

MEDICAL METALS SCIENCE

PACS numbers: 52.77.Dq, 52.80.Wq, 61.43.Gt, 61.46.Hk, 62.23.St, 68.37.Hk, 81.07.Wx

Особенности получения плазмоэрозионных нанодисперсных гидрозолей серебра, их бактерицидные и фунгицидные свойства

С. Н. Захарченко, Н. А. Шидловская, А. Е. Перекос*,
К. Г. Лопатко**, О. С. Савлук***

*Институт электродинамики НАН Украины,
просп. Победы, 56,
03057 Киев, Украина,*

**Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина*

***Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
ул. Героев Обороны, 15,
03041 Киев, Украина,*

****Институт колloidной химии и химии воды
им. А. В. Думанского НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 42,
03142 Киев, Украина*

Описаны особенности плазмоэрозионного метода получения устойчивых к седиментации нанодисперсных гидрозолей Ag и работы реализующего его экспериментального лабораторного оборудования. Приведены резуль-

Corresponding author: Serhii Mykolaiovich Zakharchenko
E-mail: snzakhar@ukr.net

*Institute of Electrodynamics, N.A.S. of Ukraine,
56 Peremohy Ave., UA-03057 Kyiv, Ukraine*

**G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

***National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroyiv Oborony Str., UA-03041 Kyiv, Ukraine*

****A. V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry, N.A.S. of Ukraine,
42 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. M. Zakharchenko, N. A. Shydlovskaya, A. O. Perekos, K. G. Lopatko, and O. S. Savluk, Features of Obtaining of Plasma-Erosion Nanodispersed Silver Hydrosols and Their Bactericidal and Fungicidal Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 6: 829–851 (2020) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.42.06.0829](https://doi.org/10.15407/mfint.42.06.0829).

таты растровой электронной микроскопии нанодисперсных плазмоэрзационных частиц Ag и распределение их по размерам. Приведена методика и представлены результаты сравнительного анализа бактерицидного эффекта водных растворов ионов и наночастиц Ag на *Escherichia coli* 1257 и их фунгицидного эффекта на *Candida albicans* и *Aspergillus niger* F-171 при разных концентрациях и длительности действия препаратов. Даны рекомендации по применению описанных препаратных форм дезинфицирующих агентов.

Ключевые слова: плазмоэрзационное диспергирование, наноразмерные частицы Ag, гидрозоли, разрядные импульсы, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, бактерицидный эффект, фунгицидный эффект.

Описано особливості плазмоерозійного методу отримання стійких до седиментації нанодисперсних гідрозолів Ag та роботи експериментального лабораторного устаткування, що його реалізує. Наведено результати растрової електронної мікроскопії нанодисперсних плазмоерозійних частинок Ag та розподіл їх за розмірами. Наведено методику і представлено результати порівняльного аналізу бактерицидного ефекту водних розчинів іонів і наночастиночок Ag на *Escherichia coli* 1257 та їх фунгіцидного ефекту на *Candida albicans* та *Aspergillus niger* F-171 при різних концентраціях і тривалості дії препаратів. Представлено рекомендації щодо застосування описаних препаратних форм дезінфектантів.

Ключові слова: плазмоерозійне диспергування, нанорозмірні частинки Ag, гідрозолі, розрядні імпульси, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, бактерицидний ефект, фунгіцидний ефект.

The features of the plasma-erosion method for preparation of Ag nano-dispersed hydrosols resistant to sedimentation and the operation of experimental laboratory equipment for its implementation are described. The results of scanning electron microscopy of nanodispersed plasma-erosive Ag particles and their size distribution are presented. A method and the results of a comparative analysis of the bactericidal effect of aqueous solutions of Ag ions and nanoparticles on *Escherichia coli* 1257 and their fungicidal effect on *Candida albicans* and *Aspergillus niger* F-171 at various concentrations and duration of action of the drugs are presented. Recommendations on the application of the described preparation forms of disinfectants are given.

Key words: plasma-erosion dispersion, Ag nanosize particles, hydrosols, discharge pulses, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, bactericidal effect, fungicidal effect.

(Получено 25 сентября 2019 г.; окончат. вариант — 20 февраля 2020 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазмоэрзационный метод получения наноразмерных частиц металлов и сплавов в рабочих жидкостях с низкой удельной электропроводностью [1–3] является развитием искроэрзационного метода

получения микроразмерных металлических частиц [4–8] в направлении повышения их дисперсности. Основное отличие плазмоэрозионного метода от искроэрзационного — ограничение эволюции значительной части плазменных каналов между поверхностями соседних металлических гранул, погруженных в рабочую жидкость, предыскровой стадией стримера или лидера [3, 9, 10]. Это позволило на порядок снизить энергию, подводимую в каждый отдельно существующий плазменный канал и, как следствие, размеры получаемых частиц, а также расширить область применения метода не только для получения микроразмерных частиц металлов и сплавов, в том числе и многокомпонентных [4, 5, 7, 11–16], но и в направлении повышения эффективности получения гидроксидов образующих коагулянт металлов [17–24] и гидрозолей биологически активных металлов [2, 25–32], одним из которых является серебро.

Применение ионов серебра для обеззараживания и консервации питьевых и бытовых вод показало свою эффективность в течение многих лет [33]. Однако из-за окисления и образования других термодинамически устойчивых связей концентрация активных ионов серебра в истинных водных растворах существенно снижается с течением времени, что приводит к необходимости ее восстановления путем добавления соответствующих химических реагентов, например, AgNO_3 в случае реагентного метода получения растворов [27], либо пропускания электрического тока через раствор в случае электрохимического растворения серебряных электродов [33]. Это предполагает частый контроль и вмешательство, что не всегда удобно, а в ряде случаев и невозможно. Компенсирующее увеличение начальной концентрации ионов серебра в большинстве случаев не может быть реализовано, поскольку в этом случае значительно возрастает токсичность раствора. Кроме того, в случае реагентного метода получения ионов серебра, в воде постоянно будут накапливаться кислотные остатки, например, NO_3^- , что существенно снижает ее качество.

Особенностью текущего этапа развития технологий водоподготовки является необходимость повышения срока хранения обрабатываемых вод при одновременном снижении их токсичности в условиях повышенной резистентности микроорганизмов к традиционным дезинфициантам [27–30, 34]. Поэтому наряду с разработками новых инактивирующих материалов и методов их получения актуальной и важной задачей остается исследование новых препаратных форм традиционных биоцидных средств.

Одной из таких форм могут быть устойчивые к седиментации гидрозоли биоцидных металлов с размерами дисперской фазы до сотен нанометров [25, 27–30, 35]. Благодаря высокому отношению площади поверхности к объему наноразмерных частиц дисперской фазы золей, для них характерно повышенное влияние сил поверх-

ностного натяжения, что определяет появление новых физико-химических свойств по сравнению с массивными образцами тех же материалов, которые имеют строго упорядоченную структуру.

Так, за счет давления сил поверхностного натяжения энергия Гиббса таких частиц имеет не только так называемую «объемную» составляющую, которая имеет отрицательный знак и зависит от третьей степени радиуса частицы, но и так называемую «поверхностную» составляющую, которая всегда положительна и зависит от второй степени радиуса частицы [36]. Из-за наличия положительной «поверхностной» составляющей энергия Гиббса наночастицы может быть существенно больше, чем у массивного образца, что приводит к снижению температуры ее плавления [37] и упрощает эмиссию ионов с ее поверхности. Также наночастицы могут содержать специфические фазы, наблюдаемые в массивных материалах только при воздействии высоких температур и давлений, а электрокинетический потенциал таких частиц может существенно отличаться от потенциала микрочастиц и т.д. [37–40].

Кроме того, важными особенностями ультрадисперсных золей металлов являются пониженная их токсичность по сравнению с ионами и наличие так называемого «эффекта депо» [2, 25], когда дисперсная фаза становится источником ионов для дисперсионной среды, стабилизируя их концентрацию с течением времени [41], что крайне важно для решения поставленной задачи. Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей получения плазмоэрозионных нанодисперсных гидрозолей серебра и анализ их бактерицидного и фунгицидного действия по сравнению с водными растворами его ионов.

2. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЭРОЗИОННЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ ГИДРОЗОЛЕЙ СЕРЕБРА

Как в случае искроэрозионного, так и в случае плазмоэрозионного диспергирования гранул металлов и сплавов, они помещаются в разрядную камеру (поз. 6 на рис. 1), заполненную рабочей жидкостью с низкой удельной электропроводностью, а через электроды к их слою периодически подводятся импульсы электрической энергии от формирователя разрядных импульсов (ФРИ). В результате между поверхностями множества соседних гранул в течение практически каждого импульса разрядного тока формируются плазменные каналы, основные механизмы возникновения которых (электрический взрыв микровыступов на поверхности соседних гранул, электрический пробой поверхностных пленок с низкой электропроводностью, электрический пробой рабочей жидкости и электрический пробой микропузырьков газа в рабочей жидкости) описаны в [3]. В процессе преобразования электрической энергии в тепловую

прилегающие к плазменным каналам участки металлических гранул расплавляются, а часто и испаряются, являясь источником материала для формирования эрозионных частиц. Жидкая и газообразная фазы металла под действием газо-, термо- и электродинамических сил отделяются от поверхности гранул и попадают в парогазовую среду, возникающую при испарении рабочей жидкости в прилегающих к плазменным каналам участках [42].

На этапе расширения плазменных каналов степень ионизации, температура и давление газа в них растут. Эти факторы приводят к снижению их электрического сопротивления, что в случае, если не наблюдается снижения напряжения на них, например, вследствие его перераспределения между другими последовательно соединенными каналами, повышает мощность электрического тока, выделяемую в них. Это приводит к еще большему повышению степени ионизации, температуры и давление газа в таких каналах, снижая их электрическое сопротивление. Таким образом, наблюдается положительная обратная связь по току, приводящая к лавинообразному развитию плазменных каналов. В процессе эволюции в случае отсутствия ограничения мощности, выделяемой электрическим током в плазменных каналах, они могут трансформироваться в искровые [9, 43].

Вследствие положительной обратной связи по току, температура и давление в искровом канале растут. Под их воздействием газ и зарженные частицы, содержащиеся в канале, стремительно удаляются в направлениях, перпендикулярных оси канала, расширяя его. Если скорость поступления новых частиц в канал станет ниже скорости их разлета, то их концентрация начнет снижаться. Снижение концентрации зарженных частиц (ионов и электронов) приведет к увеличению его электрического сопротивления, уменьшению силы протекающего тока, энергии выделяемой им и, как следствие, к лавинообразному падению давления в центре канала ниже атмосферного. Это приводит к быстрому вскипанию расплавленного металла из прилегающих к плазменным каналам участков металлических гранул, его выплескиванию в канал и быстрому охлаждению при контакте с парогазовой средой на внешней границе канала.

При переходе металла из газообразного в жидкое состояние начинают формироваться его эрозионные частички. Окончательное формирование их формы и структурно-фазового состояния происходит при их затвердевании в процессе дальнейшего охлаждения [4, 13, 14]. Канал склоняется, порождая ударную волну и кавитационные явления, и протекание тока с выделением энергии в нем прекращается. Как правило, энергия, выделяющаяся в искровом канале, на порядки превосходит энергию, выделяющуюся в канале стримера или лидера. Вследствие этого средние размеры искроэро-

зационных частиц составляют, в зависимости от конкретного режима их получения, единицы–десятки микрометров [4, 12, 13, 44], в то время как размеры плазмоэрозионных частиц составляют десятки–сотни нанометров [2, 35, 45].

Одним из способов ограничения энергии, выделяющейся в плазменных каналах, и предотвращения их трансформации в искровые является ограничение длительности разрядных импульсов тока на уровне десятых долей–единиц микросекунд [45]. Для его реализации в разрядном контуре ФРИ необходимо применение дорогостоящих быстродействующих полностью управляемых ключей, например, мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором [46]. Другим способом является вибрационная активация слоя гранул в процессе их диспергирования [1, 18]. Ее влияние на условия протекания импульсов электрического тока в слое метал-

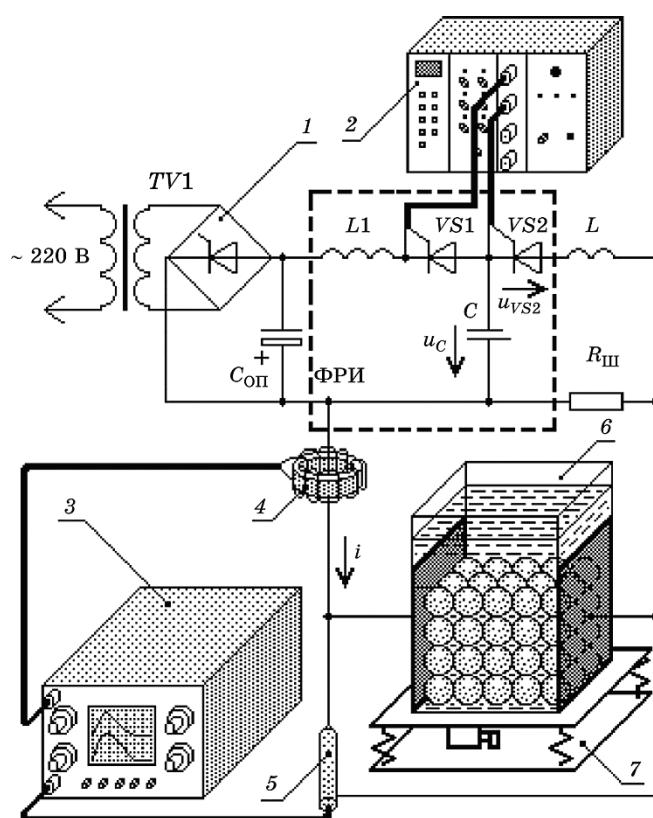


Рис. 1. Функциональная схема установки плазмоэрозионного диспергирования.

Fig. 1. Functional scheme of an installation of plasma-erosion dispersion.

лических гранул подробно описано в [3] и основывается на следующих эффектах:

1) вследствие механического разрушения поверхностных пленок гранул с низкой удельной электропроводностью минимальные значения напряжения, достаточные для возникновения плазменных каналов, снижаются [47];

2) из-за вибрационного «вспушивания» слоя гранул увеличиваются средние расстояния между поверхностями соседних гранул, что, с одной стороны, способствует увеличению сопротивления плазменных каналов, а, следовательно, уменьшению силы тока в них, а, с другой стороны, продлевает предыскровую стадию (стрипера либо лидера) эволюции плазменных каналов;

3) постоянное перемещение гранул относительно друг друга вследствие вибрационного воздействия способствует как увеличению скорости миграции плазменных каналов по поверхности одной пары гранул, так и повышению скорости переключения плазменных каналов на соседние пары гранул. Это приводит к высокочастотной (сотни килогерц) модуляции импульса разрядного тока и появлению в нем ярко выраженных мод длительностью единицы–десятки микросекунд [10, 18].

Все эти факторы вместе взятые приводят к уменьшению энергии, выделяемой в каждом плазменном канале, в десятки раз по сравнению с режимами без применения вибрационной активации слоя. Данный способ показал свою эффективность даже в случае использования более дешевых и простых тиристорных ФРИ [6, 48–50]. Функциональная схема тиристорной лабораторной технологической установки получения гидрозолей биологически активных металлов методом плазмоэрозионного диспергирования слоя их гранул с использованием вибрационной активации приведена на рис. 1. Помимо разрядной камеры со слоем исходных гранул (поз. 6), в ее состав входят: генератор разрядных импульсов, состоящий из источника регулируемого постоянного напряжения, ФРИ и блока управления генератором (поз. 2), вибрационный стол (поз. 7) и измерительная аппаратура в составе двухканального запоминающего осциллографа С8-17 (поз. 3), измерительного высокочастотного трансформатора тока (поз. 4) и делителя напряжения 1:10 (поз. 5) [18, 19].

Источник регулируемого постоянного напряжения питается от однофазной сети с действующим значением напряжения 220 В частотой 50 Гц и состоит из силового согласующего трансформатора TV1, управляемого мостового выпрямителя (поз. 1), и емкостного фильтра $C_{\text{оп}}$. Он обеспечивает регулировку и стабилизацию постоянного напряжения на конденсаторе $C_{\text{оп}}$ в диапазоне от 30 до 260 В при действующих значениях тока до 10 А. Работа таких устройств подробно описана в [51].

В состав ФРИ входят: зарядный высокочастотный дроссель L_1 индуктивностью 300 мГн, зарядный тиристор $VS1$ типа ТБ3-200-10-675, батарея рабочих конденсаторов C типа К75-17 и разрядный тиристор $VS2$ типа ТБ 353-800-18-763. Конструктивная индуктивность свитых в пару высокочастотных соединительных кабелей — литцендратов на рис. 1 обозначена L и составляла до 2 мГн.

Работа формирователя импульсов подчиняется следующему алгоритму. Управляющий импульс блока управления генератором отпирает зарядный тиристор $VS1$, в результате чего ток протекает по высокодобротному контуру $C_{\text{оп}} - VS1 - L1 - C_{\text{оп}}$, и рабочий конденсатор C в колебательном режиме заряжается до напряжения U_C , которое приблизительно в 1,7 раза [52] превышает напряжение на конденсаторе $C_{\text{оп}}$ в начале процесса заряда рабочего конденсатора C . После того, как вся энергия, запасенная в зарядном дросселе L_1 , расходуется на заряд рабочего конденсатора C и неизбежные потери, ток в зарядном контуре прекращается и тиристор $VS1$ запирается естественным образом [51], чему способствует появление обратного напряжения на нем в результате заряда конденсатора C до напряжения, превышающего напряжение конденсатора $C_{\text{оп}}$. На осциллограмме (рис. 2) описанные процессы соответствуют интервалу времени от 3,67 мс до 3,95 мс с момента начала развертки, а на осциллограмме (рис. 3) — от 0,2 до 0,48 мс.

Заметим, что на осциллограммах рис. 2 и 3 масштаб по оси абсцисс соответствует 0,5 мс в одном делении, а по оси ординат — 156 А в одном делении для тока разрядной камеры i (см. рис. 1), а также 50 В в одном делении для напряжений на конденсаторе u_C и разрядном тиристоре u_{VS2} . Уровню нуля для тока на рис. 2 и 3 соответству-

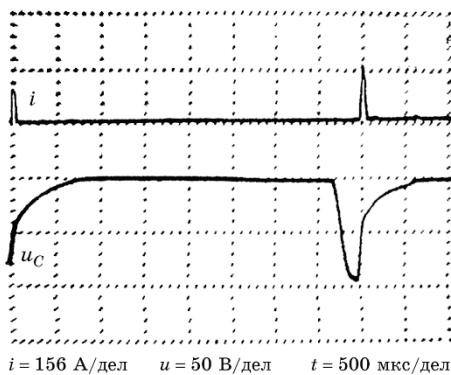


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока i и напряжения на рабочем конденсаторе u_C .

Fig. 2. Oscillograms of discharge current i and voltage at the working capacitor u_C .

ет четвертое деление снизу, для напряжения на конденсаторе u_C (рис. 2) — третье, для напряжения на тиристоре u_{VS2} (рис. 3) — нулевое. Поскольку напряжение на конденсаторе измерялось относительно положительного полюса источника постоянного напряжения, то на рис. 2 заряженному состоянию C соответствуют отрицательные относительно установленного уровня нуля значения u_C . Все это время разрядный тиристор $VS2$ остается закрытым, поэтому по мере заряда конденсатора C , на нем возникает и растет напряжение, которое измерялось относительно его катода (см. рис. 1) и на рис. 3 имеет положительные значения.

По истечении данного временного промежутка еще в течение некоторого времени (около 50 мкс), необходимого для гарантированного восстановления запирающих свойств тиристора $VS1$, оба ключа остаются закрытыми и, также как конденсатор C , находятся под напряжением. Затем блок управления формирует второй управляющий сигнал для разрядного тиристора $VS2$, который вызывает его отпирание и разрядный ток протекает по контуру C —разрядная камера— L — $VS2$ — C . Этому соответствует интервал времени от 4 до 4,05 мс на рис. 2 и от 0,53 до 0,58 мс на рис. 3. Напряжение на $VS2$ стремительно падает (рис. 3), обеспечивая появление напряжения на разрядной камере (u на рис. 4), а напряжение на рабочем конденсаторе u_C уменьшается плавно на интервале времени от 4,05 до 4,7 мс (рис. 2) по мере его разряда.

Поскольку частота следования импульсов блока управления f при снятии осциллограмм, приведенных на рис. 2 и 3, была равна 250 Гц, то через 4 мс процессы повторяются. Как видно из рис. 4, при амплитуде около 112 А, разрядный ток в нагрузке (i) протекает

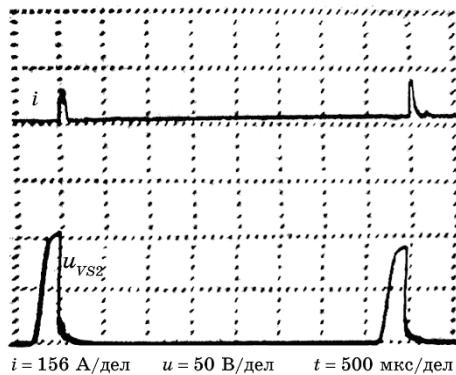


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока i и напряжения на разрядном тиристоре u_{VS2} .

Fig. 3. Oscillograms of discharge current i and voltage on the discharge thyristor u_{VS2} .

в течение приблизительно 30 мкс, что значительно меньше длительности полного разряда рабочего конденсатора (рис. 2). Форма тока близка кискаженной полуволне синусоиды из-за сложной нелинейно-параметрической зависимости эквивалентного сопротивления слоя гранул от протекающего в нем тока [10, 43, 53, 54]. Анализируя форму импульса напряжения на нагрузке (u на рис. 4), можно выделить три характерных участка: участок нарастания напряжения (от 0 до 10 мкс развертки), относительно плоскую вершину (от 10 до 30 мкс) и участок медленного убывания (от 30 мкс).

Отметим, что на первом и втором участках осцилограммы напряжения, а также на осцилограмме тока при протекании его в нагрузке (от 0 до 30 мкс) присутствуют высокочастотные моды, вызванные переключением искровых каналов между различными участками поверхности соседних гранул как в результате их микророзии, так и под действием принудительной вибрации [3, 55].

Первый участок осцилограммы напряжения обусловливается переходными процессами в цепи нагрузки генератора, и его длительность определяется величинами L , C и эквивалентного сопротивления нагрузки. На данном участке ток начинает протекать через нагрузку, его значения растут и формируются основные плазменные каналы. На втором участке ток продолжает протекать через нагрузку, обеспечивая ионизацию плазменных каналов и постепенно убывая, а напряжение на ней изменяется незначительно из-за нелинейности её сопротивления [43, 53]. На третьем участке ток нагрузки пренебрежимо мал. Он обусловлен лишь ничтожной проводимостью дисперсионной среды [56, 57]. Плазменные каналы между гранулами на третьем участке отсутствуют. Рабочий конденсатор C продолжает медленно разряжаться через шунт $R_{\text{ш}}$ (см. рис.

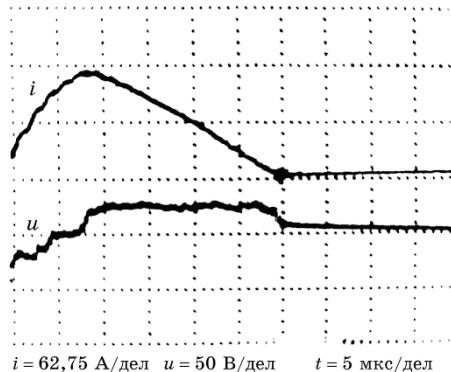


Рис. 4. Осциллограммы разрядного тока i и напряжения на нагрузке u .

Fig. 4. Oscillograms of discharge current i and voltage on the load u .

1) и дисперсионную среду нагрузки. На осцилограмме рис. 2 данный участок соответствует интервалу времени от 4,05 до 4,7 мс с момента начала развертки.

С точки зрения повышения энергоэффективности процесса получения эрозионных порошков длительность данного участка следует по возможности уменьшать. Наличие шунта продиктовано необходимостью обеспечения нулевых начальных условий заряда рабочего конденсатора при любых значениях изменяющегося случайным образом в широких пределах сопротивления нагрузки с целью избегания аварийных режимов работы тиристорного генератора [48, 50]. При отсутствии шунта аварийная ситуация может развиваться по следующему сценарию. Если по какой-либо причине сопротивление нагрузки существенно возрастало, замедляя процесс разряда рабочего конденсатора C , но обеспечивало протекание через разрядный тиристор тока, значение которого было выше его тока удержания (около 70 мА), то с высокой вероятностью, особенно при повышенных частотах следования импульсов, к моменту отпирания зарядного тиристора $VS1$, разрядный тиристор $VS2$ будет оставаться во включенном состоянии. Это приведет к длительному протеканию сквозного тока через оба тиристора $VS1$ и $VS2$, прекратить который сможет только элемент внешней цепи, например, автоматический выключатель. Если в это время сопротивление нагрузки самопроизвольно снизится до рабочих значений, то длительное протекание больших токов может вывести из строя элементы генератора, а в случае отсутствия автоматических выключателей — и элементы питающей сети. При наличии шунта рабочий конденсатор успевает разряжаться через него, независимо от значений сопротивления нагрузки, и разрядный тиристор $VS2$ запирается естественным образом до подачи управляющего импульса на зарядный тиристор $VS1$ [19]. Аварийные режимы в этом случае исключаются.

На описанном выше оборудовании нами были получены гидрозоли серебра при следующих значениях основных параметров: емкость рабочего конденсатора $C = 100 \text{ мкФ}$, напряжение его заряда $U_{C0} = 140 \text{ В}$, частота следования импульсов $f = 50 \text{ Гц}$, частота вибрации стола $f_{\text{в}} = 40 \text{ Гц}$. При этом использовались гранулы неправильной формы со средними размерами в попечнике от 3 до 5 мм. Высота их слоя составляла около 5 мм, длина — 60 мм, а ширина — 100 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась деионизованная вода марки А в режиме без протока.

3. СВОЙСТВА ПЛАЗМОЭРОЗИОННЫХ ЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Увеличенное под растровым электронным микроскопом изображение ультрадисперсных частиц Ag, полученных в воде плазмоэрозионным диспергированием гранул серебра с их принудительной виб-

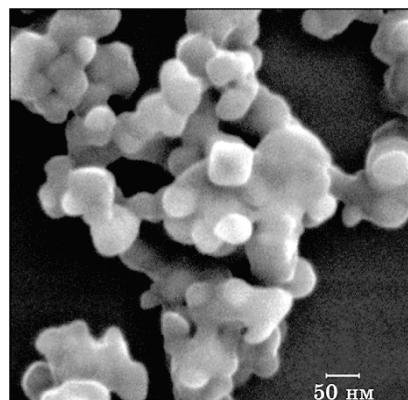


Рис. 5. Дисперсная фаза Ag под электронным микроскопом.

Fig. 5. Dispersed phase of Ag under an electron microscope.

рационной активацией в описанных выше режимах, приведено на рис. 5. Как видим, максимальные размеры отдельных частиц дисперсной фазы исследуемых гидрозолей не превышают 50 нм. Распределение частиц по размерам изучали методом обратного рассеяния на анализаторе размеров частиц Zetasizer Nano ZS фирмы Malvern Instruments Ltd. Как видно из рис. 6, функция распределения частиц по размерам является одномодальной, предположительно логнормальной, с математическим ожиданием явно меньше 10 нм.

Следует также отметить склонность данных ультрадисперсных частиц к агломерации (рис. 5), что, если не принимать специальных мер, снижает устойчивость к седиментации гидрозолей на их основе. Известны способы повышения устойчивости к седиментации гидрозолей металлов добавлением органических (желатин) и неорганических (KCl, NaCl и др.) веществ [28, 58].

В нашем случае оба эти варианта недопустимы, поскольку органические вещества являются питательной средой для многих микроорганизмов, что снижает инактивирующее действие препарата, а значительное изменение ионного состава дисперсионной среды может сделать непригодной для дальнейшего использования обрабатываемую воду. Полученные нами гидрозоли серебра без применения стабилизаторов сохраняли в лабораторных условиях устойчивость к седиментации в течение 6 месяцев [25, 35].

4. МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА БАКТЕРИЦИДНОГО И ФУНГИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРОЗОЛЕЙ И ИОНОВ СЕРЕБРА

Для проведения исследований мы использовали свежие (не более 20

суток с момента получения) плазмоэрозионные гидрозоли, разводимые непосредственно перед опытами дистиллированной стерильной водой до рабочих концентраций серебра $K_p = 0,05, 0,1$ и $0,2$ мг/л, а также истинные растворы, получаемые непосредственно перед опытом добавлением в дистиллированную воду AgNO_3 до таких же концентраций ионов Ag^+ . Концентрацию серебра во всех формах (ионной, в составе металлических частиц, а также в составе окислов и других химических соединений) в каждом из растворов определяли атомно-адсорбционным методом, вследствие чего концентрация ионов Ag^+ в истинных растворах превосходила концентрацию ионов серебра в гидрозолях.

Бактерицидное действие препаратов изучали на санитарно-показательных бактериях *Escherichia coli* 1257, а фунгицидное — на грибках *Candida albicans* и *Aspergillus niger* F-171, полученных из коллекции Государственного НИИ стандартизации и контроля биологических препаратов им. Л. А. Тараксевича (г. Москва). Приготовленные образцы 18-часовых культур с исходной концентрацией, определяемой предварительно оптическими методами на фотоэлектрическом колориметре ФЭК-56, разводили до требуемой концентрации стерильной дистиллированной водой и подвергали действию препаратов в течение фиксированных промежутков времени. Затем обработанные дезинфектантами образцы, а также необработанные контрольные образцы помещались в селективные питательные среды (Эндо — для *E. coli*, Сабуро — для *C. albicans*, Чапека — для *A. niger*), где те находились при температурах 37°C, 27°C и 32°C соответственно в течение 24 часов для *E. coli* и 48 часов для *C. albicans* и *A. niger*. После инкубации в каждом из образцов подсчитывали выжившие колонии образующие единицы N_t — в обработанных и N_0 — в соответствующих контрольных образцах. Бакте-

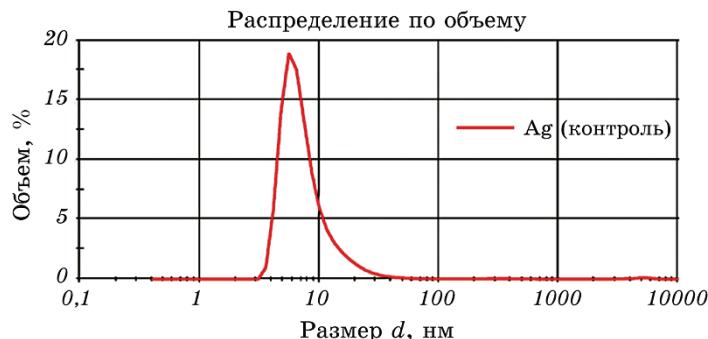


Рис. 6. Распределение по размерам ультрадисперсных плазмоэрозионных частиц Ag.

Fig. 6. Size distribution of ultrafine plasma-erosion Ag particles.

рицидный и фунгицидный эффект оценивали логарифмом отношения N_t к N_0 . Для повышения точности опыты в одних и тех же режимах повторяли 3 раза, а полученные результаты усредняли.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости бактерицидного эффекта коллоидных и истинных растворов серебра от времени экспозиции для *E. coli* и фунгицидного эффекта для *C. albicans* и *A. niger* приведены на рис. 7, 8 и 9 соответственно. На всех трех графиках заполненными фигурами показаны экспериментальные точки, соответствующие бактерицидному либо фунгицидному эффекту коллоидных растворов, а полыми — истинных растворов серебра. Кружочками обозначены режимы с меньшей, а треугольниками — с большей рабочей концентрацией серебра. Сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости бактерицидного либо фунгицидного эффекта коллоидных, а пунктирными — истинных растворов серебра от времени экспозиции. Эти кривые обозначены цифрами от 1 до 4. Четные номера кривых соответствуют действию препаратов, содержащих исключительно ионы, а нечетные — дисперсные частицы и ионы серебра.

Заметим, что абсолютно на всех приведенных графиках (рис. 7–

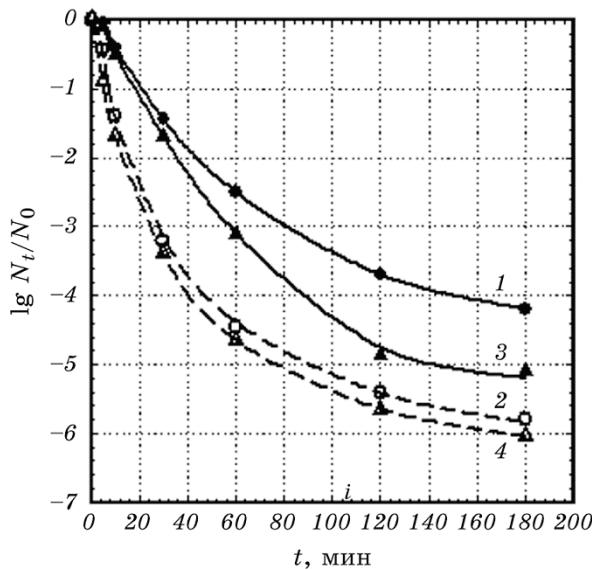


Рис. 7. Бактерицидное действие истинных (2, 4) и коллоидных (1, 3) растворов Ag на *E. Coli*.

Fig. 7. Bactericidal effect of true (2, 4) and colloidal (1, 3) solutions of Ag on *E. Coli*.

9) бактерицидный либо фунгицидный эффект истинных растворов оказался выше, чем коллоидных с той же общей концентрацией серебра. Это свидетельствует в пользу гипотезы о том, что основным инактивирующими фактором исследуемых плазмоэрозионных гидрозолей с описанными выше свойствами являются именно ионы серебра, а дисперсная фаза коллоида является их источником для дисперсионной среды в течение длительного времени растворения частиц. В случае использования коллоидного раствора серебра с той же общей концентрацией, что и в истинном растворе, концентрация его ионов всегда будет ниже, чем в истинном растворе, но стабильнее во времени благодаря постоянному их переходу из дисперсной фазы в дисперсионную среду.

Также на всех графиках наблюдается увеличение бактерицидного либо фунгицидного эффекта с увеличением концентрации препаратов и времени экспозиции в исследованных диапазонах, что свидетельствует о том, что режим насыщения еще не достигнут. Из рисунка 7 видно, что на *E. coli* как истинные, так и коллоидные растворы серебра оказывают значительное бактерицидное действие. При $N_0 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ коллоидные растворы серебра уменьшают концентрацию выживших колоний образующих микроорганизмов на 5 порядков, а истинные растворы серебра — на 6 порядков.

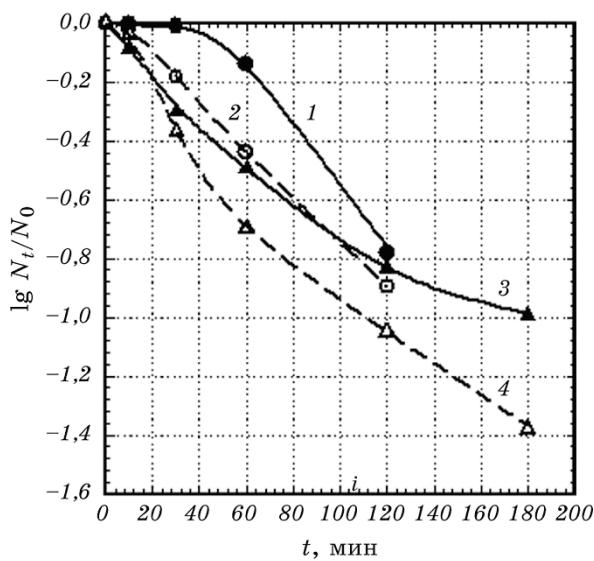


Рис. 8. Фунгицидное действие истинных (2, 4) и коллоидных (1, 3) растворов Ag на *C. Albicans*.

Fig. 8. Fungicidal effect of true (2, 4) and colloidal (1, 3) solutions Ag on *C. Albicans*.

Кривые, обозначенные цифрами 1 и 2, соответствуют рабочей концентрации серебра в препаратах 0,05 мг/л, а обозначенные 3 и 4 — 0,1 мг/л. Увеличение концентрации серебра в коллоидных растворах дает больший эффект, чем аналогичное увеличение концентрации серебра в истинных растворах в исследуемых условиях. Это позволяет предположить, что выбранная концентрация ионов близка к оптимальной для данного режима, а концентрация серебра в коллоидных растворах еще может быть увеличена с целью повышения эффективности препарата. Наиболее интенсивный прирост бактерицидного эффекта на всех кривых рис. 7 наблюдается с увеличением времени экспозиции в течение первого часа. Затем этот прирост замедляется, что говорит о нецелесообразности экспозиций выше 3-х часов в исследуемых условиях.

Кривые, обозначенные на рис. 8 цифрами 1 и 2, соответствуют рабочей концентрации серебра в препаратах 0,1 мг/л, а обозначенные 3 и 4 — 0,2 мг/л. При этом $N_0 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Очевидно, что в исследованных условиях как коллоидные, так и истинные растворы серебра обладают слабым фунгицидным эффектом по отношению к *C. albicans*, уменьшая концентрацию колоний образующих единиц данных микроорганизмов всего в 25 раз при времени экспозиции 3 часа и концентрации серебра 0,2 мг/л. Концентрации серебра 0,1

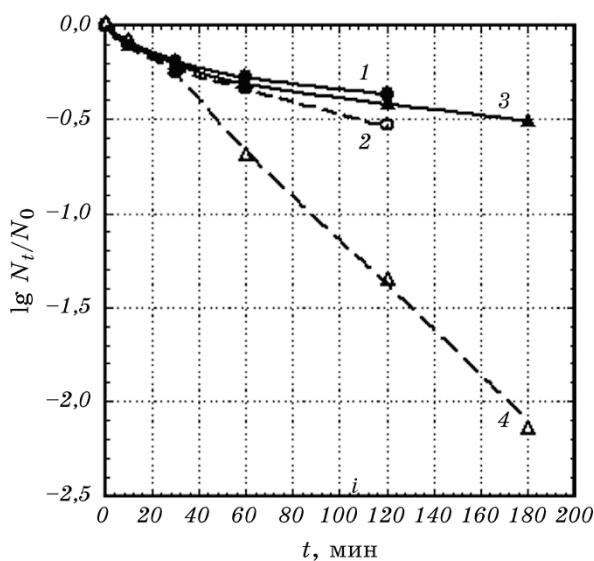


Рис. 9. Фунгицидное действие истинных (2, 4) и коллоидных (1, 3) растворов Ag на *A. Niger*.

Fig. 9. Fungicidal effect of true (2, 4) and colloidal (1, 3) solutions Ag on *A. Niger*.

мг/л в коллоидном растворе вообще недостаточно для получения фунгицидного эффекта при экспозициях менее 30 минут. Анализируя изменение фунгицидного эффекта от концентрации серебра в препаратах и времени экспозиции, можно сделать вывод, что для получения хороших показателей необходимо увеличивать как концентрацию серебра в обоих препаратах, так и время экспозиции.

Кривые, обозначенные на рисунке 9 цифрами 1 и 2, соответствуют рабочей концентрации серебра в препаратах 0,2 мг/л. Для этих серий опытов контрольная концентрация микроорганизмов составила $N_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Кривые, обозначенные 3 и 4, соответствуют концентрации серебра в препаратах 0,4 мг/л. В этих сериях опытов $N_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Как следует из рисунка 9, в данных условиях коллоидные растворы серебра оказались малоэффективными. Исследуемый препарат в данной форме позволил снизить концентрацию выживших *A. niger* всего лишь в 3 раза при времени экспозиции 3 часа. Причем, увеличение концентрации серебра в коллоидных растворах с 0,2 мг/л до 0,4 мг/л не привело к существенному росту фунгицидного эффекта.

Аналогичное увеличение концентрации ионов серебра в истинных растворах при экспозиции 2 часа, напротив вызвало уменьшение концентрации выживших микроорганизмов в 25 раз, что в данных условиях эквивалентно увеличению фунгицидного эффекта в 4 раза. Анализируя полученные результаты, можно предположить, что данный микроорганизм обладает высокой резистентностью к действию коллоидных и истинных растворов серебра с концентрацией ниже 0,4 мг/л. Однако существенная положительная динамика фунгицидного эффекта при росте концентрации ионов серебра позволяет надеяться, что дальнейшее ее увеличение позволит значительно повысить степень инактивации.

6. ВЫВОДЫ

1. Метод плазмоэрзационного диспергирования гранул серебра с их принудительной вибрационной активацией позволяет получать седиментационно устойчивые гидрозоли со средними размерами дисперсной фазы до 10 нм, обладающие выраженным бактерицидным эффектом по отношению к *Escherichia coli 1257* и фунгицидным эффектом по отношению к *Candida albicans*.
2. Дезинфицирующее действие истинных растворов серебра на *Escherichia coli 1257*, *Candida albicans* и *Aspergillus niger F-171* оказалось несколько выше, чем его коллоидных растворов в той же общей концентрации, что свидетельствует в пользу гипотезы о том, что основным инактивирующими фактором исследуемых плазмоэрзационных гидрозолей являются именно ионы серебра, а дисперсионная фаза коллоида является их источником для дисперсионной сре-

ды в течение длительного времени растворения частиц.

3. *Aspergillus niger F-171* обладает высокой резистентностью к действию ионов серебра и его наночастиц в концентрациях ниже 0,4 мг/л.

4. Для некоторых областей применения (медицина, фармакология, длительная консервация питьевой воды на автономных объектах) коллоидная форма серебра является более предпочтительной, чем ионная.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, С. А. Яцюк, К. Г. Лопатько, Е. Г. Афтандилянц, В. А. Святненко, *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, частина 4: 107 (2008).
2. K. G. Lopatko, M. G. Melnichuk, Y. G. Aftandilyants, E. N. Gonchar, V. F. Boretskij, A. N. Veklich, S. N. Zakharchenko, T. I. Tugay, A. V. Tugay, and V. V. Trach, *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGH*, No. 61: 105 (2013).
3. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка*, № 1: 16 (2013).
4. A. E. Berkowitz and J. L. Walter, *J. Mater. Res.*, 2, No. 2: 277 (1987).
5. A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker, K. S. Vecchio, F. E. Spada, E. J. Lavernia, and R. Rodriguez, *J. Magn. Magn. Mater.*, No. 1: 254 (2003).
6. A. A. Shcherba, A. D. Podoltsev, S. N. Zakharchenko, I. N. Kucheryavaya, N. I. Shevchenko, and N. I. Suprunovska, *Технічна електродинаміка*, № 6: 3 (2005).
7. P. K. Nguyen, K. H. Lee, S. I. Kim, K. A. Ahn, L. H. Chen, S. M. Lee, R. K. Chen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *Nanotechnology*, 23: 415604 (2012).
8. Y. Liu, X. Li, Y. Li, Zh. Zhao, and F. Bai, *Appl. Phys. A*, 122: 174 (2016).
9. Н. А. Шидловська, С. М. Захарченко, О. П. Черкаський, *Технічна електродинаміка*, № 2: 5 (2017).
10. Н. А. Шидловська, С. М. Захарченко, О. П. Черкаський, *Технічна електродинаміка*, № 3: 3 (2017).
11. A. E. Perekos, V. A. Chernenko, S. A. Bunyaev, V. P. Zalutskiy, T. V. Ruzhitskaya, O. F. Boitsov, and G. N. Kakazei, *J. Appl. Phys.*, 112: 093909 (2012).
12. P. Ochin, A. V. Gilchuk, G. E. Monastyrsky, Yu. N. Koval, A. A. Shcherba, and S. N. Zaharchenko, *Materials Science Forum*, 738–739: 451 (2013).
13. G. Ya. Kolbasov, A. I. Ustinov, A. A. Shcherba, A. Ye. Perekos, M. O. Danilov, N. V. Vyuno, S. N. Zakharchenko, and G. Hossbah, *J. Power Sources*, 150: 276 (2005).
14. Г. Е. Монастырский, Ю. Н. Коваль, А. П. Шпак, Р. Я. Мусиенко, В. И. Коломыцев, А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, П. Г. Яковенко, *Порошковая металлургия*, № 5–6: 3 (2007).
15. А. А. Щерба, В. В. Кокорин, А. Е. Перекос, Л. А. Олиховская, О. Ф. Бойцов, С. Н. Захарченко, *Металлофиз. новейшие технол.*, 29, № 2: 201 (2007).
16. О. М. Иванова, М. И. Даниленко, Г. Є. Монастирський, В. І. Коломицев, Ю. М. Коваль, А. А. Щерба, С. М. Захарченко, Р. Портє, *Металлофиз. новейшие технол.*, 31, № 5: 603 (2009).

17. А. К. Шидловский, А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, *Энергетика и электрификация*, № 12: 34 (2002).
18. А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, С. А. Яцюк, И. Н. Кучерявая, К. Г. Лопатъко, Е. Г. Афтандилянц, *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, частина 2: 120 (2008).
19. С. Н. Захарченко, *Новини енергетики*, № 6: 41 (2012).
20. N. B. Danilenko, G. G. Savel'ev, N. A. Yavorovskii, M. B. Khaskel'berg, T. A. Yurmazova, and V. V. Shamanskii, *Russian J. Applied Chemistry*, **78**, No. 10: 1631 (2005).
21. Н. Б. Даниленко, А. И. Галанов, Я. И. Корнев, П. В. Балухтин, Л. Н. Шиян, Т. А. Юрмазова, Н. А. Яворовский, Г. Г. Савельев, *Нанотехника*, № 4(8): 81 (2006).
22. N. B. Danilenko, G. G. Savel'ev, N. A. Yavorovskii, and T. A. Yurmazova, *Russian J. Applied Chemistry*, **81**, No. 5: 803 (2008).
23. J. I. Kornev, N. A. Yavorovsky, G. G. Saveliev, A. I. Galanov, S. M. Zaharchenko, A. E. Perekos, N. B. Danilenko, and T. A. Yurmazova, *Proc. of 15th International Symposium on High-Current Electronics (September 21–26, 2008)* (Tomsk: 2008), p. 480.
24. Ia. Kornev, F. Saprykin, G. Lobanova, V. Ushakov, and S. Preis, *J. Electrostatics*, **96**: 111 (2018).
25. А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, К. Г. Лопатъко, Е. Г. Афтандилянц, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, № 22: 74 (2009).
26. A. N. Veklich, K. G. Lopatko, Y. G. Aftandilyants, S. N. Zakharchenko, and V. F. Boretskiy, *Proc. of the VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (September 17–21, 2012)* (Minsk: 2012), vol. 2, p. 495.
27. Т. А. Шульгина, И. А. Норкин, Д. М. Пучиньян, *Фундаментальные исследования*, № 7: 424 (2012).
28. Т. А. Шульгина, О. В. Нечаева, Е. В. Глинская, Н. И. Дарьин, А. С. Торгашова, Д. А. Теслюк, А. В. Бабайлова, Е. А. Панфилова, *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология*, **17**, Вып. 4: 465 (2017).
29. Е. Н. Петрицкая, Д. А. Рогаткин, Е. В. Русанова, *Альманах клинической медицины*, **4**, № 2: 221 (2016).
30. Ю. П. Муха, А. М. Еременко, Н. П. Смирнова, А. И. Михиенкова, Г. И. Корчак, В. Ф. Горчев, А. Ю. Чунихин, *Прикладная биохимия и микробиология*, **49**, № 2: 215 (2013).
31. А. М. Сердюк, А. И. Михиенкова, *Environment and Heals*, № 3: 8 (2011).
32. Е. М. Егорова, А. А. Ревина, Т. Н. Ростовщикова, О. И. Киселева, *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*, **42**, № 5: 332 (2001).
33. Л. А. Кульский, *Серебряная вода* (Киев: Наукова думка: 1987).
34. Л. С. Федорова, Л. И. Арефьева, Л. С. Путинцева, Н. А. Веромкович, *Медicina и здравоохранение. Обзорная информация*, № 2: 3 (1991).
35. А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, К. Г. Лопатъко, Н. И. Шевченко, М. О. Ломко, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, № 26: 152 (2010).
36. С. Ш. Рехвиашвили, Е. В. Киштикова, Б. А. Розенберг, *Журнал технической физики*, **79**, вып. 12: 10 (2009).
37. Г. Б. Сергеев, *Нанохимия* (Москва: Издательство МГУ: 2003).

38. А. И. Гусев, *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии* (Москва: Физматлит: 2007).
39. А. П. Шпак, Ю. А. Куницкий, В. Л. Карбовский, *Кластерные и наноструктурные материалы* (Киев: Издательский дом «Академпериодика»: 2001), т. 1.
40. И. П. Суздалев, *Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов* (Москва: КомКнига: 2006).
41. Е. М. Благитко, В. А. Бурмистров, А. П. Колесников, Ю. И. Михайлов, П. П. Родионов, *Серебро в медицине* (Новосибирск: Наука-Центр: 2004).
42. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка*, № 6: 19 (2012).
43. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка*, № 5: 17 (2012).
44. Н. А. Шидловская, С. Н. Захарченко, А. П. Черкасский, *Технічна електродинаміка*, № 1: 87 (2016).
45. С. Н. Захарченко, И. П. Кондратенко, А. Е. Перекос, В. П. Залуцкий, В. В. Козырский, К. Г. Лопатько, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6, № 5 (60): 66 (2012).
46. С. Н. Захарченко, Ю. В. Руденко, А. П. Черкасский, *Технічна електродинаміка*, № 6: 30 (2016).
47. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, ч. 1: 93 (2010).
48. С. Н. Захарченко, А. Е. Перекос, Н. А. Шидловская, А. И. Устинов, О. Ф. Бойцов, В. З. Войнаш, *Металлофиз. новейшие технол.*, 40, № 3: 339 (2018).
49. А. А. Shcherba, S. N. Zakharchenko, N. I. Shevchenko, N. I. Suprunovskaya, *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, ч. 1: 57 (2005).
50. А. А. Shcherba, S. N. Zakharchenko, N. I. Suprunovskaya, and N. I. Shevchenko, *Технічна електродинаміка*, № 2: 10 (2006).
51. В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко, *Преобразовательная техника* (Киев: Вища школа: 1983).
52. Н. А. Шидловська, С. М. Захарченко, О. П. Черкаський, Ю. В. Руденко, *Технічна електродинаміка*, № 3: 28 (2018).
53. Н. А. Шидловская, С. Н. Захарченко, А. П. Черкасский, *Технічна електродинаміка*, № 6: 3 (2014).
54. Н. А. Шидловская, С. Н. Захарченко, А. П. Черкасский, *Технічна електродинаміка*, № 6: 69 (2015).
55. С. М. Захарченко, *Науковий вісник Національного гірничого університету*, № 1 (133): 62 (2013).
56. С. Н. Захарченко, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, вип. 33: 113 (2012).
57. N. Shydlovska, S. Zakharchenko, and O. Cherkaskyi, *Computational Problems of Electrical Engineering*, 4, No. 2: 77 (2014).
58. Ю. Г. Фролов, *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсионные системы* (Москва: Химия: 1982).

REFERENCES

1. А. А. Shcherba, S. N. Zakharchenko, S. A. Yatsyuk, K. G. Lopat'ko, E. G. Aftandilyants, and V. A. Svyatnenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*.

- Tematychnyy Vypusk ‘Problemy Suchasnoyi Elektrotekhniki’, Part 4: 107* (2008) (in Russian).
2. K. G. Lopatko, M. G. Melnichuk, Y. G. Aftandilyants, E. N. Gonchar, V. F. Boretskij, A. N. Veklich, S. N. Zakharchenko, T. I. Tugay, A. V. Tugay, and V. V. Trach, *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGH*, No. 61: 105 (2013).
 3. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 1: 16 (2013) (in Russian).
 4. A. E. Berkowitz and J. L. Walter, *J. Mater. Res.*, **2**, No. 2: 277 (1987).
 5. A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker, K. S. Vecchio, F. E. Spada, E. J. Lavernia, and R. Rodriguez, *J. Magn. Magn. Mater.*, No. 1: 254 (2003).
 6. A. A. Shcherba, A. D. Podoltsev, S. N. Zakharchenko, I. N. Kucheryavaya, N. I. Shevchenko, and N. I. Suprunovska, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 6: 3 (2005).
 7. P. K. Nguyen, K. H. Lee, S. I. Kim, K. A. Ahn, L. H. Chen, S. M. Lee, R. K. Chen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *Nanotechnology*, **23**: 415604 (2012).
 8. Y. Liu, X. Li, Y. Li, Zh. Zhao, and F. Bai, *Appl. Phys. A*, **122**: 174 (2016).
 9. N. A. Shydlovs’ka, S. M. Zakharchenko, and O. P. Cherkas’kyy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 2: 5 (2017) (in Ukrainian).
 10. N. A. Shydlovs’ka, S. M. Zakharchenko, and O. P. Cherkas’kyy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 3: 3 (2017) (in Ukrainian).
 11. A. E. Perekos, V. A. Chernenko, S. A. Bunyaev, V. P. Zalutskiy, T. V. Ruzhitskaya, O. F. Boitsov, and G. N. Kakazei, *J. Appl. Phys.*, **112**: 093909 (2012).
 12. P. Ochin, A. V. Gilchuk, G. E. Monastyrsky, Yu. N. Koval, A. A. Shcherba, and S. N. Zaharchenko, *Materials Science Forum*, **738–739**: 451 (2013).
 13. G. Ya. Kolbasov, A. I. Ustinov, A. A. Shcherba, A. Ye. Perekos, M. O. Danilov, N. V. Vy whole, S. N. Zakharchenko, and G. Hossbah, *J. Power Sources*, **150**: 276 (2005).
 14. G. E. Monastyrskiy, Yu. N. Koval’, A. P. Shpak, R. Ya. Musienko, V. I. Kolomytsev, A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, and P. G. Yakovenko, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 5–6: 3 (2007) (in Russian).
 15. A. A. Shcherba, V. V. Kokorin, A. O. Perekos, L. O. Olikhovska, O. F. Boytsov, and S. M. Zakharchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **29**, No. 2: 201 (2007) (in Russian).
 16. O. M. Ivanova, M. I. Danylenko, G. E. Monastyrskyy, V. I. Kolomytsev, Yu. M. Koval, A. A. Shcherba, S. M. Zakharchenko, and R. Portier, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 5: 603 (2009) (in Ukrainian).
 17. A. K. Shidlovskiy, A. A. Shcherba, and S. N. Zakharchenko, *Energetika i Elektrifikatsiya*, No. 12: 34 (2002) (in Russian).
 18. A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, S. A. Yatsyuk, I. N. Kucheryavaya, K. G. Lopat’ko, and E. G. Aftandilyants, *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyy Vypusk ‘Sylava Elektronika ta Enerhoefektyvnist’*, Part 2: 120 (2008) (in Russian).
 19. S. N. Zakharchenko, *Novyny Enerhetyky*, No. 6: 41 (2012) (in Russian).
 20. N. B. Danilenko, G. G. Savel’ev, N. A. Yavorovskii, M. B. Khaskel’berg, T. A. Yurmazova, and V. V. Shamanskii, *Russian J. Applied Chemistry*, **78**, No. 10: 1631 (2005).
 21. N. B. Danilenko, A. I. Galanov, Ya. I. Kornev, P. V. Balukhtin, L. N. Shiyan,

- T. A. Yurmazova, N. A. Yavorovskiy, and G. G. Savel'ev, *Nanotekhnika*, No. 4(8): 81 (2006) (in Russian).
22. N. B. Danilenko, G. G. Savel'ev, N. A. Yavorovskii, and T. A. Yurmazova, *Russian J. Applied Chemistry*, **81**, No. 5: 803 (2008).
23. J. I. Kornev, N. A. Yavorovsky, G. G. Saveliev, A. I. Galanov, S. M. Zaharchenko, A. E. Perekos, N. B. Danilenko, and T. A. Yurmazova, *Proc. of 15th International Symposium on High-Current Electronics (September 21–26, 2008)* (Tomsk: 2008), p. 480.
24. Ia. Kornev, F. Saprykin, G. Lobanova, V. Ushakov, and S. Preis, *J. Electrostatics*, **96**: 111 (2018).
25. A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, K. G. Lopat'ko, and E. G. Aftandilyants, *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrayiny*, No. 22: 74 (2009) (in Russian).
26. A. N. Veklich, K. G. Lopatko, Y. G. Aftandilyants, S. N. Zakharchenko, and V. F. Boretskij, *Proc. of the VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (September 17–21, 2012)* (Minsk: 2012), vol. 2, p. 495.
27. T. A. Shul'gina, I. A. Norkin, and D. M. Puchin'yan, *Fundamentalnye Issledovaniya*, No. 7: 424 (2012) (in Russian).
28. T. A. Shul'gina, O. V. Nechaeva, E. V. Glinskaya, N. I. Dar'in, A. S. Torgashova, D. A. Teslyuk, A. V. Babaylova, and E. A. Panfilova, *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya Seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya*, **17**, Iss. 4: 465 (2017) (in Russian).
29. E. N. Petritskaya, D. A. Rogatkin, and E. V. Rusanova, *Almanakh Klinicheskoy Meditsiny*, **4**, No. 2: 221 (2016) (in Russian).
30. Yu. P. Mukha, A. M. Eremenko, N. P. Smirnova, A. I. Mikhenkova, G. I. Korchak, V. F. Gorchev, and A. Yu. Chunikhin, *Appl. Biochem. Microbiol.*, **49**: 199 (2013).
31. A. M. Serdyuk and A. I. Mikhenkova, *Environment and Heals*, No. 3: 8 (2011) (in Russian).
32. E. M. Egorova, A. A. Revina, T. N. Rostovshchikova, and O. I. Kiseleva, *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Khimiya*, **42**, No. 5: 332 (2001) (in Russian).
33. L. A. Kul'skiy, *Serebryanaya Voda* [Silver Water] (Kyiv: Naukova Dumka: 1987) (in Russian).
34. L. S. Fedorova, L. I. Aref'eva, L. S. Putintseva, and N. A. Veromkovich, *Meditina i Zdravookhranenie. Obzornaya Informatsiya*, No. 2: 3 (1991) (in Russian).
35. A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, K. G. Lopat'ko, N. I. Shevchenko, and M. O. Lomko, *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrayiny*, No. 26: 152 (2010) (in Russian).
36. S. Sh. Rekhviashvili, E. V. Kishtikova, and B. A. Rozenberg, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **79**, Iss. 12: 10 (2009) (in Russian).
37. G. B. Sergeev, *Nanokhimiya* [Nanochemistry] (Moscow: Izdatel'stvo MGU: 2003) (in Russian).
38. A. I. Gusev, *Nanomaterialy, Nanostruktury, Nanotekhnologii* [Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies] (Moscow: Fizmatlit: 2007) (in Russian).
39. A. P. Shpak, Yu. A. Kunitskiy, and V. L. Karbovskiy, *Klasternye i Nanostruktturnye Materialy* [Cluster and Nanostructured Materials] (Kyiv: Izd. Dom 'Akademperiodika': 2001), vol. 1 (in Russian).

40. I. P. Suzdalev, *Nanotekhnologiya: Fizikokhimiya Nanoklasterov, Nanostruktur i Nanomaterialov* [Nanotechnology: Physical Chemistry of Nanoclusters, Nanostructures and Nanomaterials] (Moscow: KomKniga: 2006) (in Russian).
41. E. M. Blagitko, V. A. Burmistrov, A. P. Kolesnikov, Yu. I. Mikhaylov, and P. P. Rodionov, *Serebro v Meditsine* [Silver in Medicine] (Novosibirsk: Nauka-Tsentr: 2004) (in Russian).
42. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 6: 19 (2012) (in Russian).
43. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 5: 17 (2012) (in Russian).
44. N. A. Shidlovskaya, S. N. Zakharchenko, and A. P. Cherkasskiy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 1: 87 (2016) (in Russian).
45. S. N. Zakharchenko, I. P. Kondratenko, A. E. Perekos, V. P. Zalutskiy, V. V. Kozyrskiy, and K. G. Lopat'ko, *Vostochno-Europeyskiy Zhurnal Peredovykh Tekhnologiy*, 6, No. 5 (60): 66 (2012) (in Russian).
46. S. N. Zakharchenko, Yu. V. Rudenko, and A. P. Cherkasskiy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 6: 30 (2016) (in Russian).
47. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyy Vypusk 'Syl'ova Elektronika ta Enerhoefektyvnist'*, Part 1: 93 (2010) (in Russian).
48. S. M. Zakharchenko, A. O. Perekos, N. A. Shidlovska, A. I. Ustinov, O. F. Boytsov, and V. Z. Voynash, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 40, No. 3: 339 (2018) (in Russian).
49. A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, N. I. Shevchenko, N. I. Suprunovskaya, *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyy Vypusk 'Syl'ova Elektronika ta Enerhoefektyvnist'*, Part 1: 57 (2005).
50. A. A. Shcherba, S. N. Zakharchenko, N. I. Suprunovskaya, and N. I. Shevchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 2: 10 (2006).
51. V. S. Rudenko, V. I. Sen'ko, and I. M. Chizhenko, *Preobrazovatelnaya Tekhnika* [Conversion Equipment] (Kyiv: Vyshcha Shkola: 1983) (in Russian).
52. N. A. Shydlovs'ka, S. M. Zakharchenko, O. P. Cherkas'kyy, and Yu. V. Rudenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 3: 28 (2018) (in Ukrainian).
53. N. A. Shidlovskaya, S. N. Zakharchenko, and A. P. Cherkasskiy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 6: 3 (2014) (in Russian).
54. N. A. Shidlovskaya, S. N. Zakharchenko, and A. P. Cherkasskiy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 6: 69 (2015) (in Russian).
55. S. M. Zakharchenko, *Naukovyy Visnyk Natsional'noho Hirnychoho Universytetu*, No. 1 (133): 62 (2013) (in Ukrainian).
56. S. N. Zakharchenko, *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrayiny*, Iss. 33: 113 (2012) (in Russian).
57. N. Shydlovska, S. Zakharchenko, and O. Cherkaskyi, *Computational Problems of Electrical Engineering*, 4, No. 2: 77 (2014).
58. Yu. G. Frolov, *Kurs Kolloidnoy Khimii. Poverkhnostnye Yavleniya i Dispersnye Sistemy* [The Course of Colloid Chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems] (Moscow: Khimiya: 1982) (in Russian).