

УДК 621.314: 621.374: 621.9.048.4

А.А. Щерба, С.Н. Захарченко, К.Г. Лопатько,
Н.И. Шевченко, Н.А. Ломко**РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА
НАНОКОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ
МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ**

Проаналізовано та перевірено на практиці ефективність ряду способів підвищення дисперсності та однорідності частинок металів, отриманих методом об'ємного електроіскрового диспергування. Створено розрядно-імпульсну систему виробництва наноколоїдних розчинів металів з комплексом віддаленого контролю параметрів процесу. Визначено вплив параметрів іскроерозійних частинок та дисперсійного середовища на седиментаційну стійкість їх золей. Отримано седиментаційно стійкі золі біологічно активних металів для використання в рослинництві і тваринництві.

Проанализирована и проверена на практике эффективность ряда способов повышения дисперсности и однородности частиц металлов, полученных методом объемного электроискрового диспергирования. Создана разрядно-импульсная система производства нанокolloидных растворов металлов с комплексом удаленного контроля параметров процесса. Определено влияние параметров искроэрозийных частиц и дисперсионной среды на седиментационную устойчивость их золей. Получены седиментационно устойчивые гидрозолы биологически активных металлов для использования в растениеводстве и животноводстве.

Введение. Исследования, проводимые в Украине и в ведущих странах мира в течение последних десяти лет, показали высокую эффективность применения коллоидных растворов наноструктурных (до 100 нм) частиц биологически активных металлов в медицине, биологии, ветеринарии и сельском хозяйстве [3, 5, 6, 14, 18]. Наночастицы биоцидных (Ag, Cu, Zn, Mg) и биогенных (Fe, Co, Mn, Mo) металлов образуют в воде хелатные соединения, состоящие из комплексообразователя, которым является одна или несколько наночастиц, имеющих поверхностный электрический заряд, и лигандов, представленных в гидрозолях молекулами воды [3]. По сравнению с их же ионами, хелаты наночастиц биоцидных металлов менее токсичны и, благодаря своей водной оболочке, сравнительно легко проникают через мембраны клеток, избегают лигандов внутри клетки и являются впоследствии источниками ионов длительного действия с эффектом депо [3].

Исследования авторов и анализ литературных источников показали, что эффективность бактерицидного, ранозаживляющего и биогенного действий коллоидных препаратов на основе наночастиц биологически активных металлов повышается, если размер дисперсной фазы лежит в диапазоне 30...200 нм, частицы однородны по размерам, форме, химическому составу и структурно-фазовому состоянию [3, 5]. Такие растворы обладают высокой агрегационной и седиментационной устойчивостью благодаря высокому электрокинетическому потенциалу частиц, малой их массе и высокой однородности. Поэтому агрегационная и седиментационная устойчивость гидрозолей биологически активных металлов является косвенным показателем их качества.

Одной из причин, препятствующих крупномасштабному внедрению препаратов на основе наночастиц биологически активных металлов, является отсутствие высокоэффективных технологий их массового производства. Среди широко известных методов получения наночастиц металлов (механическое измельчение, испарение и конденсация в вакууме, электрический взрыв тонких проволок, плазмо-химический, термохимическое разложение солей, криохимический, осаждение из растворов, восстановление водородом, золь-гель метод) ни один не обладает высокой производительностью, технологичностью, дешевизной оборудования и конечной продукции [3, 5–7].

Метод объемного электроискрового диспергирования зарекомендовал себя как один из самых эффективных и технологичных при производстве микроразмерных порошков жаро-

прочных, тугоплавких, сверхтвердых, магнитомягких и водородсорбирующих сплавов, а также сплавов с магнитной памятью формы [1, 9, 13, 15–17]. При этом, как правило, в конечном продукте доля наноструктурных частиц составляла не менее 2 %. Совместные исследования ученых Института электродинамики НАН Украины и Национального университета природопользования и биоресурсов Украины последних двух лет позволили развить данный метод в направлении повышения доли наноструктурных частиц в конечной продукции до 80 % за счет использования нового электрофизического подхода – принудительной механической активации слоя исходных гранул металла непосредственно в процессе их объемного электроискрового диспергирования [8, 10, 11, 14].

Целью настоящей работы является изучение влияния параметров разрядных импульсов и технологических условий получения наноструктурных частиц биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования в воде на их размеры и седиментационную устойчивость, а также разработка на этой основе новых подходов создания разрядно-импульсных систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ значимости факторов, повышающих дисперсность и однородность искроэрозионных частиц в процессе их получения;
- разработка и исследование эффективности способов обеспечения оптимальных значений факторов, повышающих дисперсность и однородность искроэрозионных частиц;
- определение влияния параметров искроэрозионных частиц металлов и дисперсионной среды на седиментационную устойчивость их золей;
- разработка и создание разрядно-импульсной системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования;
- исследование параметров полученных искроэрозионных частиц биологически активных металлов и их гидрозолей.

Анализ факторов повышения дисперсности искроэрозионных частиц при объемном электроискровом диспергировании. Как известно, повышению дисперсности искроэрозионных частиц способствуют увеличение скорости миграции искровых каналов по поверхности гранул, скорости нарастания и спада тока в искровом канале и напряжения на нем, а также снижение длительности разрядных импульсов, энергии одиночного искрения и скорости распространения температуры вглубь гранул [8, 10]. Следует отметить, что снижение энергии одиночного искрового разряда не может происходить до бесконечно малой величины. Энергии разряда должно быть достаточно для испарения или хотя бы расплавления минимальной порции металла гранул, достаточной для образования одной искроэрозионной частицы с учетом потерь на разогрев приконтактной области гранул.

В работе [8] приведен анализ факторов, повышающих дисперсность и однородность искроэрозионных частиц металлов, получаемых методом объемного электроискрового диспергирования на стадиях расплавления и испарения части металла из приконтактной зоны гранулы, отделения части металла от гранулы, разделения ее на более мелкие порции [13] и закалки их в парогазовой оболочке охлаждающей жидкости. Среди методов повышения дисперсности искроэрозионных частиц следующие: увеличение скорости нарастания мощности в одиночном искрящем контакте; снижение длительности импульса тока в нем и снижение скорости распространения тепла из зоны искрения, на практике в условиях проведения экспериментов наиболее действенным оказался второй.

Увеличение скоростей нарастания напряжения и тока, как правило, приводит к росту их амплитудных значений, а следовательно, и энергии разряда. Это, в свою очередь, способствует увеличению объема расплавляемой порции металла и, как следствие, размера искроэрозионных частиц. Предварительная искроэрозионная обработка поверхности гранул с целью снижения ее температуропроводности приносит заметный эффект лишь на начальной стадии процесса диспергирования, ускоряя выход параметров на установившийся режим.

Поэтому она особенно актуальна для производства седиментационно устойчивых гидрозолей металлов, длительность наработки партий которых лежит в пределах 30...100 с.

В работе [9] показана динамика роста эквивалентного электрического сопротивления слоя токопроводящих гранул в процессе их электроискрового диспергирования и уменьшения средней в течение длительности импульса мощности. Среднее значение сопротивления слоя определялось по усредненным осциллограммам разрядного тока и напряжения на нагрузке согласно формуле

$$R_E = \frac{\sum_{j=1}^n u_j \cdot i_j}{\sum_{j=1}^n i_j^2}, \quad (1)$$

где i_j – значения тока в дискретный момент времени t_j , А; u_j – значения напряжения в дискретный момент времени t_j , В; n – количество дискретных моментов времени в течение импульса.

Средняя импульсная мощность определялась по усредненным осциллограммам разрядного тока и напряжения на нагрузке согласно формуле

$$P_P = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j \cdot i_j \quad (2)$$

Графики зависимостей величин (1) и (2) от длительности процесса диспергирования на примере алюминиевых гранул представлены на рис. 1 и 2 соответственно [9].

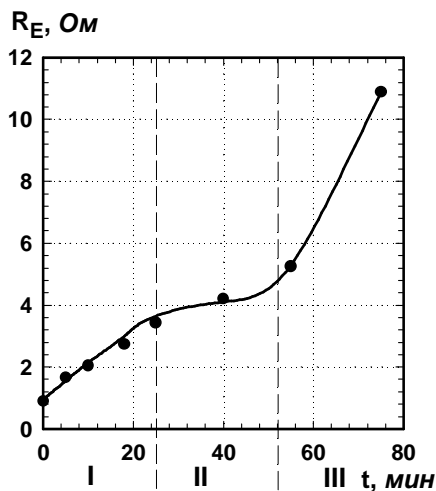


Рис. 1

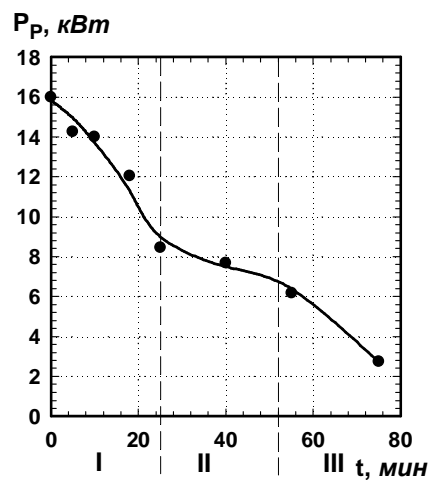


Рис. 2

Графики данных зависимостей содержат три характерных участка: участок I – разрушения оксидных пленок и наиболее острых поверхностных микровыступов гранул; участок II – равномерной стабильной эрозии гранул; участок III – работа со слоем критически малого поперечного сечения. Из рис. 1 и 2

видно, что наиболее приемлемым с точки зрения обеспечения заданных параметров разрядных импульсов и их стабильности является участок II. Вот почему предварительная обработка поверхности гранул позволяет сократить длительность участка I и уменьшить размеры и разброс по размерам искроэрозионных частиц.

Особенности построения систем объемного электроискрового диспергирования. В состав технологической системы объемного электроискрового диспергирования входят следующие компоненты: генератор импульсов, блок управления, разрядная камера, технологические баки, оборудование для перекачивания рабочей жидкости, измерительные и вспомогательные устройства. Генераторы разрядных импульсов с емкостным накопителем энергии показали свою высокую эффективность на протяжении более 30 лет в искроэрозионных системах производства методом объемного электроискрового диспергирования порошков с размерами частиц от 5 до 100 мкм [1, 4, 9, 15–17].

Упрощенная схема силовой части генератора разрядных импульсов мощностью 2 кВт представлена на рис. 3. Генератор питается от однофазной сети переменного напряжения 220 В частотой 50 Гц. Напряжение сети выпрямляется, фильтруется, регулируется и стабилизируется управляемым выпрямителем ($VS1$, $VS2$, $VD1$, $VD2$, C_ϕ на рис. 3). По команде блока

управления зарядка рабочей батареи конденсаторов C (емкость регулируется дискретно от 12,5 до 200 мкФ) периодически осуществляется через зарядный тиристор $VS3$ и дроссель $L1$. Добротность зарядного контура составляет около 20, поэтому тиристор $VS3$ запирается естественным способом в конце процесса зарядки рабочих конденсаторов. Они, в свою очередь, спустя установленное время разряжаются по команде блока управления через тиристор $VS4$ и соединительный кабель, индуктивность которого представлена на рис. 3 дросселем L на электроискровую нагрузку с эквивалентным электрическим сопротивлением R_E . С целью уменьшения омического сопротивления и индуктивности разрядного контура все соединения в нем выполнены высокочастотным низкоомным кабелем-лицендратом [9].

Для исключения положительных обратных связей по току, возникающих вследствие нелинейности эквивалентного электрического сопротивления гранулированной токопроводящей среды при ее электроискровой обработке и приводящей к нестабильности процесса, параллельно разрядной камере подключался резистивный шунт сопротивлением 3 Ом, собранный из резисторов марки ТВО с малой индуктивностью [11, 16, 17]. Период, последовательность и время задержки коммутации тиристоры регулировались с помощью блока управления. Существенным недостатком формирователей разрядных импульсов, содержащих только зарядный и разрядный тиристоры, является отсутствие возможности точного регулирования либо ограничения длительности импульсов.

Режим апериодического разряда конденсатора C на объемную электроискровую нагрузку характеризуется высокими скоростями нарастания напряжения на нагрузке (до 500 В/мкс) и средними значениями нарастания тока в ней (до 100 А/мкс). Крутой передний фронт импульса способствует увеличению доли мелких искроэрозийных частиц. Однако задние фронты как напряжения, так и тока при данном характере разряда являются пологими, что не способствует повышению дисперсности частиц. В данном режиме ток тиристора $VS4$ плавно спадает до значения его тока удержания за время, которое определяется емкостью конденсатора C и эквивалентным сопротивлением разрядной камеры и резистивного шунта. Мгновенное значение эквивалентного сопротивления разрядной камеры к концу импульса стремительно возрастает и составляет десятки – сотни ом, в то время как в середине импульса его значение не превышает доли ом [10]. Кроме того, эквивалентное сопротивление разрядной камеры подвержено стохастическим изменениям в значительном диапазоне. Вот почему влияние сопротивления шунта и емкости конденсатора C на длительность разрядного импульса в этом режиме будет решающим. Длительность импульса тока при апериодическом характере разряда велика и составляет, как правило, более 100 мкс, что снижает долю высокодисперсных частиц в конечной продукции.

При критическом характере разряда скорости нарастания и спада напряжения и тока имеют средние значения, длительность импульсов за исключением случаев значительного стохастического увеличения эквивалентного сопротивления разрядной камеры практически не зависит от сопротивления шунта и, как правило, лежит в диапазоне 50...100 мкс. Данный режим характеризуется невысокой долей высокодисперсных порошков, а также самыми высокими значениями КПД передачи энергии конденсатора в нагрузку и производительности.

При колебательном характере разряда скорости нарастания и спада напряжения и то-

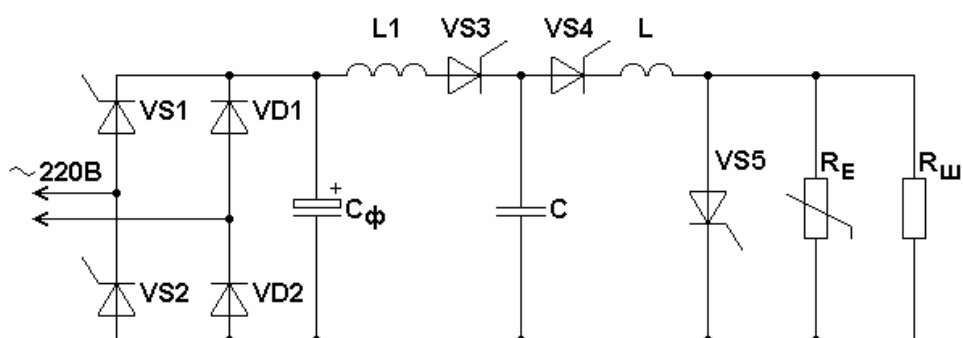


Рис. 3

ка довольно велики, длительность импульсов минимальна и, за исключением случаев значительного стохастического увеличения эквивалентного сопротивления разрядной камеры, практически не зависит от сопротивления шунта, находясь в диапазоне 20...50 мкс. Однако из-за высоких значений амплитуд напряжения и тока энергия импульсов значительна, что также снижает долю высокодисперсных искроэрозионных частиц в конечной продукции.

Одним из путей существенного повышения доли высокодисперсных искроэрозионных частиц в конечной продукции являются принудительное ограничение длительности импульсов и повышение скорости миграции искровых каналов по поверхности гранул при апериодическом характере разряда. Схемотехнически принудительное ограничение длительности импульсов можно реализовать либо закортитив нагрузку, либо заперев разрядный ключ через определенное время после начала протекания в ней тока.

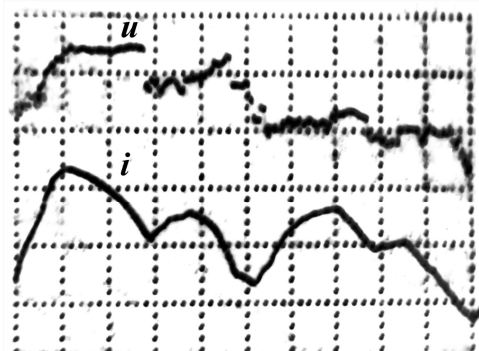
Тиристор VS5, подключаемый параллельно нагрузке через определенное время задержки после начала импульса, реализовывал первый способ. Применение тиристора в качестве соединенного параллельно с нагрузкой ключа позволило коммутировать большие значения токов, не опасаясь аварийных режимов даже при значительном стохастическом изменении сопротивления разрядной камеры. Однако инерционные свойства тиристора затрудняют достижение малых значений (до 20 мкс) длительностей разрядных импульсов на современном этапе развития элементной базы силовой электроники. Применение данного подхода позволило снизить средний размер и разброс по размерам искроэрозионных частиц в 1,5–2 раза, но этого оказалось недостаточно для получения седиментационно устойчивых гидрозолей металлов.

Использование в качестве разрядного ключа полностью управляемого IGBT модуля позволило добиться длительности разрядных импульсов 7...15 мкс. При этом были получены искроэрозионные частицы железа в воде, максимальный размер которых не превышал 5 мкм, а средний составлял 1–2 мкм. Данные частицы образовывали в воде довольно мелкую взвесь, которая не седиментировала в течение нескольких суток. К сожалению, этого также оказалось недостаточно для получения высококачественных гидрозолей биологически активных металлов.

Для повышения скорости миграции искровых каналов по поверхности металлических гранул, снижения длительности одиночных искрений и изменения формы тока нагрузки со сплошной на гребенчатую, что эквивалентно снижению длительности разрядного импульса, был применен новый электрофизический подход – принудительная механическая активация слоя гранул непосредственно в процессе их диспергирования. Техническая реализация данного подхода осуществлялась установкой разрядной камеры на вибрационный стол, который представлял собой две плоскости, соединенные коническими пружинами. К верхней плоскости крепились разрядная камера и двигатель постоянного тока с эксцентриком на валу [8, 10, 11].

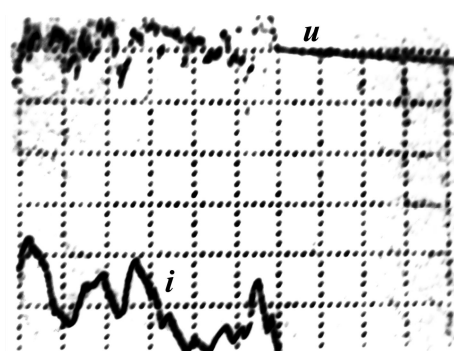
Изменяя напряжение питания электродвигателя постоянного тока, мы меняли частоту вращения его ротора, добиваясь резонанса с собственной частотой механических колебаний гранул в разрядной камере. При этом амплитуды и скорости взаимных перемещений гранул одна относительно другой достигали максимальных значений, способствуя разрыву электрических контактов между локальными участками их поверхностей. Это способствовало увеличению скорости миграции искровых каналов по их поверхности, снижению длительности локальных импульсов и увеличению эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул [11].

Влияние принудительной механической активации слоя металлических гранул в процессе их электроискрового диспергирования на форму разрядного тока иллюстрируют осциллограммы напряжения на нагрузке и тока в ней (рис. 4 и 5). На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения и тока, снятые при апериодическом разряде без принудительной механической активации слоя гранул, а на рис. 5 – с активацией. Из сопоставления осциллограмм видно, что принудительная механическая активация способствует расширению области устойчивой работы в сторону снижения напряжения разрядных импульсов, а также изменяет форму тока нагрузки, разбивая его на последовательность коротких (до 10 мкс) импульсов при относительно большой общей продолжительности (60 мкс).



i : 116 А/дел; u : 50 В/дел; t : 10 мкс/дел;

Рис. 4



i : 11,6 А/дел; u : 20 В/дел; t : 10 мкс/дел;

Рис. 5

Следует отметить, что при производстве седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов методом объёмного электроискрового диспергирования их гранул на оператора, находящегося в непосредственной близости от установки, действуют следующие вредные факторы: электромагнитные излучения с напряженностью электрического поля до 50 В/м в широком спектре – от длинных радиоволн до ультрафиолетового излучения, озон в концентрации свыше 0,02 мг/м³, акустический шум с уровнем свыше 80 дБА и другие. Вот почему была разработана и изготовлена специальная технологическая камера с электромагнитным экранированием, вытяжкой, электро-, шумо- и виброизоляцией, в которую помещалась разрядная камера. Данный подход позволил существенно снизить влияние перечисленных вредных факторов, вблизи кабелей разрядного контура, соединяющих генератор импульсов и разрядную камеру, уровень электромагнитных излучений был по-прежнему высок. Кроме того, ограниченность вида через смотровое окно технологической камеры не позволяла в полной мере контролировать уровень рабочей жидкости в разрядной камере.

Дальнейшим развитием средств защиты оператора процесса объёмного электроискрового диспергирования были разработка и создание системы удаленного телеметрического контроля в режиме реального времени уровня рабочей жидкости в разрядной камере и технологических баках, интенсивности искрений в слое гранул, мгновенных значений напряжения на нагрузке и тока в ней (рис. 6). В состав системы входили: цифровой запоминающий осциллограф Hamag HM 1507-3 (поз. 6 на рис. 6); оптоэлектронный конвертер интерфейса RS232/RS232iso (поз. 7); Web-камера Techsolo TCA-4810 (поз. 5); системный блок сбора и обработки информации (поз. 8); маршрутизатор локальной компьютерной сети D-Link DIR-120 (LAN на рис. 6), системный блок (поз. 9) и монитор (поз. 10) удаленного контроля. Управление системой удаленного контроля осуществлялось посредством программы Radmin 3.2. Генератор разрядных импульсов на рис. 6 обозначен цифрой 1, разрядная камера – 2, высокочастотный делитель 1:10 напряжения – 3, измерительный высокочастотный трансформатор тока – 4.

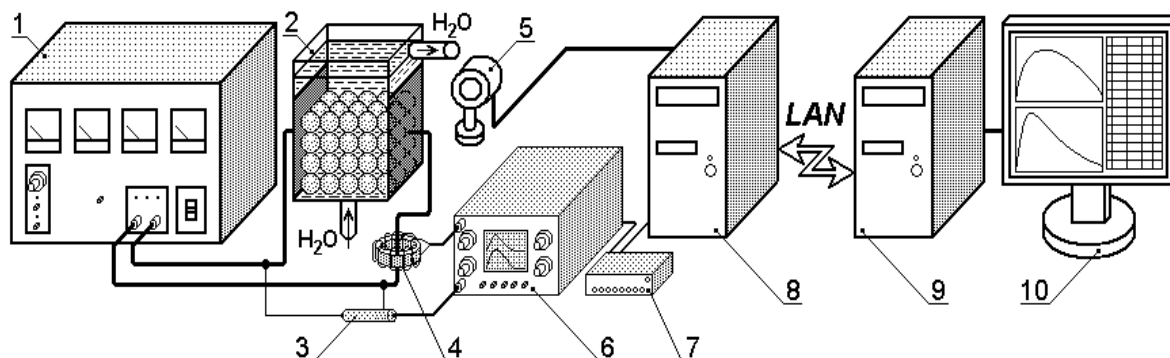


Рис. 6

Свойства нанодисперсных искроэрозионных частиц биологически активных металлов и гидрозолей на их основе. Описанная выше разрядно-импульсная система с применением принудительной механической активации слоя гранул в процессе их диспергирования позволила получить устойчивые к седиментации гидрозоли биологически активных металлов – *Ag, Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo*. При использовании в качестве рабочей жидкости деионизованной воды марки "В" с удельным электрическим сопротивлением более 1 МОм·м и исходных гранул металлов марок "хч" и "чда", полученные таким методом коллоидные растворы не седиментировали в течение 2...6 месяцев [8].

На рис. 7 представлена фотография увеличенного под электронным микроскопом в 10000 раз дендрита наночастиц *Ag*, полученных методом объемного электроискрового диспергирования гранул в деионизованной воде с принудительной механической активацией слоя, а на рис. 8 – распределение их по размерам. Из рис. 7 и 8 видно, что максимальный размер искроэрозионных частиц в данном образовании не превышает 330 нм, а наибольшее количество частиц имеет размеры от 30 до 90 нм.

Определим теоретически максимальный радиус частицы металла, находящейся во взвешенном состоянии в жидкости только за счет Броуновского движения [12]. Упрощенно будем полагать, что электрический заряд на поверхности частиц отсутствует, хотя в действительности это не так – все частицы однородны и имеют сферическую форму, проток жидкости, процессы агрегации и коагуляции отсутствуют. В этом случае на частицу действуют силы гравитации, Архимеда и трения, а уравнение ее движения в жидкости запишется таким образом [2]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p} g - \frac{9\eta}{2r^2 \rho_p} v, \quad (3)$$

где v – скорость движения частицы, м/с; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; ρ_l – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения: 9,81 м/с²; r – радиус частицы, м; η – коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

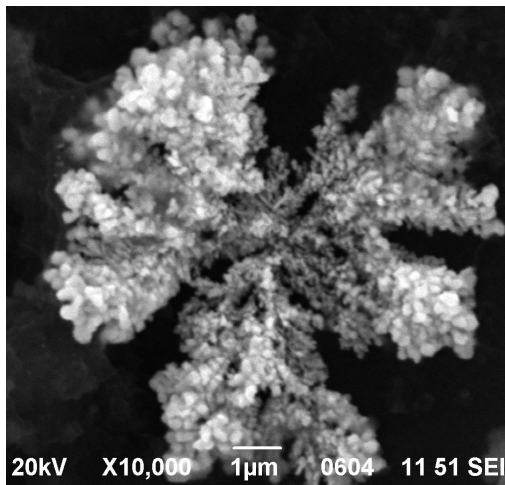


Рис. 7

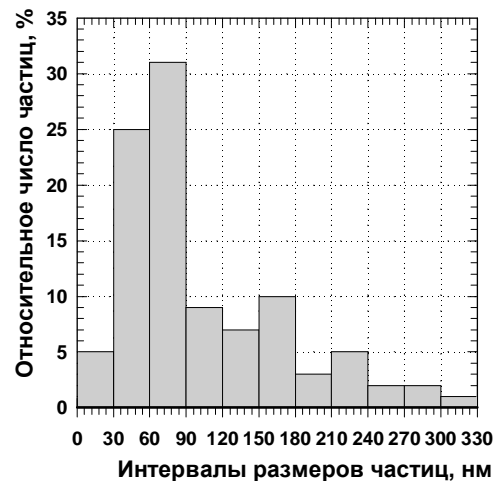


Рис. 8

Решением уравнения (3) относительно скорости движения высокодисперсной частицы в жидкой среде под действием описанных выше трех сил будет выражение

$$v = \frac{2r^2 g (\rho_p - \rho_l)}{9\eta} (1 - e^{-t/\beta}), \quad (4)$$

где β – постоянная времени переходного процесса определяется как

$$\beta = \frac{2r^2 \rho_p}{9\eta}. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что с течением времени t величина скорости движения частицы в процессе седиментации будет расти, приближаясь асимптотически к установившемуся значению. При $t \gg \beta$ движение частицы становится почти равномерным. Будем считать, что равномерное движение наступает при $t_s = 5 \cdot \beta$. Для частиц Ag (рис. 8) диаметром от 10 до 330 нм с плотностью $10,59 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ в деионизованной воде при температуре 20°C ($\eta = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$) [2] время наступления равномерного движения t_s лежит в диапазоне от $2,93 \cdot 10^{-10}$ до $3,19 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, т.е. равномерное движение наступает практически мгновенно. Следовательно, для определения кинетической энергии частиц можно учитывать лишь скорость их установившегося движения, т.е. только дробь перед скобкой в выражении (4).

Согласно принятой выше гипотезе, частица не седиментирует, пока энергия ее Броуновского движения равна или превышает энергию ее кинетического движения в жидкости под действием сил гравитации, Архимеда и трения, т.е. для сферических частиц с максимально допустимым радиусом r_m справедливо

$$3kT = \frac{4}{3} \pi \cdot r_m^3 \rho_p \left(\frac{2r_m^2 g (\rho_p - \rho_l)}{9\eta} \right)^2, \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$; T – температура золя, К.

Решая выражение (6) относительно максимального радиуса частицы, получаем

$$r_m = \sqrt[7]{\frac{729kT\eta^2}{16\pi g^2 \rho_p (\rho_p - \rho_l)^2}}. \quad (7)$$

Для сферических частиц Ag с плотностью $10,59 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ при температуре золя 293 К , вязкости воды для данной температуры $1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ и ее плотности $9,98 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ [2], значение максимального радиуса согласно (7) составляет $2,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Следовательно, если отсутствуют процессы агрегации и коагуляции, в рассмотренных условиях седиментационной устойчивостью будут обладать гидрозоли серебра с диаметром частиц менее 5 мкм , что значительно больше диаметра полученных частиц.

Выводы

1. Анализ значимости факторов, повышающих дисперсность и однородность искроэрозийных частиц в процессе их формирования показал, что наиболее действенным в исследованных режимах является уменьшение длительности разрядных импульсов.

2. В работе исследованы три способа уменьшения длительности разрядных импульсов: шунтирование нагрузки быстродействующим тиристором, отключение нагрузки от емкостного накопителя энергии IGBT – ключом и принудительная механическая активация слоя гранул при их диспергировании. В исследованных режимах последний способ позволил получить самые мелкие частицы.

3. Показано, что принудительная механическая активация слоя гранул в процессе их диспергирования позволяет разрывать каналы протекания разрядного тока между гранулами, ускоряя миграцию искровых каналов по их поверхности и повышая как мгновенное, так и среднее значение электрического сопротивления слоя.

4. В результате исследования зависимостей мощности разрядных импульсов и сопротивления слоя гранул от длительности их диспергирования определен временной интервал наиболее стабильного процесса, обеспечивающего получение однородных высокодисперсных искроэрозийных частиц металлов.

5. Создана разрядно-импульсная система производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования и комплекс удаленного контроля параметров процесса в режиме реального времени.

6. Определена аналитически зависимость максимального радиуса металлической частицы, находящейся во взвешенном состоянии в жидкости (при допущениях: частица имеет сферическую форму, процессы агрегации и коагуляции отсутствуют, а Броуновское движение является единственным фактором, препятствующим процессам седиментации), от пара-

метров частицы и дисперсной среды. Получены седиментационно устойчивые нанокolloидные растворы биологически активных металлов. Проанализирован гранулометрический состав искроэрозионных частиц Ag. Показано, что при принятых допущениях радиус самых крупных частиц является на порядок меньшим, чем максимальный радиус сферических частиц Ag, находящихся во взвешенном состоянии в воде.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. – Фрунзе: Илим. – 1990. – 256 с.
2. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – К.: Наук. думка. – 1986. – 558 с.
3. Каплуненко В.Г., Косинов Н.В., Бовсуновский А.Н., Черный С.А. Нанотехнологии в сельском хозяйстве // Зерно. – 2008. – № 4(25). – С. 46–54.
4. Монастырский Г.Е., Коваль Ю.Н., Шпак А.П., Мусиенко Р.Я., Коломыцев В.И., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яковенко П.Г. Получение электроискровым методом порошков сплавов с эффектом памяти формы // Порошковая металлургия. – 2007. – № 5–6. – С. 3–15.
5. Розенфельд Л.Г., Москаленко В.Ф., Чекман И.С., Мовчан Б.О. Нанотехнології, наномедицина: перспективи наукових досліджень та впровадження результатів у медичну практику // Укр. мед. часопис. – 2008. – Т. 5(67). – № 9/10. – С. 63–68.
6. Ульберг З., Грузина Т., Карпов О. Нанотехнології в медицині: роль колоїдно-хімічних процесів // Вісник НАН України. – 2008. – № 8. – С. 28–41.
7. Шпак А.П., Куницкий Ю.А., Карбовский В.Л. Кластерные и наноструктурные материалы. Т. 1. – Киев: Академперіодика. – 2001. – 588 с.
8. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 74–79.
9. Щерба А.А., Захарченко С.М., Спінул Л.Ю. Закономірності змінення електричного опору шару алюмінієвих гранул при їх електроіскровому диспергуванні // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2010. – Вип. 25. – С. 133–139.
10. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч. 2. – С. 120–125.
11. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г., Святненко В.А. Развитие систем получения ультрадисперсных искроэрозионных порошков: влияние вибрации на параметры разрядных импульсов и характеристики продукции // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 4. – С. 107–112.
12. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Varapu S., Победаш К.К., Святненко В.А. Кинетика агрегации и седиментации искроэрозионных наноструктурных частиц металлов в гидрозолях // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2009. – Ч. 3. – С. 20–26.
13. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Изучение эрозионного разрушения материалов при электроискровой обработке гранулированных сред // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 1. – С. 3–10.
14. Пат. Україна 38458, МПК (2006) B22F 9/08. Спосіб отримання ультрадисперсного порошку / Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г., Щерба А.А., Захарченко С.М., Яцюк С.А.; Власник Національний аграрний університет. – № u200810312; Заявл. 12.08.2008. Опубл. 12.01.2009. Бюл. № 1.
15. Kolbasov G.Ya., Ustinov A.I., Shcherba A.A., Perekos A.Ye., Danilov M.O., Vyunova N.V., Zakharchenko S.N., Hossbah G. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys // Journal of Power Sources. – 2005. – # 150. – P. 276–281.
16. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Shevchenko N.I., Suprunovskaya N.I. Thyristor Discharge Pulse Generator with Controllable Parameters for Technological System for Volumetric Electric Spark Dispersion of Metal Granules // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2005. – Ч. 1. – С. 57–60.
17. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 10–14.
18. Villalobos M., Bargar J., Sposito G. Trace Metal Retention on Biogenic Manganese Oxide Nanoparticles // Elements. – 2005. – Vol. 1, # 4. – P. 223–226.