

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ШАРУ АЛЮМІНІЄВИХ ГРАНУЛ ПРИ ЇХ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ДИСПЕРГУВАННІ

*Досліджено залежності еквівалентного електричного опору шару алюмінієвих гранул та імпульсної потужності від тривалості їх електроіскрового диспергування. Запропоновано функції апроксимації даних залежностей та визначено найкращі з них. Обґрунтовано наявність часового інтервалу найбільш стабільної роботи установок безперервного електроіскрового диспергування та запропоновано критерії його визначення. Рекомендовано способи підвищення стабільності електричних параметрів процесу.*

**Вступ.** Метод об'ємної електроіскрової обробки гетерогенних струмопровідних середовищ є технологічною основою процесів виробництва мікронних та субмікронних порошків багатокомпонентних сплавів і композитів (феромагнітних, жаростійких, надміцних, з магнітною пам'яттю форми та інших) [1, 4, 10, 13, 17, 18] та стійких до седиментації гідрозолів біологічно активних металів [9, 15, 16]. Електроіскрова обробка водних потоків ефективно використовується для їх знезараження і комплексного очищення від органічних забруднень та іонів важких металів водних потоків [2, 7, 11, 12].

Останнім часом багато уваги приділялось вивченню впливу параметрів електроіскрового процесу на характеристики кінцевого продукту протягом відносно невеликих (до однієї години) термінів обробки [3, 19, 20], що характерно для лабораторних умов. Під час промислового виробництва необхідно проводити моніторинг параметрів процесу протягом всієї зміни (вісім годин), тому *актуальною задачею* є прогнозування змінення параметрів електроіскрового процесу проміжку часу тривалістю вісім годин і більше.

У дослідженнях, які проводились раніше, не враховувалась зміна розмірів гранул внаслідок їх електроіскрової ерозії [3, 8, 10, 14], внаслідок чого виникає значне відхилення розрахованих параметрів розрядних імпульсів від реальних. *Дана робота присвячена* дослідженню та урахуванню закономірностей змінення середньостатистичних значень електричного опору шару алюмінієвих гранул та імпульсної потужності в процесі електроіскрового диспергування. Вивчення зазначених вище залежностей дає змогу розробити більш точні алгоритми стабілізації параметрів розрядних імпульсів та технологічних умов процесу та підвищити енергоефективність зазначеного виробництва.

**Методика експерименту.** Схему лабораторної установки показано на рис. 1. Детальний опис та принцип її роботи наведено в [11, 14]. До складу установки входять: генератор розрядних імпульсів (ГРІ), блок керування генератором (поз. 2 на рис. 1), розрядна камера (поз. 6) з алюмінієвими гранулами, осцилограф С8-17, що запам'ятовує (поз. 3). До осцилографа були підключені дільник напруги 1:10 (поз. 5) та високочастотний вимірювальний трансформатор струму (поз. 4). До складу ГРІ входив керований випрямляч (поз. 1), підключений до однофазної мережі електроживлення напругою 220 В, який забезпечував на опорній батареї конденсаторів  $C_{on}$  стабілізовану постійну напругу  $U_{on}$  (під час експерименту підтримувалось значення 120 В). Ємність робочого накопичувача  $C$  складала 100 мкФ, а еквівалентна індуктивність розрядного контура  $L$  – 2 мкГн. Частота слідування розрядних імпульсів  $f$  – 10 Гц. Параметри експерименту, що змінювались під час роботи, наведено в табл. 1.

Особливість імпульсної електроіскрової обробки полягає в тому, що значна кількість характеристик кінцевих продуктів залежить від динамічних параметрів розрядних імпульсів та технологічних параметрів процесу. Тому для зменшення їх впливу з метою визначення

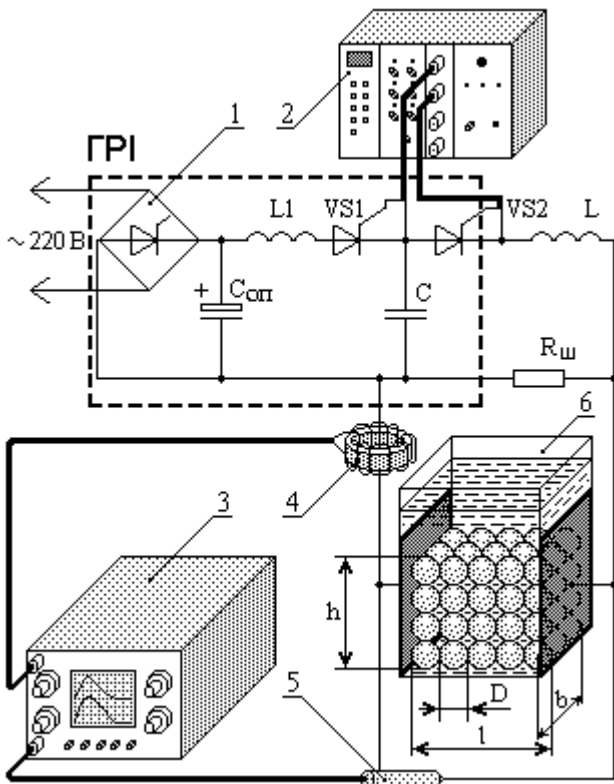


Рис. 1

зазначені вище моменти вимірювань опору осцилограми струмів та напруг запам'ятовувались протягом 1 хв. На рис. 2, 3 наведені сім'ї осцилограм струмів та напруг для 5 та 75 хв процесу відповідно.

Таблиця 1

Параметр	Значення до експерименту	Значення після експерименту
Діаметр гранули	3,9 мм	3,7 мм
Довжина гранули	5 мм	4,9 мм
Висота шару гранул	30 мм	26 мм
Маса гранул	60,45 г	57,23 г
Маса електродів	40,91 г	40,67 г
Відстань між електродами	52 мм	52,5 мм

Ціна поділу по осі часу становила 10 мкс/под., по напрузі – 50 В/под., по струму для рис. 1 – 116 А/под., а для рис. 2 – 29 А/под. У подальшому за сукупністю кривих струмів та напруг визначалась середньостатистична крива. Потім усереднені криві струму та напруги оцифровувались у програмі *Graph Digitizer 2.24*, тобто представлялись дискретними значеннями, які записані з рівним проміжком часу.

Середнє значення еквівалентного активного опору шару гранул протягом одного імпульсу розраховувалось за усередненими осцилограмами напруги та струму за формулою

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

де  $i_j$  – значення струму в дискретний момент часу  $t_j$ , А;  $u_j$  – значення напруги в дискретний момент часу  $t_j$ , В.

часової залежності еквівалентного опору шару гранул необхідно було стабілізувати параметри розрядних імпульсів шунтуванням електродів розрядної камери безіндуктивним резистором  $R_{ш}=3$  Ом.

Вказане шунтування забезпечувало нульові початкові умови заряду робочого накопичувача  $C$  з урахуванням зміни опору навантаження в широких межах. Часова залежність еквівалентного опору шару гранул обчислювалась за осцилограмами струмів та напруг, які знімалися через різні проміжки часу, що визначалися динамікою процесу та досвідом попередніх експериментів. З урахуванням частоти слідування імпульсів осцилограми записувались у такі моменти часу: 0, 5, 10, 18, 25, 40, 55 та 75 хв від початку процесу. Для розрахунку середнього значення еквівалентного електричного опору гранульованого струмопровідного середовища за один імпульс тривалість розгортки була такою, щоб горизонтальний розмір його зображення на осцилографі приблизно дорівнював розміру екрана осцилографа. У

Середнє протягом одного імпульсу значення потужності обчислювалось за формулою

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

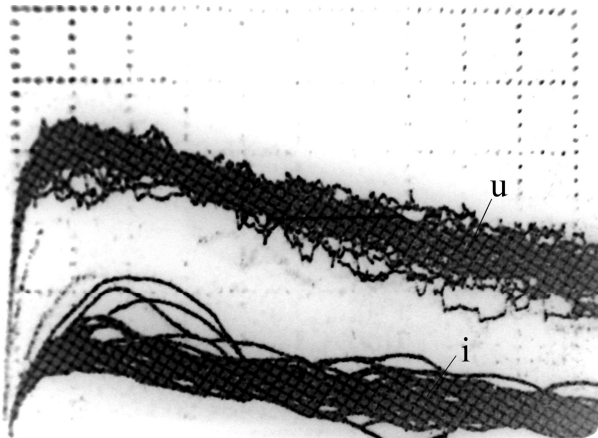


Рис. 2

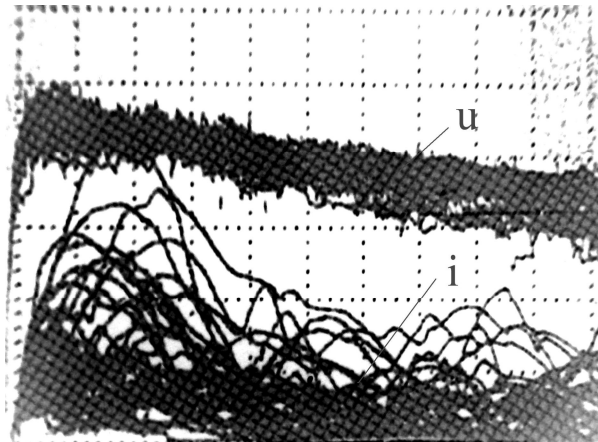


Рис. 3

Для апроксимації експериментальних залежностей аналітичними функціями було використано підхід, описаний в [7]. У рамках зазначеного підходу на першому етапі розглядались класи функцій [6], графіки яких найбільше відповідали формі експериментальної залежності. На другому етапі для кожного обраного класу функцій [6] методом найменшої суми квадратів різниць знаходились коефіцієнти апроксимації. Відносна похибка апроксимації визначалась за формулою

$$\left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{B_k - B_{ak}}{B_k} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $B_k$  – експериментальне значення опору або потужності в момент часу  $k$ ;  $B_{ak}$  – значення опору або потужності в момент часу  $k$ , яке отримано за формулою апроксимації.

Обрані функції із значеннями їх коефіцієнтів, а також величини відносних похибок апроксимації (3) для часових залежностей опору та імпульсної потужності наведено в табл. 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2

№	Функція апроксимації	Відносна похибка, %
1	$R(t) = 1,538 + 0,015t + 1,361 \cdot 10^{-3} t^2$	9,16
2	$R(t) = 0,79 + 0,19t - 5,07 \cdot 10^{-3} t^2 + 5,765 \cdot 10^{-5} t^3$	5,57
3	$R(t) = 0,96 + 0,108t + 9,52 \cdot 10^{-4} t^2 - 7,852 \cdot 10^{-5} t^3 + 9,35 \cdot 10^{-7} t^4$	3,06
4	$R(t) = 0,888 + \frac{0,009t^2}{0,2 + 0,6\sqrt{t}}$	20,75
5	$R(t) = 0,5 + 2^{0,046t}$	17,9
6	$R(t) = e^{0,01t} \sqrt{1 + (0,07t)^2}$	21,8

Таблиця 3

№	Функція апроксимації	Відносна похибка, %
1	$P(t) = 15840 - 256,035t + 1,16t^2$	8,11
2	$P(t) = 16280 - 359,58t + 4,96t^2 - 0,034t^3$	5,45

3	$P(t) = 15850 - 154,288t - 10,119t^2 + 0,307t^3 - 2,343 \cdot 10^{-3}t^4$	4,72
4	$P(t) = \frac{16010}{(1 + 0,012t)^2}$	13,09
5	$P(t) = \frac{16010}{1/2(e^{0,033t} + e^{-0,01t})}$	7,95
6	$P(t) = 16010 \cdot e^{-0,02t}$	10,14

**Аналіз отриманих результатів.** Графіки залежностей середнього значення еквівалентного активного опору шару гранул (1) та середньої за час імпульсу потужності (2) від тривалості процесу диспергування зображені на рис. 4 та 5 відповідно. Точками на графіках представлені експериментальні значення, а суцільними лініями – результати їх апроксимацій із найменшою відносною похибкою (3) (п. 3 табл. 2 та п. 3 табл. 3 відповідно).

З графіків рис. 4 та 5 можна побачити, що середньостатистичні значення еквівалентного електричного опору та імпульсної потужності істотно змінюються за час процесу диспергування. Тобто процес є нестационарним. Для побудови системи керування процесом диспергування, яка враховує його нестационарність, необхідно отримати аналітичні вирази для зазначених вище залежностей.

Згідно з теоремою Вейерштрасса, кожна функція, яка задовольняє умовам Діріхле на певному інтервалі зміни аргументу, може бути апроксимована степеневим поліномом із заданою точністю, яка залежить від його ступеня (функції 1, 2, 3 табл. 2, 3). Враховуючи фізичні процеси, які відбуваються під час об'ємного електроіскрового диспергування, та їх вплив на динаміку зміни електричного опору, зазначимо, що за умов рівномірного збільшення числа контактів між гранулами в напрямку від анода до катода та зменшення їх кількості в поперечному перерізі внаслідок ерозії залежність еквівалентного електричного опору шару гранул від часу диспергування може бути описана поліномом другого ступеня. Оскільки розміри гранул внаслідок їх ерозії змінюються в часі нерівномірно, то доцільно збільшити ступінь поліномів. З табл. 2 та 3 можна побачити, що поліноміальні апроксимації мають найменші відносні похибки (3). Серед цих залежностей слід визначити поліноми четвертого ступеня, відносна похибка яких найменша.

Розглянувши фізичний зміст складових формули п. 4 табл. 2, слід зауважити, що постійна складова відповідає за значення електричного опору на початку процесу. Чисельник дроби відповідає за динаміку збільшення числа послідовних контактів, а знаменник – за динаміку зменшення числа паралельних.

Формули п. 5 та п. 6 табл. 2 відображають гіпотезу про показову залежність електричного опору від тривалості процесу диспергування як з лінійним, так і з нелінійним коефіцієнтами. Велике значення відносною похибки апроксимації (3) свідчить про неправомірність цієї гіпотези.

Розглянемо залежність імпульсної потужності від тривалості процесу. З графіків (рис. 5) видно, що вона нелінійно зменшується. Оскільки розряд носить аперіодичний характер, що видно з осцилограм рис. 2 та 3, то в процесі диспергування амплітуда напруги розрядних імпульсів збільшувалась повільніше, ніж зменшувалась амплітуда розрядного струму. Якщо прийняти гіпотезу незмінності напруги, то потужність зворотно пропорційна опору. Як було показано раніше, залежність еквівалентного електричного опору від тривалості процесу диспергування може бути описана поліномом другого та більш високого ступеня. Формула п. 4 табл. 3 відображає гіпотезу незмінності напруги розрядних імпульсів та зворотно квадратичної залежності еквівалентного електричного опору шару гранул від тривалості процесу.

Формула п. 5 табл. 3 відповідає гіпотезі експоненціальної залежності електричного опору від тривалості процесу за умови експоненціального збільшення напруги розрядних імпульсів.

Формула п. 6 табл. 3 відповідає гіпотезі експоненціального характеру зменшення імпульсної потужності.

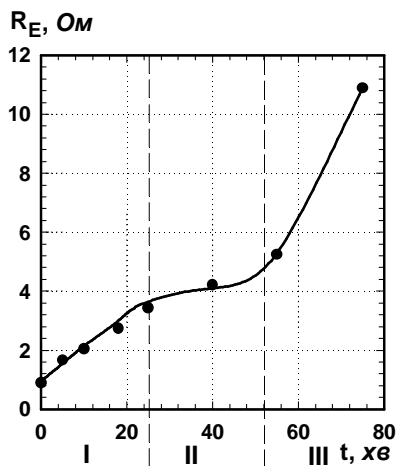


Рис. 4

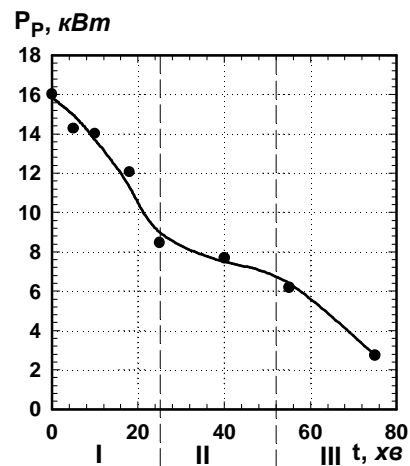


Рис. 5

Найменші значення відносної похибки для залежностей електричного опору та імпульсної потужності від тривалості процесу отримано в разі апроксимації їх поліномами четвертого ступеня. Аналізуючи динаміку зміни еквівалентного електричного опору (1) та імпульсної потужності (2), на графіках рис. 4 та 5 можна виділити три характерних ділянки (на рис. 4 та 5 позначені римськими цифрами):

- ділянка I (зі значеннями аргументу  $t$  від 0 до 25 хв), на якій еквівалентний електричний опір шару гранул зростає, а імпульсна потужність падає зі збільшенням часу диспергування. На думку авторів, на цьому етапі руйнуються оксидні діелектричні плівки та найбільш гострі виступи на поверхні гранул, і вони набувають округлої форми з характерною поверхнею, вкритою іскроерозійними лунками;

- ділянка II (зі значеннями аргументу  $t$  від 25 до 50 хв), на якій спостерігаються незначне зростання еквівалентного опору та зменшення імпульсної потужності (див. рис. 4 та 5). На ділянці II процес диспергування проходить найбільш стабільно. Розміри всіх гранул рівномірно зменшуються під дією електроіскрових розрядів. Дана ділянка найбільш придатна для роботи в усталеному режимі. Ось чому є сенс наприкінці ділянки II виконувати операцію дозавантаження гранул у розрядну камеру (якщо це дозволяють технологічні умови) до рівня, який був на її початку з метою підвищення стабільності параметрів об'ємного електроіскрового диспергування та характеристик іскроерозійних порошоків;

- ділянка III (зі значеннями аргументу  $t$  від 50 до 80 хв), на якій еквівалентний опір стрімко зростає, а імпульсна потужність стрімко падає із часом диспергування. Ділянка III характеризується найбільшою нестабільністю процесу електроіскрового диспергування. На ній все частіше виникають режими холостих тривалих розрядів без іскрінь, які можуть переходити в аварійні режими короткого замкнення між електродами [8, 10, 14]. Зменшення середніх розмірів гранул на цьому етапі призводить до критичного зменшення числа та еквівалентної електропровідності ланцюжків протікання струмів між електродами, що істотно розширює діапазони флуктуації розрядного струму. Дана ділянка є найбільш непридатною з точки зору забезпечення стабільності параметрів розрядних імпульсів і параметрів вихідної продукції, оскільки крім істотної нестабільності параметрів процесу характеризується ще і найменшою його продуктивністю. Ось чому при розрахунку технологічних умов процесу слід уникати роботи на даній ділянці, наприклад дозавантажуючи гранули в розрядну камеру наприкінці ділянки II.

Одними із критеріїв визначення границь найбільш сприятливої для усталеного процесу ділянки II можуть бути значення еквівалентного електричного опору шару гранул, його відносне зростання або динаміка його зміни. В умовах даних дослідів на початку ділянки II

еквівалентний електричний опір шару гранул алюмінію в процесі їх диспергування збільшився в 3,86 разу порівняно зі своїм значенням на початку процесу і становив 3,43 Ом (рис. 4). При цьому середня швидкість його збільшення на ділянці I становила приблизно 0,1 Ом/хв.

Наприкінці ділянки II спостерігається збільшення еквівалентного електричного опору шару гранул алюмінію в процесі їх диспергування в 5,9 разу порівняно із його значенням на початку процесу або в 1,53 разу порівняно із значенням на початку ділянки II. Еквівалентний опір досягає значення 5,24 Ом. При цьому середня швидкість його збільшення на ділянці II становила приблизно 0,06 Ом/хв, тобто майже в 1,7 разу менше, ніж на ділянці I.

Наприкінці ділянки III спостерігається збільшення еквівалентного електричного опору шару гранул алюмінію в 12,3 разу порівняно із його значенням на початку процесу або в 2,1 разу порівняно із значенням наприкінці ділянки II. При цьому середня швидкість його збільшення на ділянці III становила приблизно 0,28 Ом/хв, тобто майже в 4,7 разу більше, ніж на ділянці II.

Аналогічно поводить себе залежність імпульсної потужності від тривалості процесу диспергування. З точки зору практичної реалізації критеріїв знаходження границь ділянки II найбільш простими є досягнення розрядним струмом, або струмом шунта  $R_{III}$  (рис. 1) певних значень, характерних для границь ділянки II при фіксованій напрузі розрядних імпульсів.

**Висновки.** 1. Отримано експериментальні закономірності змінення електричного опору шару гранул алюмінію та імпульсної потужності від тривалості процесу диспергування.

2. Визначено ефективні апроксимаційні функції для представлення виявлених залежностей, які необхідні для оптимізації алгоритмів керування технологічними установками та для оптимізації їх режимів енергоспоживання.

3. У результаті аналізу залежностей еквівалентного електричного опору шару гранул алюмінію та імпульсної потужності від тривалості процесу диспергування визначено ділянку найбільш стабільної роботи. Запропоновано критерії визначення границь даної ділянки та метод стабілізації електричних параметрів шару гранул і розрядних імпульсів.

4. Використання отриманих результатів дозволяє зробити ще один крок до зменшення нестабільності режимів електроіскрового диспергування струмопровідних матеріалів за рахунок створення систем керування експертного типу.

*Исследованы зависимости эквивалентного электрического сопротивления слоя алюминиевых гранул и импульсной мощности от длительности их электроискрового диспергирования. Предложены аппроксимирующие функции рассмотренных зависимостей, определены наилучшие из них. Обосновано наличие интервала времени наиболее стабильной работы установок непрерывного электроискрового диспергирования и предложены критерии его определения. Рекомендованы способы повышения стабильности электрических параметров процесса.*

*Dependence of equivalent electrical resistance of aluminum granules layer and pulse power from duration of electric-spark dispersion are investigated. Approximating functions of those Dependences are offered. Best of them are defined. Presence of the most stable work time interval of electric spark dispersion plants is proved and criteria of its definition are offered. The ways of increase of stability of electric parameters of process are recommended.*

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. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде // Химия и технология воды. – 1999. – №3. – Т. 21. – С. 328–336.
3. Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Масловский В.А., Супруновская Н.И. Стабилизация параметров систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2005. – №2 (11). – Ч.2. – С. 9–13.
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. Рыбасенко В.Д., Рыбасенко И.Д. Элементарные функции: формулы, таблицы, графики. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1987. – 416 с.

6. Шидловська Н.А., Кравченко О.П. Розряд накопичувача на нелінійне навантаження // Техн. електродинаміка. – 2001. – №1. – С. 26–29.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей // Энергетика и электрификация. – 2002. – №12. – С. 34–40.
8. Щерба А.А., Захарченко С.Н. Стабилизация и регулирование параметров разрядных импульсов в системах объёмной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електродинаміка' 2001: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2001. – С. 30–35.
9. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандіяню Е.Г. Применение объёмного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – № 22. – С. 74–79.
10. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко М.І., Монастирський Г.Є., Перетятко Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч.1. – С. 120–123.
11. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Супруновская Н.И., Шевченко Н.И., Яцюк С.А., Соломенцева И.М. Повышение энергоэффективности электрофизических методов очистки сточных вод от органических загрязнений // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч.5. – С. 75–79.
12. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандіяню 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.
13. Щерба А.А., Кокорин В.В., Перекоз А.Е., Олиховская Л.А., Бойцов О.Ф., Захарченко С.Н. Мартенситные превращения в порошках сплавов Ni-Mn-Ga, полученных методом искровой эрозии // Металлофізика і новітні технології. – 2007. – Т.29, №2. – С. 201–210.
14. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объёмной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка, 2001: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2001. – С. 3–16.
15. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Захарченко С.Н., Ломко Н.А., Шевченко Н.И. Энергоэффективные методы и средства параметрического регулирования режимов технологических систем электроимпульсной и индукционной обработки металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – № 23. – С. 128–136.
16. Пат. України 38458, МПК (2006) B22F 9/08. Спосіб отримання ультрадисперсного порошку / К.Г. Лопатько, Є.Г. Афтандіяню, А.А. Щерба, С.М. Захарченко, С.А. Яцюк; власник Національний аграрний університет. – № u200810312; Заявл. 12.08.2008; Опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.
17. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders // I. Mater. Res. – 1987. – Vol. 2, № 2. – P. 277–288.
18. 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.
19. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zakharchenko S.N., Kucheryavaya I.N., Shevchenko N.I., Suprunovskaya N.I. Progress in spark-eroded particle production: development of technological system for high-yield electrical-spark dispersion of metal granules in liquid // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 3–13.
20. 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.

Надійшла 2.02.2010