

УДК 538.958

EDN: YUTIPH DOI: 10.31429/vestnik-20-3-86-92

Физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра

Д. И. Шашков¹✉, В. В. Малышко², М. И. Дроботенко¹, С. С. Джимаков¹¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская 149, Краснодар, 350040, Россия² Южный научный центр РАН, пр. Чехова 41, 344006, г. Ростов-на-Дону, Россия✉ Шашков Денис Игоревич; ORCID 0009-0007-5221-0076; e-mail: ShiniX88@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления. Исследовано влияние мощности ультрафиолетового излучения на скорость синтеза наночастиц. Установлено, что при уменьшении мощности УФ излучения увеличивается общая длительность синтеза наночастиц серебра. Также уменьшается скорость самих химических реакций из-за уменьшения количества OH^- и, как следствие, уменьшения концентрации e^- .

Ключевые слова: наночастицы серебра, синтез, математическое моделирование, ультрафиолет.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки Кубанскому государственному университету (FZEN-2023-0006).

Цитирование: Шашков Д. И., Малышко В. В., Дроботенко М. И., Джимаков С. С. Физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 3. С. 86–92. EDN: YUTIPH. DOI: 10.31429/vestnik-20-3-86-92

Поступила 14 июня 2023 г. После доработки 15 сентября 2023 г. Принято 17 сентября 2023 г. Публикация 29 сентября 2023 г.

Концепция статьи (Д.И. Шашков, В.В. Малышко), проведение экспериментов, вычисление (Д.И. Шашков, В.В. Малышко, М.И. Дроботенко) анализ данных (Д.И. Шашков, М.И. Дроботенко), написание статьи и внесение правок (Д.И. Шашков, В.В. Малышко, С.С. Джимаков). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Physical and Mathematical Model of the Process of Synthesis of Silver Nanoparticles

D. I. Shashkov¹✉, V. V. Malysheko², M. I. Drobotenko¹, S. S. Jimakov¹¹ Kuban State University, st. Stavropolskaya 149, Krasnodar, 350040 Russia² Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., 344006, Rostov-on-Don, Russia✉ Denis I. Shashkov; ORCID 0009-0007-5221-0076; e-mail: ShiniX88@mail.ru

Abstract. The article considers a physical and mathematical model of the synthesis of silver nanoparticles by the method of cavitation-diffusion photochemical reduction. The influence of the power of ultraviolet radiation on the rate of nanoparticle synthesis has been studied. It has been established that with a decrease in the power of UV radiation, the total duration of the synthesis of silver nanoparticles increases. Also, the rate of the chemical reactions themselves decreases due to a decrease in the amount of OH^- and, as a result, a decrease in the concentration of e^- . The obtained results of the dependence of the concentration of the ammonia complex, atomic silver and silver dimers on time at different levels of ultraviolet radiation are consistent with the experimental results. The simplifications introduced into the model do not have a significant impact on the calculation results. The developed physical and mathematical model will allow us to study and improve the process of synthesis of silver nanoparticles used to impart antiseptic properties to suture materials, including against pathogens of bacterial infections. In addition, a promising area for the use of such nanoparticles may be the development of wound coverings based on fibers from various materials treated with a solution containing silver nanoparticles obtained by cavitation-diffusion photochemical reduction. When synthesizing nanoparticles using this method, more than half of the nanoparticles have a diameter of up to 5 nm, which will contribute to the destruction of biofilms formed on the surface of infected wounds.

Keywords: silver nanoparticles, synthesis, mathematical modeling, ultraviolet.

Funding. This work was supported by the state assignment of the Ministry of Education and Science to the Kuban State University (FZEN-2023-0006).

Cite as: Shashkov, D. I., Malyshko, V. V., Drobotenko, M. I., Jimak, S. S., Physical and mathematical model of the process of synthesis of silver nanoparticles. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 86–92. DOI: 10.31429/vestnik-20-3-86-92

Received 14 June 2023. Revised 15 September 2023. Accepted 17 September 2023. Published 29 September 2023.

Concept of work (D.I. Shashkov, V.V. Malyshko), experiments, calculation (D.I. Shashkov, V.V. Malyshko, M.I. Drobotenko) data analysis (D.I. Shashkov, M.I. Drobotenko), writing the article and making corrections (D.I. Shashkov, V.V. Malyshko, S.S. Dzhimak). The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Нанотехнологии являются одной из быстроразвивающихся областей науки и техники. В последние годы значительно выросло производство и использование металлических наночастиц [1]. В частности, серебряные наночастицы нашли широкое применение в медицине для диагностики, доставки лекарств, лечения раковых заболеваний [2]. Это обусловлено свойствами подобных наночастиц [3, 4], в связи с чем, благодаря их высокой активности, они все шире используются для придания антимикробных свойств раневым повязкам, шовному материалу, различным медицинским полимерам [5, 6]. Таким образом, становится целесообразным изучение динамики процессов образования AgNPs на поверхности различных материалов, имеющих медицинское назначение [7, 8]. Необходимо учитывать, что свойства синтезируемых наночастиц будут различаться в зависимости от условий их синтеза, физико-химических свойств используемых веществ [9–13]. Поэтому получаемые наночастицы серебра могут быть различны по размеру, агрегативной и седиментационной устойчивости, а также антимикробной активности [14–18]. Определение оптимальных условий синтеза для получения наночастиц с определенными свойствами является актуальной задачей. Однако часто проведение большого количества экспериментов для поиска указанных параметров связано с различными трудностями. При этом возможности математического моделирования и численного эксперимента позволяют решить задачу и обойти указанные проблемы.

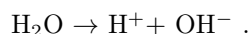
Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являлась разработка математической модели, описывающей процесс синтеза наночастиц серебра методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления.

1. Физико-математическая модель

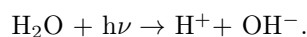
Для описания процесса синтеза наночастиц серебра была разработана физико-математическая модель метода кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления [19], при этом был сделан ряд упрощений: температура постоянна, все параметры усреднены по пространству (зависимость от пространственных переменных не рассматривается).

Ниже описаны стадии процесса синтеза наночастиц серебра из аммиачного комплекса:

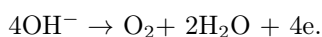
1. Под воздействием температуры молекула воды H_2O распадается с образованием двух ионов:



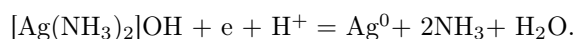
2. Квант ультрафиолетового (УФ) излучения $h\nu$ поглощается молекулой воды H_2O с образованием двух ионов:



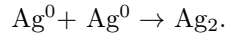
3. Четыре иона воды рекомбинируют, высвобождая свободные электроны:



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):



Далее были построены уравнения, позволяющие описать процесс синтеза наночастиц. Уравнение для описания зависимости концентрации ионов H^+ от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{H}^+}(t) = K_D n_{\text{H}_2\text{O}}(t) + K_{hv} n_{\text{H}_2\text{O}}(t) n_{hv}(t) - K_R n_{\text{H}^+}(t) n_{\text{OH}^-}(t) - K_e n_{\text{AgNH}_3}(t) n_e(t) n_{\text{H}^+}(t), \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{H}^+} = K_D n_{\text{H}_2\text{O}} + K_{hv} n_{\text{H}_2\text{O}} n_{hv} - K_R n_{\text{H}^+} n_{\text{OH}^-} - K_e n_{\text{AgNH}_3} n_e n_{\text{H}^+}. \quad (1.2)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{OH}^-}(t) = K_D n_{\text{H}_2\text{O}}(t) + K_{hv} n_{\text{H}_2\text{O}}(t) n_{hv}(t) - K_R n_{\text{H}^+}(t) n_{\text{OH}^-}(t) - 4K_{\text{OH}} n_{\text{OH}^-}^4(t), \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{OH}^-} = K_D n_{\text{H}_2\text{O}} + K_{hv} n_{\text{H}_2\text{O}} n_{hv} - K_R n_{\text{H}^+} n_{\text{OH}^-} - 4K_{\text{OH}} n_{\text{OH}^-}^4. \quad (1.4)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(t) = 4K_{\text{OH}} n_{\text{OH}^-}^4(t) - K_e n_{\text{AgNH}_3}(t) n_e(t) n_{\text{H}^+}(t), \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e = 4K_{\text{OH}} n_{\text{OH}^-}^4 - K_e n_{\text{AgNH}_3} n_e n_{\text{H}^+}, \quad (1.6)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации аммиачного комплекса $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{OH}$ от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{AgNH}_3}(t) = -K_e n_{\text{AgNH}_3}(t) n_e(t) n_{\text{H}^+}(t), \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{AgNH}_3} = -K_e n_{\text{AgNH}_3} n_e n_{\text{H}^+}. \quad (1.8)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{Ag}^0}(t) = K_e n_{\text{AgNH}_3}(t) n_e(t) n_{\text{H}^+}(t) - 2K_{\text{Ag}_2} n_{\text{Ag}^0}^2(t), \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{Ag}^0} = K_e n_{\text{AgNH}_3} n_e n_{\text{H}^+} - 2K_{\text{Ag}_2} n_{\text{Ag}^0}^2. \quad (1.10)$$

Уравнение для описания зависимости концентрации димеров Ag_2 от времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{Ag}_2}(t) = K_{\text{Ag}_2} n_{\text{Ag}^0}^2(t), \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{Ag}_2} = K_{\text{Ag}_2} n_{\text{Ag}^0}^2. \quad (1.12)$$

Здесь

$n_{\text{H}_2\text{O}}$ — 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_{hv} — концентрация УФ-квантов;

n_{e^-} — концентрация электронов;

Таблица 1. Значения переменных, входящих в уравнения (1.1)–(1.12)

Table 1. Values of variables included in equations (1.1)–(1.12)

Обозначение параметра	Значение параметра в момент времени $t = 0$
$n_{\text{H}_2\text{O}}$	0,999714118
n_{H^+}	1,79949E–10
n_{OH^-}	1,76459E–4
$n_{h\nu}$	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
$K_{h\nu}$	1,96
K_{OH}	0,962705
K_{e^-}	2,777778646
K_{Ag_2}	4,0101

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;

$K_{h\nu}$ — 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, входящих в уравнения (1.1)–(1.12), приведены в табл. 1, значения выражены в долях к общему объему реакционной смеси.

Задача (1.1)–(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 регистрации № 2023664915).

2. Результаты расчетов и их обсуждение

С помощью описанной выше физико-математической модели процесса кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления были получены графики зависимости концентрации аммиачного комплекса, атомарного серебра и димеров серебра от времени (рис. 1–4) при различной величине ультрафиолетового излучения. Значение 1 мощности УФ излучения соответствует величине 5850 люкс.

Из рис. 1 видно, что процесс восстановления серебра происходит быстро, концентрация аммиачного комплекса (А) падает до нуля в первые 15 мин. 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 концентрации атомарного серебра (В) процесс формирования наночастиц практически останавливается.

Описанный процесс полностью согласуется с полученными ранее экспериментальными результатами [20].

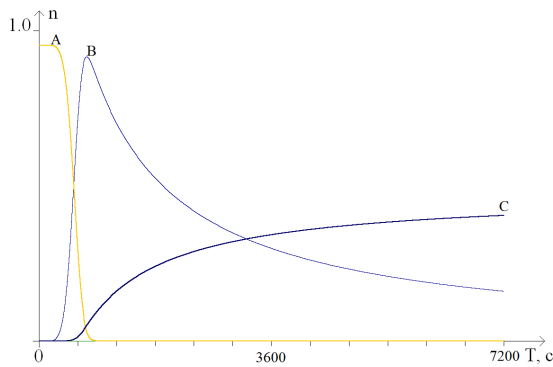


Рис. 1. График зависимости концентрации от времени при 1 мощности УФ: А — зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В — зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С — зависимость концентрации димеров серебра от времени

Fig. 1. Graph of concentration versus time at 1 UV power: A — time dependence of ammonia complex concentration; B — time dependence of atomic silver concentration; C — time dependence of silver dimer concentration

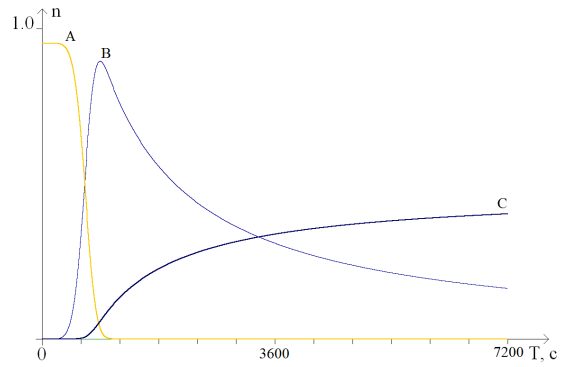


Рис. 2. График зависимости концентрации от времени при 0,75 мощности УФ: А — зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В — зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С — зависимость концентрации димеров серебра от времени

Fig. 2. Graph of concentration versus time at 0.75 UV power: A — time dependence of ammonia complex concentration; B — time dependence of atomic silver concentration; C — time dependence of silver dimer concentration

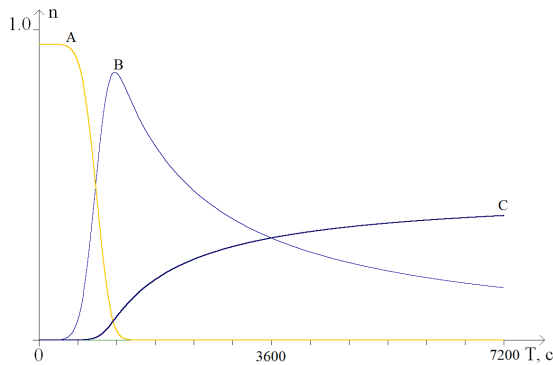


Рис. 3. График зависимости концентрации от времени при 0,5 мощности УФ: А — зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В — зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С — зависимость концентрации димеров серебра от времени

Fig. 3. Graph of concentration versus time at 0.5 UV power: A — time dependence of ammonia complex concentration; B — time dependence of atomic silver concentration; C — time dependence of silver dimer concentration

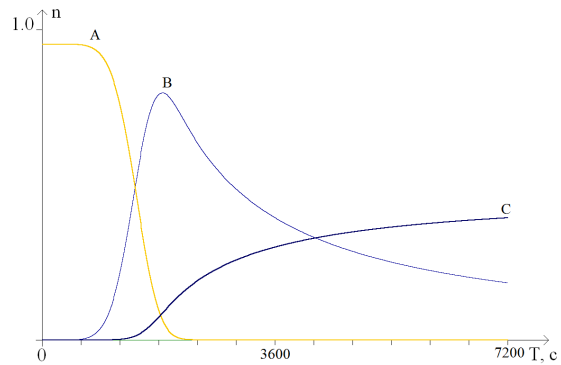


Рис. 4. График зависимости концентрации от времени при 0,25 мощности УФ: А — зависимость концентрации аммиачного комплекса от времени; В — зависимость концентрации атомарного серебра от времени; С — зависимость концентрации димеров серебра от времени

Fig. 4. Graph of concentration versus time at 0.25 UV power: A — time dependence of ammonia complex concentration; B — time dependence of atomic silver concentration; C — time dependence of silver dimer concentration

Как видно из рис. 1–4, время преобразования аммиачного комплекса в атомарное серебро обратно пропорционально мощности ультрафиолетового излучения. При сравнении рис. 1 и 4 видно, что при уменьшении мощности УФ излучения в 4 раза время синтеза наночастиц увеличивается примерно на 20 мин. Размер наночастиц зависит от кривизны графика С, и в данном случае не изменяется.

Заклучение

Таким образом, для описания процесса синтеза наночастиц серебра методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления была разработана и апробирована физико-математическая модель. Полученные результаты зависимости концентрации аммиачного комплекса, атомарного серебра и димеров серебра от времени (рис. 1–4) при различной величине ультрафиолетового излучения согласуются с экспериментальными результатами. Введенные в модель упрощения не оказывают значительного влияния на результаты расчетов.

Разработанная физико-математическая модель позволит исследовать и улучшить процесс синтеза наночастиц серебра, применяемых для придания шовным материалам антисептических свойств, в том числе в отношении возбудителей бактериальных инфекций [7]. Кроме того, перспективным направлением применения подобных наночастиц может являться разработка раневых покрытий на основе волокон из различных материалов, обработанных раствором, содержащим наночастицы серебра, полученные методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления [21]. При синтезе наночастиц данным методом более половины наночастиц имеют диаметр до 5 нм [22], что будет способствовать разрушению биопленок, сформированных на поверхности инфицированных ран.

Литература [References]

1. Pushankina, P., Baryshev, M., Petriev, I., Synthesis and Study of Palladium Mono- and Bimetallic (with Ag and Pt) Nanoparticles in Catalytic and Membrane Hydrogen Processes. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, p. 4178. DOI: [10.3390/nano12234178](https://doi.org/10.3390/nano12234178)
2. Zhang, X., Yang, Z., Yang, X., Zhang, F., Pan, Z., Sustainable Antibacterial Surgical Suture Based on Recycled Silk Resource by an Internal Combination of Inorganic Nanomaterials. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, vol. 15, p. 29971–29981. DOI: [10.1021/acsami.3c05054](https://doi.org/10.1021/acsami.3c05054)
3. 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. [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. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya vuzov. Physics*, 2019, vol. 62, no. 2 (734), pp. 114–122. (in Russian)]
4. Джимаков, С.С., Малышко, В.В., Горячко, А.И., Соколов, М.Е., Моисеев, А.В., Басов, А.А., Адсорбция наночастиц серебра на моно- и полифиламентных волокнах. *Российские нанотехнологии*, 2019, т. 14, № 1–2, с. 47–54. [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. *Rossiyskie nanotekhnologii = Russian nanotechnologies*, 2019, vol. 14, no. 1–2, pp. 47–54. (in Russian)] DOI: [10.21517/1992-7223-2019-1-2-47-54](https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-1-2-47-54)
5. Gherasim, O., Puiu, R.A., Bîrcă, A.C., Burduşel, A.-C., Grumezescu, A.M., An Updated Review on Silver Nanoparticles in Biomedicine *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 11, p. 2318. DOI: [10.3390/nano10112318](https://doi.org/10.3390/nano10112318)
6. Pryshchepa, O., Pomastowski, P., Buszewski, B., Silver nanoparticles: Synthesis, investigation techniques, and properties. *Adv Colloid Interface Sci.*, 2020, vol. 284, p. 102246. DOI: [10.1016/j.cis.2020.102246](https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246)
7. Basov, A., Dzhimak, S., Sokolov, M., Malyshko, V., Moiseev, A., Butina, E., Elkina, A., Baryshev, M., Changes in number and antibacterial activity of silver nanoparticles on the surface of suture materials during cyclic freezing. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, p. 1164. DOI: [10.3390/nano12071164](https://doi.org/10.3390/nano12071164)
8. Камзин А.С., Obaidat I.M., Семенов В.Г., Narayanaswamy V., Al-Omari I.A., Issa B., Бурьяненко И.В. Разработка и характеристика магнитных наночастиц $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.6$) для биомедицинских применений. *Физика твердого тела*, 2023, т. 65, № 3, с. 482–496. DOI: [FTT.2023.03.54749.544](https://doi.org/10.21883/PSS.2023.03.55591.544) [Kamzin, A.S., Obaidat, I.M., Semenov, V.G., Narayanaswamy, V., Al-Omari, I.A., Issa, B., Buryanenko, I.V., Development and characterization of magnetic nanoparticles $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.6$) for biomedical applications. *Physics of the Solid State*, 2022, iss. 6, p. 714. DOI: [10.21883/PSS.2023.03.55591.544](https://doi.org/10.21883/PSS.2023.03.55591.544)]
9. Edis, Z., Haj Bloukh, S., Ibrahim, M.R., Abu Sara, H., “Smart” Antimicrobial nanocomplexes with potential to decrease Surgical Site Infections (SSI). *Pharm.*, 2020, vol. 12, iss. 4, p. 361. DOI: [10.3390/pharmaceutics12040361](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12040361)
10. Petriev, I.S., Bolotin, S.N., Frolov, V.Y., Baryshev, M.G., Isaev, V.A., Kopytov, G.F., Modifying the surface of a hydrogen permselective palladium–silver membrane. *Bull. of the Rus. Acad. of Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, iss. 6, pp. 624–626. DOI: [10.3103/S1062873816060241](https://doi.org/10.3103/S1062873816060241)

11. Petriev, I.S., Frolov, V.Y., Bolotin, S.N., Baryshev, M.G., Kopytov, G.F., A Surface-modified hydrogen-permeable palladium-silver plate. *Rus. Phys. J.*, 2015, vol. 58, iss. 8, pp. 1044–1048. DOI: [10.1007/s11182-015-0609-3](https://doi.org/10.1007/s11182-015-0609-3)
12. 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.*, 2021, vol. 11, iss. 4, p. 122. DOI: [10.3390/bios11040122](https://doi.org/10.3390/bios11040122)
13. Шашков, Д.И., Копытов, Г.Ф., Мальшко, 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. [Shashkov, D.I., Kopytov, G.F., Malyshko, V.V., Lykova, A.V., Moiseev, A.V., Demin, N.N., Dzhimak, S.S., Baryshev, M.G., Effect of cyclic freezing on the dynamics of silver nanoclusters on the surface of polypropylene and polyester fibers. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya vuzov. Physics*, 2022, vol. 65, no. 2 (771), pp. 121–125. (in Russian)] DOI: [10.17223/00213411/65/2/121](https://doi.org/10.17223/00213411/65/2/121)
14. 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, vol. 48, iss. 1, pp. 672–682. DOI: [10.1080/21691401.2020.1730390](https://doi.org/10.1080/21691401.2020.1730390)
15. 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, vol. 49, iss. 34, pp. 12049–12055. DOI: [10.1039/d0dt00751j](https://doi.org/10.1039/d0dt00751j)
16. Zapor, L., Effects of silver nanoparticles of different sizes on cytotoxicity and oxygen metabolism disorders in both reproductive and respiratory system cells. *Arch. Env. Prot.* 2016, vol. 42, iss. 4, pp. 32–47. DOI: [10.1515/aep-2016-0038](https://doi.org/10.1515/aep-2016-0038)
17. Bélteky, 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, vol. 16, pp. 3021–3040. DOI: [10.2147/IJN.S304138](https://doi.org/10.2147/IJN.S304138)
18. 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.*, 2021, vol. 14, iss. 9, p. 2326. DOI: [10.3390/ma14092326](https://doi.org/10.3390/ma14092326)
19. Мальшко, 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. [Malyshko, V.V., Dzhimak, S.S., Lomakina, L.V., Basov, A.A., Shashkov, D.I., A method for increasing the amount and antibacterial activity of silver nanoparticles on suture material from silks. Patent 2770277 С1, 04/15/2022. Application No. 2021125044 dated 08/23/2021. (in Russian)]
20. Джимаков, С.С., Соколов, М.Е., Басов, А.А., Федосов, С.Р., Мальшко, В.В., Власов, Р.В., Лясота, О.М., Барышев, М.Г., Оптимизация физико-химических условий для получения наночастиц серебра и оценка биологических эффектов синтезированных коллоидных растворов. *Российские нанотехнологии*, 2016, т. 11, № 11–12, с. 132–137. [Dzhimak, S.S., Sokolov, M.E., Basov, A.A., Fedosov, S.R., Malyshko, V.V., Vlasov, R.V., Lyasota, O.M., Baryshev, M.G., Optimization of physicochemical conditions for obtaining silver nanoparticles and evaluation of biological effects of synthesized colloidal solutions. *Rossiyskie nanotekhnologii = Russian nanotechnologies*, 2016, vol. 11, no. 11–12, pp. 132–137. (in Russian)]
21. Джимаков, С.С., Шашков, Д.И., Мальшко, 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. [Dzhimak, S.S., Shashkov, D.I., Malyshko, V.V., Moiseev, A.V., Kopytov, G.F., Formation of homogeneous nanostructures containing silver on the surface of a glycolic acid polymer during cyclic freezing. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya vuzov. Physics*, 2021, vol. 64, no. 6 (763), pp. 62–67. (in Russian)] DOI: [10.17223/00213411/64/6/62](https://doi.org/10.17223/00213411/64/6/62)
22. Копытов, Г.Ф., Мальшко, В.В., Моисеев, А.В., Басов, А.А., Джимаков, С.С., Особенности сорбции наночастиц серебра на поверхности полимерных волокон гликолевой и молочной кислот при циклической заморозке в присутствии желатина и хитозана. *Известия вузов. Физика*, 2022, т. 65, № 6 (775), с. 105–111. [Kopytov, G.F., Malyshko, V.V., Moiseev, A.V., Basov, A.A., Dzhimak, S.S., Features of the sorption of silver nanoparticles on the surface of polymer fibers of glycolic and lactic acids during cyclic freezing in the presence of gelatin and chitosan. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya vuzov. Physics*, 2022, vol. 65, no. 6 (775), pp. 105–111. (in Russian)] DOI: [10.17223/00213411/65/6/105](https://doi.org/10.17223/00213411/65/6/105)