

Санитарная техника и экология

УДК 628.166-926.57

© Р. А. Гурдин, аспирант

© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор

© А. В. Подпорин, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru, vvasilev@lan.spbgasu.ru,

ufeofanov@rambler.ru, apodporin@lan.spbgasu.ru

© Н. А. Черников, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

© А. Н. Беляев, канд. техн. наук, доцент
(Вятский государственный университет,
Киров, Россия)

E-mail: belyaev71@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-65-72

© R. A. Gurdin, post-graduate student

© V. M. Vasiliev, Dr. Sci. Tech., Professor

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. V. Podporin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru, vvasilev@lan.spbgasu.ru,

ufeofanov@rambler.ru, apodporin@lan.spbgasu.ru

© N. A. Chernikov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
Saint Petersburg, Russia)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

© A. N. Belyaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Vyatka State University,
Kirov, Russia)

E-mail: belyaev71@list.ru

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ИОНОВ СЕРЕБРА И МЕДИ И ИХ ВЛИЯНИЕМ НА ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ В ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНАХ

CORRELATION BETWEEN THE PERFORMANCE OF SILVER IONS AND COPPER IONS AND THEIR EFFECT ON THE ORGANOLEPTIC CHARACTERISTICS OF THE SWIMMING POOL WATER

Исследования по обеззараживанию воды в бассейнах наночастицами серебра и меди актуальны в связи с ростом интереса к экологически чистым методам очистки. Проанализированы эффективность этих ионов и их влияние на характеристики воды, такие как цветность и запах. Остаются вопросы о полном понимании механизма воздействия ионов на воду и возможности применения их для замены хлору. Результаты исследования могут использоваться при разработке более безопасных методов обеззараживания воды в бассейнах, что делает исследование значимым.

Ключевые слова: ионы серебра, ионы меди, обеззараживание воды, ионизация воды, плавательные бассейны.

Research on water disinfection in pools using silver and copper nanoparticles has become relevant due to growing demand for eco-friendly solutions. This article focuses on studying the correlation between silver and copper ion performance in pool water treatment and their impact on color and odor characteristics. However, questions remain about the full understanding of the mechanism of action of ions and the possibility of them as a replacement for chlorine. The research results may contribute to developing safer water disinfection methods in pools, which makes the present study significant.

Keywords: silver ions, copper ions, water disinfection, water ionization, swimming pools.

Введение

Исследования в области обеззараживания воды с использованием наночастиц серебра и меди стали актуальными в свете их доказанного эффективного антимикробного воздействия [1]. Отмечено, что наночастицы обладают выраженным бактерицидным и антивирусным действием [2–5], что делает их перспективными для обработки воды в различных сферах промышленности, включая область плавательных бассейнов.

Отечественные исследования на эту тему пока не являются многочисленными, однако существует ряд работ, которые заслуживают внимания. Е. А. Вишнякова в диссертации «Особенности реакционной способности наночастиц серебра в водных растворах» [6] предоставляет важные данные о взаимодействии наночастиц серебра с водой, что является ключевым моментом для их применения в водоподготовке.

В работе Т. А. Шульгиной «Изучение антимикробных свойств дисперсных систем на основе наночастиц серебра и меди и обоснование перспектив их использования» [7] предоставляется ценная информация о применении ионов серебра и меди в области обеззараживания воды в плавательных бассейнах.

Зарубежные исследования в данной области значительно превосходят отечественные по количеству и глубине исследований. Примером может служить работа Joanna Wyczarska-Kokot «Application of Nanosilver in Swimming Pool Water Treatment Technology» [8], изданная в 2017 году. Это исследование не только подтверждает эффективность применения наночастиц серебра в обработке воды в плавательных бассейнах, но и дает оценку качества воды и точности метода.

Доклад World Health Organization от 2018 года «Silver as a drinking-water disinfectant» рассматривает применение серебра для очистки питьевой воды, подчеркивая его эффективность в борьбе с микробиоло-

гическими загрязнителями и вирусами. В докладе приведен расчет безопасной концентрации ионов серебра и меди в питьевой воде для человека на основе ежедневного потребления в течение 70 лет¹.

Работы, посвященные химическим исследованиям наночастиц серебра в водной среде, такие как «Chemical transformation of silver nanoparticles in aquatic environments» (2018) [9] и «New Insights for Exploring the Risks of Bioaccumulation, Molecular Mechanisms, and Cellular Toxicities of AgNPs in Aquatic Ecosystem» (2022) [10], предоставляют важные сведения о способах получения, механизмах взаимодействия ионов серебра и микроорганизмов, а также их влиянии на экологию.

В отечественных публикациях также рассматривается применение нанотехнологий в водоснабжении. Статья «Обеззараживание воды на водоканалах. Новый подход» (В. В. Гончарук, 2020) [11] предлагает новые подходы к очистке воды, включая использование наноматериалов.

В статье «Сочетанное действие наночастиц серебра и перекиси водорода на жизнеспособность и ультраструктуру клеток *Bacillus cereus*» (И. П. Погорельский с соавт., 2014) [12] рассматриваются комбинированные эффекты наночастиц серебра и перекиси водорода на бактерии.

Анализ литературных источников свидетельствует о том, что исследования по применению наночастиц серебра в обработке воды в плавательных бассейнах активно развиваются. Зарубежные исследователи продолжают углублять свои знания в этой области, предлагая новые методики и подходы к применению нанотехнологий для повышения эффективности обеззараживания воды. Отечественные исследования пока не так многочисленны, их значение призна-

¹ Silver in Drinking-water. Background document for development of WHO 'Guidelines for Drinking-water Quality'. Geneva: World Health Organization, 2020. 25 p.

ется, и появление новых диссертаций и статей показывает растущий интерес к данной тематике в отечественной научной среде. Необходимость дальнейших исследований в этой области подчеркивается актуальностью вопросов обеззараживания воды.

Согласно данным маркетингового исследования Pool Ionizer Market Emerging Trends till 2030, проведенного компанией 360 Market Updates, мировой рынок ионизаторов для бассейнов оценивался в 19,44 млрд долларов США в 2023 году и ожидается, что к 2028 году этот объем вырастет до 33,8 млрд долларов США, что свидетельствует о среднегодовом росте в 11,7 % за период 2023–2028 гг.². Их прогноз также указывает на ожидаемое увеличение объема рынка оборудования для дезинфекции плавательных бассейнов на 4,9 % в период с 2022 по 2031 год.

В 2023 году объем мирового рынка химикатов для обработки плавательных бассейнов составил 1123,11 млн долларов США, а прогноз на 2031 год предполагает его увеличение до 2217,65 млн долларов США со среднегодовым ростом в 7,04 %. Северная Америка остается крупнейшим рынком в этой сфере, за ней следуют Европа и Азиатско-Тихоокеанский регион².

Таким образом, можно сделать вывод, что рынок ионизаторов для плавательных бассейнов растет. Расширению рынка способствовали такие факторы, как повышение осведомленности о вредном воздействии традиционных химикатов для ухода за бассейнами и растущий спрос на экологически чистые решения. Кроме того, переход к интеллектуальным системам управления бассейнами и растущее распространение ионизаторов бассейнов в странах с развивающейся экономикой также способствовали росту рынка. В целом ожидается, что конкурентный рынок ионизаторов для бассейнов продолжит расти в ближайшие годы, поскольку

² Pool Ionizer Market Emerging Trends till 2030. Research Report. 360 Market Updates. 19.01.2024. 96 p.

все больше владельцев бассейнов ищут эффективные и экологически чистые варианты обслуживания. Однако важно отметить, что, несмотря на значительные усилия, ни одно из представленных исследований не дает полной картины механизма воздействия микрочастиц ионов серебра и меди на всю систему водоподготовки. В частности, остается неясным, как ионы влияют на органолептические показатели качества воды (цветность, мутность, запах) и может ли данная технология быть заменой традиционному хлорированию.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовалась установка синтеза олигодинамических растворов АЭ-1 (производитель ООО НИП «Акваэффект»). Оборудование предназначено для обеззараживания воды в плавательных бассейнах с помощью ионов серебра и меди.

Было проанализировано 162 протокола лабораторных исследований в Кировской обл., более половины из которых содержат результаты микробиологических исследований. Распределение по объектам следующее: наибольшее количество протоколов (119) получено от установки в санатории «Радуга». Для остальных установок количество протоколов следующее: «ИМЗ» — 4, «Лесная Новь» и «Митино» — по 8 каждая, «Спорт Парк Семья» — 15.

Наиболее актуальными для оценки гигиенической эффективности обрабатываемой воды являются сведения о содержании металлов в воде из установок. Оценка органолептических свойств — запах, цветность и мутность.

Для изучения взяты протоколы из санатория «Радуга», поскольку они охватывают четырехлетний период (2020–2023 гг.). Микробиологические исследования в этом объекте не обнаружили факты бактериологического загрязнения, поэтому они не были взяты в разработку. Анализ протоколов, содержащих числовые характеристики концентра-

ций металлов, мутности и цветности, провели по следующим направлениям: изменение концентраций металлов, мутности и цветности производимых растворов, сравнение расчетного расхода металлов с результатами санитарно-химических исследований, а также гигиеническая оценка эффективности обеззараживания воды.

Результаты и обсуждение

Выявлены следующие тенденции содержания ионов металлов, показателей мутности и цветности в зависимости от сроков работы установки (табл. 1). Чем больше срок эксплуатации:

- тем меньше серебра в растворе;
- тем меньше меди в растворе;
- тем больше цветность раствора;
- тем больше мутность раствора.

Обнаруженные зависимости логичны: электроды в процессе эксплуатации «стареют», производимая суспензия теряет свои обеззараживающие и иные свойства, вследствие чего повышаются мутность и цветность растворов. При этом следует учитывать, что реальные количественные оценки органолептических показателей в протоколах принадлежат только 2023 г., когда, возможно, в испытательных центрах стали использовать более точные методы гигиенической характеристики органолептических свойств обрабатываемой воды³. Традиционные подходы (шкала Снеллена, кольца и т. д.) дают монотонные результаты, не могут выявить существенные изменения свойств суспензии.

Указанные в табл. 1 конечные концентрации определены на 24.01.2024 (начало эксплуатации установки: 19.01.2020), что составляет 1466 дней эксплуатации, или 4 года и 5 дней работы. Полученные коэффициенты корреляции серебра и меди к указанному сроку работы отрицательны (обратны): чем больше срок работы, тем меньше содержание металла, но по величине они характеризуют только тенденцию

³ Модели компании CHEMetrics (США), анализаторы серии U-50.

к снижению концентрации с годами работы на фоне сохраняемой эффективности.

Вариабельность значений обнаруживаемых концентраций металлов по дням от ввода в эксплуатацию лучше всего описывается полиномом шестой степени (коэффициент аппроксимации 1,0). Тем не менее, попытались измерить скорость изменений в линейных трендах. За указанный период (0...1466 дн.):

1. Средняя скорость снижения концентрации серебра от исходного фона определена линейной зависимостью: $y = -(0,003x + 0,0085)$, что при коэффициенте аппроксимации (степени приближения к элементарной функции $y = aX$), равном 0,0602 усл. ед., составляет $y = -(0,003 \times 0,19 + 0,0085) = -0,009$ мг/дм³ в день.

2. Средняя скорость снижения концентрации меди определена линейной зависимостью: $y = -(0,0226x + 0,3243)$ и составляет $y = -(0,0226 \times 0,320 + 0,3243) = -0,332$ мг/дм³ в день (при коэффициенте аппроксимации 0,213 усл. ед.).

3. Расчет скорости образования мутности и цветности не выполнен, поскольку численные значения этих показателей получили только за 2023 г. (за девять дней), но указанные ранее тенденции, характеризующие в какой-то мере «старение» электродов, позволяют надеяться, что при большом числе наблюдений (по крайней мере больше 20–30) могут быть выявлены корректные зависимости органолептических свойств воды «на выходе» от содержания в ней ионов металлов.

Описанные обстоятельства могут послужить основой для методики «Гигиеническая оценка и прогноз эксплуатационных сроков олигодинамических установок АЭ-1». Искомый предел износа электродов по концентрациям металлов в получаемых растворах может быть определен размером коэффициента корреляции (и/или детерминации) в зависимости «срок эксплуатации — концентрация ионов и иные показатели». Предварительно можем ориентироваться на то, что

Зависимость содержания металлов в выходном растворе от сроков эксплуатации (объект «Радуга»)

Статистические показатели рядов	Условные обозначения	Ag	Cu	Цветность	Мутность
Корреляция, усл. ед.	R_{xy}	-0,052	-0,442	0,049	0,229
Детерминация, %	$D_{t,xy}$	0,3	19,5	0,2	5,2
Неопределенность, %	$U_{t,xy}$	99,7	80,5	99,8	94,8
Сумма рядов	Sum	0,849	20,356	2,496	24,460
Среднее рядов	S_{rd}	0,010	0,242	0,277	2,718
Исходные концентрации		0,019	0,32		
Конечные концентрации		0,007	0,14		

Примечание.

R_{xy} — коэффициент корреляции, показывает направление зависимостей между двумя рядами;

$D_{t,xy}$ — коэффициент детерминации, характеризует величину «сцепления» между рядами в процентах;

$U_{t,xy}$ — коэффициент неопределенности, объясняет влияние на изучаемую связь неизвестных причин и обстоятельств (необъясненная дисперсия);

Sum — суммы рядов;

S_{rd} — среднее рядов.

«предел износа электродов» возникнет тогда, когда коэффициент корреляции между сроком работы установки и концентрациями металлов в выходном растворе достигнет величины $\geq 0,29 \dots 0,30$ усл. ед. При этом необходимо, по крайней мере, провести какие-то технические работы. Возможно соответствующее ранжирование: при $R_{xy} = 0,05$ — один перечень работ, при $R_{xy} = 0,100$ — другой.

Табл. 2 и 3 предназначены для сравнения реальных концентраций серебра и меди в растворах с их расчетным расходом. Из них следует, что соотношение концентраций по гигиеническим показателям и расчетным данным только по амплитуде рядов в среднем составляет $0,484 : 0,112 = 4,3$ (серебро) и $11,710 : 6,520 = 1,8$ (медь). То есть в раствор переходит только четверть исходного количества серебра и половина исходного количества меди⁴.

Представленные в таблицах данные позволяют уточнить расчет расхода металлов и, возможно, конкретизируют используемую расчетную методику. Кроме того, необходимо учитывать, что ионы серебра и меди взаимодействуют между собой, что необходимо принимать во

⁴ Данное утверждение требует конкретизации дополнительными наблюдениями.

внимание при оценках их содержания как по гигиеническим данным, так и в расчетах.

В табл. 4 показаны зависимости между расчетными и определяемыми концентрациями серебра и меди. Связь между значениями концентрации серебра сильнее, чем между концентрациями меди. В целом эти связи относятся к категории стохастических, прямых, средней силы. Данный факт указывает на то, что чем больше расчетный расход металлов, тем больше их содержание в лабораторных анализах, что логично.

С другой стороны, проанализированные значения содержания ионов в обработанной воде представлены рядами из 84 наблюдений за четыре года с указанными в табл. 3 данными, расчетные значения — 63 наблюдениями.

В отношении лабораторных данных погрешности ожидаемой линейной функции снижения концентраций могут быть обусловлены условиями отбора, хранения, доставки, субъективными причинами и иными обстоятельствами. Ошибки средних рядов по серебру в 10 раз, а по меди — в 26 раз меньше их средних (см. табл. 2). Кроме того, коэффициенты аппроксимации линейных скоростей износа электродов

Таблица 2

Свойства рядов по содержанию металлов на выходе из патрубка установок и на входе в установку (расчетный расход) по срокам работы

Из протоколов				Расчетный расход металлов		
	Дни	Ag	Cu	Дни	Ag	Cu
R_{xy}		-0,052	-0,442		-0,023	-0,440
$D_{t,xy}$		0,300	19,50		0,100	19,400
$U_{t,xy}$		99,7	80,50		99,900	80,600
<i>Sum</i>	59 032	0,849	20,356	39 301	91,000	421,500
S_{rd}	703	0,010	0,242	624	1,444	6,690
M_{ist}	33,073	0,001	0,009	49,710	0,192	0,304

Примечание. M_{ist} = ошибка средней.

Таблица 3

Статистика сравниваемых рядов по срокам эксплуатации

Статистические показатели рядов	Из протоколов (гигиенические показатели)		Расчетный расход металлов	
	Ag	Cu	Ag	Cu
Мода	0,009	0,17	0,72	7,45
Медиана	0,008	0,240	0,830	6,900
Максимум	0,113	0,490	6,730	12,650
Минимум	0,001	0,007	0,210	0,940
Амплитуда	0,112	0,484	6,520	11,710

Таблица 4

Зависимости между рядами концентраций металлов (изменения концентраций в течение 1466 дней) на выходе и на входе

Рассчитанные зависимости	По концентрациям серебра	По концентрациям меди
R_{xy}	0,428	0,132
$D_{t,xy}$	18,3	1,8
$U_{t,xy}$	81,7	98,2

определены дробными значениями: 0,0602 и 0,213 соответственно для серебра и меди, что наряду с размерами ошибок подтверждает репрезентативность средних. Такие факты позволяют оценить анализируемые значения как достаточно представительные.

В отношении рядов расчетных расходов металла ошибки средних не превышают их величины и представлены соотношениями: по серебру 7,5 (1,444 / 0,192), по меди 22 (6,690 / 0,304), что и следует из табл. 3.

Несмотря на репрезентативность полученных данных, ряды значений расхода металлов не являются монотонными из-за неравномерностей интервалов времени между задаваемыми величинами. Так, для расчетных значений в рядах интервал между датами, на которые выполнен расчет, может составлять от двух дней до восьми и более.

Возможно, что данное обстоятельство является определяющим в обнаруживаемых колебаниях концентраций ионов в рядах лабораторных результатов.

Гигиеническая оценка безопасности и надежности

Гигиеническая оценка безопасности и надежности оборудования выполнена методом снижения размерностей концентраций ионов, обоснованным теорией евклидовых метрик в *n*-мерном пространстве. Получаемый «индекс вредности» (или обобщенный/альтернативный показатель) при условии «не более норматива» оценивается по разме-

Гигиеническая оценка эффективности работы установки «Радуга» в показателях вредности (I_v)

Параметры	Нормативные требования	I_v , усл. ед.
1. Ag	Не более 0,050 мг/дм ³	0,907
2. Cu	Не более 2,0 мг/дм ³	0,545
3. Оценка суммы концентраций Ag + Cu	Не более 0,050 мг/дм ³ и не более 2,0 мг/дм ³	0,867
4. Мутность растворов	Не более 2,0 мг/дм ³	0,062
5. Цветность растворов	Не более 20 град.	0,025
6. Оценка суммы показателей: Мутность + Цветность	Не более 2,0 мг/дм ³ и не более 20 град.	0,174
7. Общая оценка: оценка содержания суммы характеристик Ag + Cu + Мутность + Цветность	Не более 0,050 мг/дм ³ , не более 2,0 мг/дм ³ , не более 2,0 мг/дм ³ , не более 20 град	0,878

ру в условных единицах расстояний между нормативами и реальными значениями (I_v):

1. Если I_v больше 1,0 усл. ед. — в массивах данных пар «Норматив — Результат» имеют место превышения нормативных требований.

2. Если I_v меньше 1,0 усл. ед. — в массивах данных пар «Норматив — Результат» нет превышений нормативных требований.

В табл. 5 показаны индексы вредности для отдельных показателей концентраций серебра, меди, мутности, цветности, а также в их суммарных комбинациях: по парам и в совокупности четырех комбинаций. Последнее значение **0,878 усл. ед.** оценивает запас гигиенической безопасности: полный отказ установок в ее обеспечении определяется достижением величины показателя больше 1,0 усл. ед. (из ранее описанного условия).

Выводы

Результаты лабораторного контроля установки олигодинамических растворов характеризуют относительное санитарное благополучие на уровне 0,878 усл. ед., что на 0,122 усл. ед. меньше предела, после которого может возникнуть неблагоприятная санитарная ситуация. Данное обстоятельство связано с износом электродов при четырехлетнем сроке эксплуатации и требует соответствующих технических мероприятий по предупреждению снижения заданного уровня эффективности обеззараживания воды. Этот уровень определяется по исходной концентрации в начале эксплуатации объек-

та и дате последнего лабораторного исследования.

Кроме того, выявлены зависимости в содержании ионов металлов, а также показателей мутности и цветности от продолжительности работы установки. Эти наблюдения могут стать основой для разработки методики «Гигиеническая оценка и прогноз эксплуатационных сроков олигодинамических установок».

Таким образом, обеззараживание воды в плавательных бассейнах с помощью ионов серебра и меди может представлять конкуренцию для традиционных методов, так как, помимо общеизвестного пролонгированного обеззараживающего эффекта, влияние на органолептические показатели качества воды незначительно.

Библиографический список

1. Kędziora A., Speruda M., Krzyżewska E., Rybka J., Łukowiak A., Bugla-Płoskońska G. Similarities and differences between silver ions and silver in nanofoms as antibacterial agents // International Journal of Molecular Sciences. 2018. Vol. 19 (2). 444.
2. Benli B., Yalın C. The influence of silver and copper ions on the antibacterial activity and local electrical properties of single sepiolite fiber: A conductive atomic force microscopy (C-AFM) study // Applied Clay Science. 2017. Vol. 146. Pp. 449–456.
3. Wang F., Sun Z., Yin J., Xu L. Preparation, Characterization and Properties of Porous PLA/PEG/Curcumin Composite Nanofibers for Antibacterial Application // Nanomaterials. 2019. Vol. 9 (4). 508.

4. Zhang E., Zhao X., Hu J., Wang R., Fu S., Qin G. Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants // *Bioactive Materials*. 2021. Vol. 6 (8). Pp. 2569–2612.

5. Mohiti-Asli M., Pourdeyhimi B., Lobo E. G. Novel, silver-ion-releasing nanofibrous scaffolds exhibit excellent antibacterial efficacy without the use of silver nanoparticles // *Acta Biomaterialia*. 2014. Vol. 10 (5). Pp. 2096–2104.

6. Вишнякова Е. А. Особенности реакционной способности наночастиц серебра в водных растворах: дис. ... канд. хим. наук. Красноярск, 2013. 122 с.

7. Шульгина Т. А. Изучение антимикробных свойств дисперсных систем на основе наночастиц серебра и меди и обоснование перспектив их использования: дис. ... канд. биол. наук. Оболensk, 2015. 117 с.

8. Wyczarska-Kokot J., Piechurski F. Application of Nanosilver in Swimming Pool Water Treatment Technology // *Proceedings of the 2nd International Electronic Conference on Water Sciences*. 2018. Vol. 2 (5). 4944.

9. Weicheng Zhang, Bangding Xiao, Tao Fang. Chemical transformation of silver nanoparticles in aquatic environments: Mechanism, morphology and toxicity // *Chemosphere*. 2018. Vol. 191. Pp. 324–334.

10. Ramzan U., Majeed W., Hussain A. A., Qurashi F., Qamar S. U. R., Naeem M., Uddin J., Khan A., Al-Harrasi A., Razak S. I. A. et al. New Insights for Exploring the Risks of Bioaccumulation, Molecular Mechanisms, and Cellular Toxicities of AgNPs in Aquatic Ecosystem // *Water*. 2022. Vol. 14 (14). 2192.

11. Гончарук В. В. Обеззараживание воды на водоканалах. Новый подход // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2020. Т. 28, № 2. С. 141–151.

12. Погорельский И. П., Фролов Г. А., Гурин К. И., Лундовских И. А., Лещенко А. А., Дурнев Е. А., Менухова В. С., Смирнов Г. Г. Сочетанное действие наночастиц серебра и перекиси водорода на жизнеспособность и ультраструктуру клеток *Bacillus cereus* // *Дезинфекционное дело*. 2014. № 2. С. 35–39.

References

1. Kędziora A., et al. Similarities and differences between silver ions and silver ions in nanoforms as antibacterial agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, vol. 19 (2), 444.

2. Benli B., Yalın C. The influence of silver and copper ions on the antibacterial activity and local electrical properties of single sepiolite fiber. A conductive atomic force microscopy (C-AFM) study. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 449–456.

3. Wang F., Sun Z., Yin J., Xu L. Preparation, characterization and properties of porous PLA/PEG/Curcumin Composite Nanofibers for Antibacterial Application. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9 (4), 508.

4. Zhang E., et al. Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants. *Bioactive Materials*, 2021, vol. 6 (8), pp. 2569–2612.

5. Mohiti-Asli M., Pourdeyhimi B., Lobo E. G. Novel, silver-ion-releasing nanofibrous scaffolds exhibit excellent antibacterial efficacy without the use of silver nanoparticles. *Acta Biomaterialia*, 2014, vol. 10 (5), pp. 2096–2104.

6. Vishnyakova E. A. *Osobennosti reaktivnosti nanochastits serebra v vodnykh rastvorakh. Diss. kand. khim. nauk* [Features of reactivity of silver nanoparticles in aqueous solutions. PhD in Sci. Chem. diss.]. Krasnoyarsk, 2013, 122 p.

7. Shul'gina T. A. *Izuchenie antimikrobnnykh svoystv dispersnykh sistem na osnove nanochastits serebra i medi i obosnovanie perspektiv ikh ispol'zovaniya. Diss. kand. biol. nauk* [Study of antimicrobial properties of disperse systems based on silver and copper nanoparticles and substantiation of prospects for their application. PhD in Sci. Bio. diss.]. Obolensk, 2015, 117 p.

8. Wyczarska-Kokot J., Piechurski F. Application of nanosilver in swimming pool water treatment technology. *Proceedings of the 2-nd International Electronic Conference on Water Sciences*, 2018, vol. 2 (5), 4944.

9. Weicheng Zhang, Bangding Xiao, Tao Fang. Chemical transformation of silver nanoparticles in aquatic environments: Mechanism, morphology and toxicity. *Chemosphere*, 2018, vol. 191, pp. 324–334.

10. Ramzan U., et al. New insights for exploring the risks of bioaccumulation, molecular mechanisms, and cellular toxicities of AgNPs in Aquatic Ecosystem. *Water*, 2022, vol. 14 (14), 2192.

11. Goncharuk V. V. *Obezrazhivanie vody na vodokanalakh. Noviy podkhod* [Water disinfection at the water utilities. New approach]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry for Sustainable Development*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 141–151.

12. Pogorel'skiy I. P., et al. *Sochetannoe deystvie nanochastits serebra i perekisi vodoroda na zhiznesposobnost' i ul'trastrukturu kletok Bacillus cereus* [Combined effect of silver nanoparticles and hydrogen peroxide on the viability and ultra-structure of *Bacillus cereus* cells]. *Dezinfektsionnoe delo – Disinfection Engineering*, 2014, no. 2, pp. 35–39.