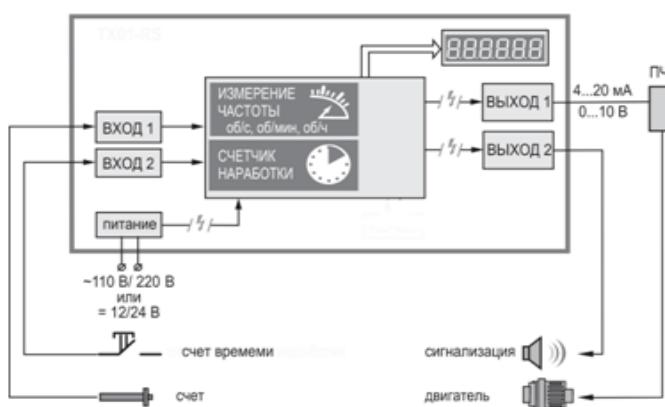


Рис. 3. Функционал тахометра TX01-RS с ПЧВ

Fig. 3. Functionality of the TX01-RS tachometer with PMV

Морфологию поверхности порошков изучали с помощью растрового электронного микроскопа с высоким разрешением (рис. 4). Анализ полученных порошков показал, что частицы стали 316L, легированной серебром, обладают высокой степенью сферичности и однородности. Обнаружено, что поверхность порошка в отдельных случаях имеет дендритную структуру, но в целом не было выявлено каких-либо значимых видимых поверхностных дефектов – кратеров и сателлитов.

Согласно представленным данным (табл.), полученным в результате фракционного анализа, медианный размер частиц (D_{50}) составил 115,86 мкм, при этом 80% частиц имеют размер менее 157,46 мкм, а 90% – менее 179,25 мкм. Преобладание частиц размером около 160 мкм делает данный порошок перспективным для получения высокоэффективных мембранных фильтров.

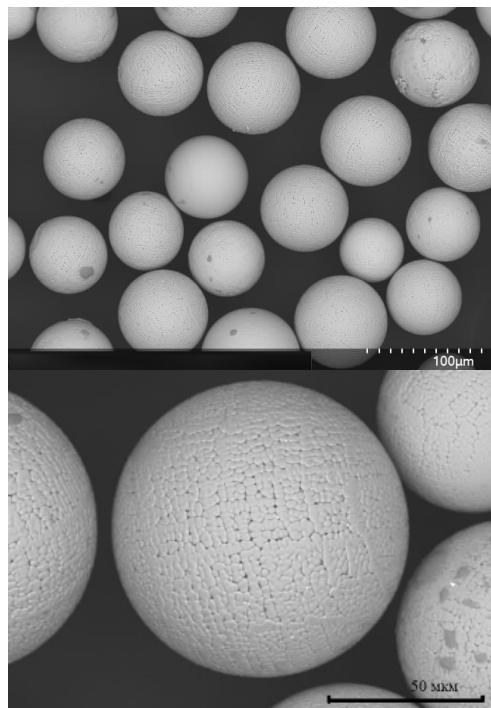


Рис. 4. Фото частиц порошка коррозионной стали 316L с 0,2% Ag, полученное с помощью микроскопа JEOL JSM-IT500

Fig. 4. Photo image of powder particles of 316L corrosive steel with 0.2% Ag obtained using a JEOL JSM-IT500 microscope

Распределение частиц порошка стали 316L с 0,2% Ag по размерам

Particle size distribution of 316L steel powder with 0.2% Ag

Параметр	Содержание фракции, %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Размер частиц, мкм	54,63	74,14	89,62	103,21	115,86	128,35	141,73	157,46	179,25

Фильтры с заданной пористостью изготавлили методом порошковой металлургии (рис. 5). Измеренная проницаемость 9 образцов составила 25,1...25,5 мкм². Практически одинаковое значение проницаемости в исследуемых образцах позволяет сделать вывод о сопоставимых размерах как частиц порошка, так и диаметров пор.

Результаты исследования фильтра подтвердили выраженную антибактериальную активность в отношении тест-штамма *Pseudomonas spp*. Ввиду возможной неравномерности роста бактериальной культуры после инкубации измеряли диаметр зоны задержки роста (зону ингибиции) в разных направлениях. Оценка антибактериальной активности методом диффузии в агар показала, что вокруг фильтра сформировалась четкая стерильная зона ингибиции роста бактерий. Средний диаметр зоны составил 10...13 мм. Полученный мембранный фильтр продемонстрировал совокупность функций механического улавливания частиц и антибактериального действия.

Таким образом, проведенная работа вносит значимый вклад в развитие ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий для АПК. Полученные результаты подтверждают целесообразность масштабирования процесса и разработки промышленных прототипов фильтров для водообеспечения животноводства, рециркуляции оросительных вод и защиты от фитопатогенов. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку долговечности бактерицидного действия в реальных эксплуатационных условиях и расширение номенклатуры микроорганизмов.

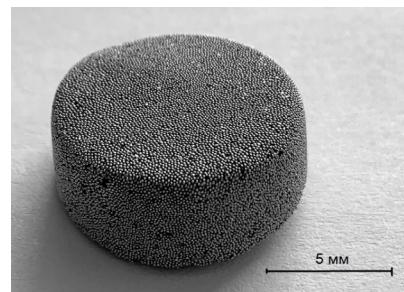


Рис. 5. Мембранный фильтр из сферических порошков

Fig. 5. Membrane filter made of spherical powders

Таблица

Table

Выводы

1. Созданная система управления плазмотроном, обеспечившая замену устаревшей системы управления на основе релейной логики на современную систему с возможностью управления процессом в автоматическом режиме и оперативного редактирования уставок, гарантирует стабильность процесса (контроль давления, скорости подачи проволоки, температуры, расхода газа/воды,) и получение однородного порошка узкого гранулометрического состава.

2. Проведенные исследования подтвердили повышение стабильности процесса получения методом плазменной атомизации сферических порошков коррозионностойкой стали 316L с 0,2 мас.% Ag с воспроизводимыми морфологическими характеристиками и выраженной антибактериальной активностью.

3. Пористые мембранные фильтры с однородной поровой структурой и проницаемостью, изготовленные

методом свободной засыпки и спекания (1000...1200°C) порошков крупной фракции (160...200 мкм), пригодны для микрофильтрационных процессов. Независимо от температуры спекания все образцы продемонстрировали одинаковую проницаемость (в среднем 25,3 мкм²), что указывает на воспроизводимость структуры фильтрующего материала.

4. Испытания «методом дисков» показали четко выраженную зону ингибирования роста *Pseudomonas spp.* диаметром 10...13 мм, подтверждая контактный механизм бактериостаза, реализованный за счет серебра в матрице фильтра.

5. Разработанные серебросодержащие мембранные фильтры сочетают механическую фильтрацию и антимикробную защиту. Их применение в сельском хозяйстве направлено на повышение продуктивности, снижение зависимости от антибиотиков и улучшение экологической безопасности.

Список источников

1. Фастовец И.А., Верховцева Н.В., Пашкевич Е.Б. и др. Наночастицы серебра: токсическое действие на микроорганизмы и взаимодействие с высшими растениями // Проблемы агрохимии и экологии. 2017. № 1. С. 51-62. EDN: YIUIBX
2. Yamanaka M., Hara K., Kudo J. Bactericidal actions of a silver ion solution on *Escherichia coli*, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis. *Applied and environmental microbiology*. 2005;71(11):7589-7593. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005>
3. Quah B., Musante C., White J.C. et all. Phytotoxicity, uptake, and accumulation of silver with different particle sizes and chemical forms. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17:1-13. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3079-1>
4. Перфильева А.И., Граскова И.А., Ножкина О.А. и др. Актуальные аспекты применения химически синтезированных соединений наночастиц серебра в животноводстве и агрохимии // Российские нанотехнологии. 2019. Т. 14, № 9-10. С. 85-93. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-9-10-85-93>
5. Егоров И.А., Егорова Т.В., Жеухин И.А. и др. Коллоидное серебро при выращивании цыплят-бройлеров // Птицеводство. 2013. № 4. С. 17-20. EDN: QAXDZR
6. Jung W.K., Koo H.C., Kim K.W. et al. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Applied and environmental microbiology*. 2008;74(7):2171-2178. <https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>
7. Пискаева А.И., Дышлюк Л.С., Сидорин Ю.Ю. Влияние кластерного серебра на патогенную микрофлору органических отходов агропромышленного комплекса // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 41, № 2. С. 132-140. EDN: WCLBTT
8. Умбетова Ш., Утегулов Н., Олжабаева А. и др. Актуальность доочистки сточных вод для орошения кормовых культур и древесных насаждений // *Izdenister Natigeler*. 2024. Т. 1, № 101. С. 166-182. <https://doi.org/10.37884/1-2024/17>
9. Liao K.H., Ou K.L., Cheng H.C. et al. Effect of silver on antibacterial properties of stainless steel. *Applied surface science*. 2010;256(11):3642-3646 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.001>
10. Junping Y., Wei L. Antibacterial 316L stainless steel containing silver and niobium. *Rare Metal*

References

1. Fastovets I.A., Verkhovtseva N.V., Pashkevich E.B. et al. Silver nanoparticles: toxic effect on exposure and interaction with higher plants. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2017;1:51-62. (In Russ.)
2. Yamanaka M., Hara K., Kudo J. Bactericidal actions of a silver ion solution on *Escherichia coli*, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005;71(11):7589-7593. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005>
3. Quah B., Musante C., White J.C. et all. Phytotoxicity, uptake, and accumulation of silver with different particle sizes and chemical forms. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17:1-13. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3079-1>
4. Perfileva A.I., Graskova I.A., Nozhkina O.A. et al. Current aspects of the use of chemically synthesized compounds of silver nanoparticles in animal husbandry and agrochemistry. *Russian Nanotechnologies*. 2019;14(9-10):85-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-9-10-85-93>
5. Egorov I.A., Egorova T.V., Zheukhin I.A. et al. Colloidal silver in growing broiler chickens. *Ptitsevodstvo*. 2013;4:17-20. (In Russ.)
6. Jung W.K., Koo H.C., Kim K.W. et all. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2008;74(7):2171-2178. <https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>
7. Piskaeva A.I., Dyshlyuk L.S., Sidorin Yu.Yu. Cluster silver influence on pathogenic microflora of agro-industrial organic waste. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2016;41(2):132-140. (In Russ.)
8. Umbetova S., Utugulov N., Olzhabayeva A. et all. Relevance of wastewater termination for irrigation of forage crops and wood plantings. *Izdenister Natigeler*. 2024;1(101):166-182. (In Russ.) <https://doi.org/10.37884/1-2024/17>
9. Liao K.H., Ou K.L., Cheng H.C. et al. Effect of silver on antibacterial properties of stainless steel. *Applied Surface Science*. 2010;256(11):3642-3646. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.001>
10. Junping Y., Wei L. Antibacterial 316L stainless steel containing silver and niobium. *Rare Metal*

Materials and Engineering. 2013;42(10):2004-2008.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60015-1)

11. Yang S.M., Chen Y.C., Pan Y.T. et al. Effect of silver on microstructure and antibacterial property of 2205 duplex stainless steel. Materials Science and Engineering: C. 2016;63:376-383. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.014>

12. Фазулин Д.Д., Маврин Г.В. Антибактериальные свойства микрофильтрационных мембран, модифицированных нитратом серебра // Мембранные технологии. 2019. Т. 9, № 1. С. 47-53. <https://doi.org/10.1134/S2218117218060056>

13. Горбенко А.Д., Каплан М.А., Конушкин С.В. и др. Влияние серебра и термической обработки на свойства проволоки из аустенитной стали 03Х17Н10М2 // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2023. Т. 66, № 5. С. 544-553. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

14. Устройство для получения металлического порошка: Патент RU2749403 С1 / М.А Севостьянов К.В. Сергиенко, А.С. Баинин и др.; заявка № 2020126240 от 06.08.2020; Опубл. 06.09.2021. EDN: CAXVBO

15. Зеленский В.А., Трегубова И.В., Анкудинов А.Б. и др. Получение пористого материала из порошков серебра // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия «Физика, математика, техника, технология». 2013. № 3 (50). С. 35-42. EDN: QATXYI

Информация об авторах

¹Опарина Ирина Борисовна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>; SPIN-код: 8934-8040; AuthorID: 5882; Scopus ID: 6603910409

²Иванников Александр Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>; SPIN-код: 1922-6821; AuthorID: 603094

³Каплан Михаил Александрович, канд. техн. наук, научный сотрудник; i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>; SPIN-код: 3258-5844; AuthorID: 914777

⁴Севостьянов Михаил Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>; SPIN код: 3786-0419; AuthorID: 151400

⁵Колмаков Алексей Георгиевич, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук; imetranlab 10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>; SPIN код: 5869-3830; AuthorID: 16564

^{1,2,3,4,5} Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Вклад авторов

И.Б. Опарина – разработка системы автоматизации, подготовка черновика статьи: план, описание, доработка материала; А.Ю. Иванников – разработка установки плазменной атомизации, отработка технологии получения порошков; М.А. Каплан – анализ полученных порошков, проведение испытаний на бактериостатичность мембранных фильтров; М.А. Севостьянов – формальный анализ; А.Г. Колмаков – концептуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за пластификатор.

Статья поступила 01.08.2025, после рецензирования и доработки 15.12.2025; принятая к публикации 17.12.2025

Materials and Engineering. 2013;42(10):2004-2008.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60015-1)

11. Yang S.M., Chen Y.C., Pan Y.T., et al. Effect of silver on microstructure and antibacterial property of 2205 duplex stainless steel. Materials Science and Engineering: C. 2016;63:376-383. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.014>

12. Fazullin D.D., Mavrin G.V. Antibacterial properties of microfiltration membranes modified by silver nitrate. Membrany i membrannye tehnologii. 2019;9(1):47-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2218117218060056>

13. Gorbenko A.D., Kaplan M.A., Konushkin S.V., et al. Effect of silver and heat treatment on properties of 03Kh17N10M2 austenitic steel wire. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2023;66(5):544-553. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

14. Sevostyanov M.A., Sergienko K.V., Baikin A.S., et al. Device for producing metal powder: Patent of the Russian Federation, No. 2749403;2021.

15. Zelensky V.A., Tregubova I.V., Ankudinov A.B., et al. Production of porous material from silver powders. Scholarly Notes of Transbaikal State University. Series: Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2013;3(50):35-42. (In Russ.)

Author Information

Irina B. Oparina¹, CSc (Eng), Senior Researcher; ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>; Scopus ID: 6603910409

Aleksandr Yu. Ivannikov², CSc (Eng), Senior Researcher; ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>

Mikhail A. Kaplan³, CSc (Eng), Research Engineer; i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>

Mikhail A. Sevostyanov⁴, CSc (Eng), Lead Research Engineer; cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>

Aleksei G. Kolmakov⁵, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), imetranlab 10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

^{1,2,3,4,5} A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science at the Russian Academy of Sciences; 119334, Moscow, Leninskiy Prospekt, 49

Author Contributions

I.B. Oparina – investigation, writing – original draft, review and editing of the manuscript;

A.Y. Ivannikov – investigation, formal analysis, data curation; validation;

M.A. Kaplan – formal analysis, investigation; validation;

M.A. Sevostyanov – formal analysis;

A.G. Kolmakov – conceptualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 01.08.2025; Revised 15.12.2025; Accepted 17.12.2025