

**С.В.ПЕТРИЧЕНКО**, канд. техн. наук, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

## **ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І СТАБІЛІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ОБ'ЄМНОГО ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ СТРУМОПРОВІДНИХ ГРАНУЛ У РІДИНІ**

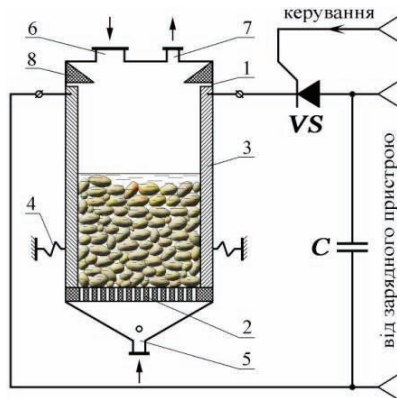
Запропоновано методи інтенсифікації об'ємної міграції іскрових розрядів, видалення іскроерозійних порошоків із розрядних зон, регулювання площі зняття матеріалу з поверхні гранули, об'єму плазми і області дії на гранулу теплового потоку, що дозволяють зменшити нестабільність режимів і підвищити продуктивність об'ємного електроіскрового диспергування.

The methods of volumetric migration of spark discharges intensification, removal of spark-eroded powders from discharge zones, the areas of material removal from a granular surface regulation, volume of plasma and area of action of a thermal stream on a granule regulation are shown. These methods allowed to decrease instability of discharge impulses' parameters and to increase productivity of electro-spark dispersion.

**Вступ.** Поширення технологій електроерозійного синтезу дрібнодисперсних порошоків із струмопровідних матеріалів потребує вирішення проблеми підвищення продуктивності установок для електроіскрового диспергування (УЕД). Створення суттєво неоднорідних умов в реакторах УЕД, коли замість одного контактного проміжку між двома електродами у рідині застосовують шар контактуючих гранул (рис. 1), дозволило збільшити продуктивність електроерозійної обробки від міліграмів до декількох кілограмів іскроерозійного порошку за годину [1]. Такий результат досягнуто за рахунок формування між електродами у шарі гранул багатоканальних швидкомігруючих електричних розрядів під час тривалості кожного імпульсу напруги (від 10 до 100 мкс) амплітудою від 400 до 600 В. Робочий шар, що піддається імпульсному навантаженню, містить велику кількість гранул, довільно упакованих між плоскими (рис. 1, поз. 3) чи циліндричними електродами блоків диспергування. Зазвичай використовують симетричний шар розміром у декілька десятків міліметрів. В якості робочого середовища застосовують діелектричні рідини (насичені вуглеводні, спирти, вода), що забезпечують високі швидкості охолодження (до  $10^9$  К/с) при конденсації речовини, яка зазнала фазових перетворень під дією високих температур (від  $10^3$  до  $10^4$  К) [1] і тисків (до 280 МПа) [2] в іскрових каналах.

**Аналіз проблеми.** Зазначені умови, окрім позитивного результату, сприяють виникненню в електроіскровому навантаженні складних внутрішніх зворотних зв'язків, що збільшує нестабільність режимів обробки, особливо коли необхідно диспергувати коштовні чи рідкісні матеріали і створити шар з великою кількістю гранул неможливо. Для стабілізації режимів роботи

УЕД відомі розробки напівпровідникових формувачів розрядних імпульсів з малим внутрішнім опором і регульованими параметричними взаємозв'язками, що базуються на емпіричних залежностях між опором багатоканального іскрового навантаження, напругою та енергією в імпульсі. Досягнуто значного прогресу і у розробці методів впливу на продуктивність об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД). Так, досліджено можливість підвищення продуктивності обробки в 2 – 10 разів при відповідному комбінуванні ємності накопичувача (у діапазоні від 10 до 100 мкФ), частоти електричних імпульсів (від 0,3 до 4 кГц), площі електродів та висоти шару гранул. Виходити за межі зазначених діапазонів реалізації ОЕІД з тих чи інших причин недоцільно (наприклад, збільшення частоти обмежене тривалістю релаксації середовища). Тому подальше підвищення продуктивності і зменшення нестабільності режимів УЕД потребують дослідження нових способів впливу на багатоканальний іскровий розряд і комплекс явищ, що його супроводжують в динаміці одиничного розрядного імпульсу.



1 – діелектричний корпус реактора; 2 – сітчасте днище; 3 – електроди; 4 – пружинна підвіска; 5 – патрубок для подачі рідини; 6 – патрубок для подачі гранул; 7 – патрубок для виводу рідини; 8 – направляючі діелектричні вставки

Рисунок 1– Однокамерний реактор УЕД [3] і схема його підключення

Раніше здійснювалися спроби застосування специфічних ефектів, основаних на дії гідропотоків, барботажу і вібрації, що мали б збільшити кількість локальних іскрових каналів, однорідність їх розподілення у реакторі, швидкість видалення продуктів, тощо. Механізми таких активних впливів у зв'язку із обмеженими можливостями теоретичних і експериментальних методів досліджень тривалий час не вивчалися, тому однозначних результатів у цьому напрямку не було досягнуто. Сама ідея, що спонукала розробників здійснювати такі спроби, полягала в примусовій (від зовнішніх пристроїв) інтенсифікації таких вторинних явищ, супроводжуваних електроіскровою обробкою, як переміщення гранул, гідродинамічні зворушення і газовиділення у се-

редовищі. Припускалося, що вони можуть призводити до передчасного руйнування іскрових каналів і створення нових на багатьох контактах між гранулами в ході одиничного розрядного імпульсу, а також сприяти виносу ерозійних продуктів із локальних розрядних зон. Вочевидь, використання цих вторинних явищ можливе і без застосування зовнішніх пристроїв на основі вивчення і врахування їх природної динаміки емпіричними методами. Тоді переміщення гранули, розповсюдження гідродинамічних зворушень від іскрових каналів, температура середовища і вміст у середовищі газових включень можуть розглядатися як діючі фактори. Регулюванню можуть підлягати відповідні швидкості переміщення чи розповсюдження, розміри і концентрація газових включень. Вказані фактори впливають також на об'єм і форму розрядної плазми, кут дії на гранулу теплового потоку, на площу зняття матеріалу з поверхні гранули в динаміці. Іншими словами існує зворотній зв'язок між вторинними і первинними електророзрядними явищами як на окремому, так і на різних контактах (локальний розряд на одному контакті впливає на динамічні параметри розрядів на сусідніх контактах).

Другим важливим аспектом проблеми підвищення продуктивності, стабільності і якості електроіскрової обробки є регульованість власних плазмокінематичних і електричних характеристик окремих локальних іскрових каналів чи їх ланцюгів в умовах з рухомими гранулами. Ці характеристики залежать від розподілу потенціалів у шарі, ємності накопичувача, індуктивності розрядного контуру, діаметру і матеріалу гранул, висоти шару, властивостей рідини, тощо. Регулюючі впливи доцільно здійснювати шляхом комбінування вказаних початкових умов з урахуванням і використанням вторинних явищ, що призводять до динамічного перерозподілу потенціалів у шарі гранул.

Зв'язок плазмокінематичних характеристики окремих локальних іскрових каналів і їх похідних (кут дії на гранулу теплового потоку, тощо), а також струмів у гілках багатоканальних швидкомігруючих розрядів з температурою речовини в зоні розряду, об'ємом матеріалу, що плавиться і випаровується під час розряду, відображено у цілому ряді відомих математичних моделей відповідних електротеплових процесів (наприклад, [4]). В задачах фізичного моделювання початковий або ж динамічний розподіл потенціалів віддзеркалюється варіаціями напруги накопичувача, прикладеної до модельної ділянки, яка містить декілька гранул, а висота шару – зусиллям, пропорційним вазі шару у визначеному розрізі із урахуванням можливих ступенів свободи.

**Метою** даної роботи є розробка нових методів регулювання динамічних параметрів електротехнічних систем об'ємного електроіскрового диспергування металевих гранул у рідині на основі виявлення взаємозв'язку електричних і просторово-часових характеристик розряду, встановлення залежностей цих характеристик від параметрів розрядного кола, навантаження та зовнішніх дій з урахуванням вторинних явищ і взаємного впливу процесів, які

виникають на близько розташованих контактах для підвищення продуктивності і стабілізації режимів вказаних систем без збільшення енерговитрат.

**Основна частина.** В роботі використовувались власні експериментальні методики високошвидкісної (до  $2,5 \cdot 10^6$  кадр/с) фотореєстрації іскрових розрядів між гранулами разом із синхронним осцилографуванням розрядних струмів і напруги на міжелектродному проміжку. Принципи побудови фізичних моделей і конструктивні рішення модельних комірок призначених для досліджень іскрових процесів між двома, трьома гранулами, у лінійному ланцюзі і шарі гранул описані в роботах [5–7]. Оригінальними є тінювий метод реєстрації наскрізних каналів протікання струму у шарі гранул і методика інтерпретації тінювих картин [7], що ґрунтується на співставленні інтенсивності розширення тінювих каналів і фотографам локальних іскрових розрядів та дозволяє визначати динамічний розподіл потенціалів і дисипацію енергії в об'ємі реактора. Для дослідження впливу газових включень на інтенсивність іскрових процесів використовувались моделі, в яких передбачено введення в робочу зону газових бульбашок діаметрами  $d_{\text{П}}$  від 0,5 до 5 мм (групами, уздовж однієї лінії і окремо – на різних відстанях до вісі контакту). Визначення швидкості розповсюдження гідродинамічних зворушень у рідкому середовищі ( $v_{\text{ЗВ}}$ ) здійснювалося із застосуванням експериментальної методики, основаної на швидкісній фотореєстрації процесів деформації бульбашок, розташованих на відомих відстанях.

Для досягнення поставленої мети були узагальнені і зведені до єдиної системи як нові, так і отримані нами раніше розрізнені емпіричні результати.

Вивчення просторово-часових характеристик розряду у масштабі одного контакту між двома гранулами потребує попереднього визначення сукупності умов, за яких буде спостерігатися повне відтворення його електричних характеристик. Тому були проведені дослідження на предмет стабілізації розряду із варіюванням ємності накопичувача  $C$  від 10 до 100 мкФ і зарядної напруги  $U_0$  від 20 до 175 В із розрахунку на один контакт. Діапазон варіювання ємності цілком відповідав параметрам існуючих УЕД. Напругу було приведено від міжелектродної до напруги на одному контакті відповідно до методики, викладеної в роботі [8]. Розширення діапазону по напрузі відбувалося вже в ході експерименту: вниз – до припинення формування розряду; вгору – до межі переходу розряду із аперіодичного в коливальний.

Показана можливість формування повторюваних (із залишковою напругою на проміжку, узгоджених та коливальних) і нестабільних іскрових розрядів (рис. 2, а, б відповідно) [6]. Нестабільні розряди мають перемінні амплітуди ( $I_m$  відрізняється від розряду до розряду в декілька разів) і тривалості ( $0,5\pi (\mathcal{L}_k C)^{1/2} \leq \tau \leq \pi (\mathcal{L}_k C)^{1/2}$ ), різкі спади розрядного струму, повторні пробої проміжку у ході одиничної комутації. Доведено, що повторювані іскрові роз-

ряди між гранулами формуються за умови

$$(U_0 - 44) / 0,56C \geq 1, \quad (1)$$

причому для них існує значима залежність (критерій Фішера) амплітуд і швидкостей зростання струму від параметрів розрядного кола.

Повну  $C - U_0$  діаграму умов здійснення всіх чотирьох режимів розряду між гранулами (відповідно до вищеозначеної класифікації – три види повторюваного розряду і нестабільний) представлено в роботі [5].

Для регулювання розрядного струму запропоновано співвідношення, яке пов'язує його значення із параметрами розрядного контуру, справедливе для елементарної контактної ділянки та двовимірного шару гранул:

$$i(t) = \begin{cases} \ln \left( a_1 \frac{C^{3/2}}{L_K^{1/2}} \right) \cdot (U_0 - a_2) \sin \frac{t}{\sqrt{L_K C}} & t \leq \pi(L_K C)^{1/2} \\ 0 & t > \pi(L_K C)^{1/2} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $a_1 = 0,291$  і  $a_2 = 34,8$  – визначені у роботі емпіричні коефіцієнти хвильового опору кола ( $\rho_{\text{хв}}$ ) і напруги  $U_0$ ;  $L_K$  – індуктивність розрядного контуру, мкГн;  $C$ , мкФ. Середнє квадратичне відхилення значень розрядних струмів (у часовому розрізі), розрахованих по (2), від експерименту не перевищує: для ділянки – 6 %, для двовимірного шару – 8 %.

Наступним етапом роботи було визначення умов узгодження локальних іскрових розрядів, їх виконання необхідне для звуження діапазонів дослідження просторово-часових характеристик розряду і їх подальшого регулювання в межах дотримання енергоефективних режимів обробки.

Було виявлено ділянку з екстремумом залежності від  $U_0$  (при різних  $C$ ) нормованої інтегральної потужності на іскрових проміжках ( $w_n$ ) при еквівалентному опорі проміжку  $R_E = \rho_{\text{хв}}$ . Встановлено характер залежності  $R_E(C, U_0)$ , що монотонно зменшується при збільшенні  $U_0$ . Екстремум відповідає максимально ефективному розподілу енергії (у локальному масштабі), тобто умовами його досягнення є умови узгодження іскрового навантаження. Величини  $w_n$  і  $R_E$  традиційно визначаються на підставі експериментальних даних:

$$w_n = 2 \int_0^{\tau} i(t) u(t) dt / CU_0^2, \quad (3)$$

$$R_E = \int_0^{\tau} i(t) u(t) dt / \int_0^{\tau} i(t)^2 dt. \quad (4)$$

Експериментально досліджено взаємозв'язок перетину розрядного каналу і електричної потужності. Показано, що співвідношення просторових масштабів розряду має наступний вигляд:

$$\delta [(0 \div 0,9) \cdot 10^{-3}] \sim r_{\text{ЕФ}} [(0,59 \div 1,6) \cdot 10^{-3}] \ll \lambda = c_0 \tau [(21 \div 66) \cdot 10^{-3}],$$

де  $\lambda$  і  $c_0$  – відповідно довжина хвилі і швидкість звуку у рідині;  $\delta$  – довжина розрядного каналу на момент досягнення максимуму потужності, відповідає переміщенню гранули,  $m$ ;  $r_{\text{ЕФ}}$  – ефективний радіус розрядного каналу.

Встановлено, що для граничних випадків можна використати як циліндричну, так і сферичну моделі розряду.

Для узгоджених розрядів виявлено три характерних часових інтервали. На першому, до моменту досягнення максимуму потужності, збільшення радіусу ( $r$ ) каналу (рис. 2, в) відбувається з рівномірною швидкістю ( $v$ ) від 50 до 70 м/с по закону  $r(t) = r_0 + vt$  (де  $r_0$  – початковий радіус каналу). На другому інтервалі, що відповідає спаду потужності, при  $0,5\pi(L_K C)^{1/2} \leq t \leq (2/3)\pi(L_K C)^{1/2}$ , канал стає неоднорідним і швидкість його розширення зменшується у 2 рази. На третьому інтервалі, при  $t \geq (2/3)\pi(L_K C)^{1/2}$  відбувається інерційне розширення порожнин зі швидкістю близько 30 м/с.

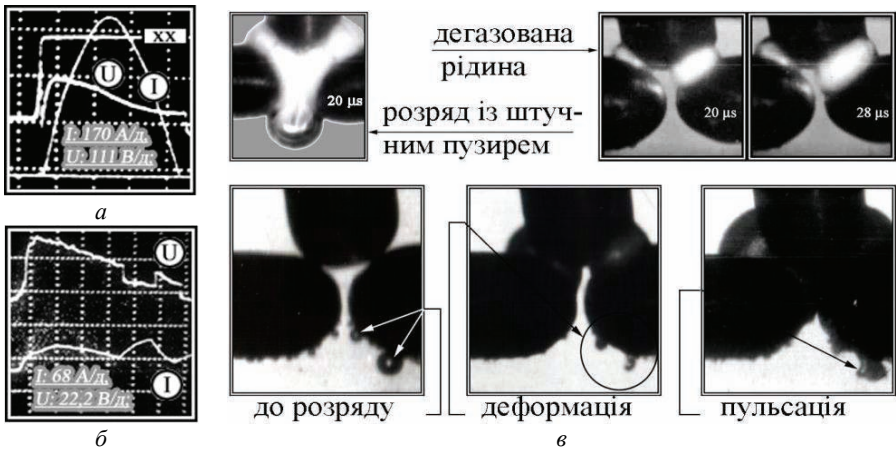


Рисунок 2 – Характерні осцилограми повторних (а) і нестабільних (б) іскрових розрядів між гранулами і їх просторово-часові характеристики (в)

Вперше експериментально підтверджено наявність переміщення гранули у ході розряду та визначено його величину [5]. Для гранул діаметром  $d_0 = 6$  мм при помірному навантаженні, що відповідає тиску на нижній ряд контактів шару розміром 15 x 15 гранул, таке переміщення за проміжок часу  $\Delta t = 100$  мкс складає від 0,7 до 0,9 мм. На основі цього було розроблено модельну схему плазмокінематичних процесів між гранулами і побудовано залежності площі зняття матеріалу з поверхні гранули  $S(d_0, r, \delta)$ , кутової області дії на гранулу теплового потоку  $\Theta_q(d_0, r, \delta)$  і об'єму плазми  $q(d_0, r, \delta)$ , виявлено взаємозв'язок з  $U_0$ ,  $C$ ,  $L_K$  ефективних значень цих величин ( $t_{ЕФ} = 0,5\pi(L_K C)^{1/2}$ ):

$$S(t) = \pi d_0 \left( \frac{r(t) - 0,25\delta(t)^2}{d_0 + \delta(t)} \right); \quad \Theta_q(t) = \arccos \left( 1 - \frac{r(t)^2 - 0,25\delta(t)^2}{d_0 + \delta(t)} \frac{2}{d_0} \right). \quad (5)$$

$$q(t_{E\Phi}) \approx \frac{4}{3} \pi r_{E\Phi}^3 - \frac{2}{3} \pi \left[ \left( \frac{r_{E\Phi}^2 - 0,25\delta^2}{d_0 + \delta} \right)^2 \left( 1,5d_0 - \frac{r_{E\Phi}^2 - 0,25\delta^2}{d_0 + \delta} \right) + \left( r_{E\Phi} - \frac{0,5d_0\delta + 0,25\delta^2 + r_{E\Phi}^2}{d_0 + \delta} \right) \left( 2r_{E\Phi} + \frac{0,5d_0\delta + 0,25\delta^2 + r_{E\Phi}^2}{d_0 + \delta} \right) \right], \quad (6)$$

де  $r_{E\Phi} = r_0 + v \cdot 0,5\pi(L_K C)^{1/2}$  – ефективний радіус плазмового каналу.

Виявлено, що за умов, коли розміри, кількість і швидкість введення бульбашок виключають можливість повного перекриття контактних проміжків, вони не впливають на процес формування іскрових каналів. Показано, що розташування і розміри газових включень можуть змінити просторову конфігурацію каналу розряду, збільшити об'єм розрядної плазми (рис. 2, в) та підвищити швидкість видалення і охолодження ерозійних порошків, зменшуючи до 30 % (при  $t = t_{E\Phi}$ ) їх концентрацію в розрядних зонах.

На основі визначення величини  $v_{ЗВ}$ , яка для узгоджених іскрових розрядів складала 270–310 м/с, сформульовано умови гідродинамічної взаємодії активованих контактів, які дозволяють інтенсифікувати рухливість електроіскрін і видалення продуктів ерозії протягом тривалості розрядного імпульсу:

$$r_0 + 0,5\pi \cdot v_{ЗВ} \cdot (L_K C)^{1/2} / d_0 \geq 1. \quad (7)$$

Одна із схем інтенсифікації рухливості електроіскрін і видалення іскроерозійних продуктів із розрядних зон на основі використання гідродинамічної взаємодії сусідніх активованих контактних вузлів полягає у наступній послідовності дій. Кількість гранул, що складатиме один горизонтальний ряд від електрода до електрода ( $N$ ), обирають таким чином, щоб забезпечити на кожній парі контактів напругу, що задовольняє умові (1) при фіксованій робочій напрузі формувача розрядних імпульсів. Задаються попереднім значенням ємності накопичувача енергії із діапазону представленого в табл. 1. Далі, розраховують інтегральний еквівалентний опір навантаження. Перерахунок напруги (від пари контактів до ряду) і визначення  $R_E$  виконують за методикою і формулами, наведеними в роботі [8]. Виходячи із технічно досяжних значень індуктивності розрядного контуру  $L_K$  розраховують можливі величини хвильового опору розрядного кола  $\rho_{хв}$  і порівнюють їх з  $R_E$ , перевіряють виконання умови  $R_E = \rho_{хв}$ . Послідовність дій повторюють доки умову не буде виконано. Наступним етапом є визначення діаметру гранул  $d_0$  і довжини міжелектродного проміжку.  $d_0$  визначається на підставі виразу (7), де  $v_{ЗВ}$  є відомою величиною, наведеною в табл. Довжину міжелектродного проміжку розраховують по формулі  $l = N \cdot d_0$ . Висоту шару обирають із міркувань симетрії.

Як показало впровадження результатів на діючих установках, дотри-

мання умов узгодження, гідродинамічної взаємодії і насичення рідкого середовища газовими бульбашками, дозволяє підвищити продуктивність іскрового диспергування в 1,3–1,6 рази, зменшити дисперсію розподілу порошків в 1,4 рази, зменшити нестабільність параметрів розрядних імпульсів та непродуктивні втрати енергії (на 10 – 40 %).

Експериментальні дослідження з використанням методики інтерпретації тінювих картин розряду показали, що доля активованих контактних проміжків збільшується до 25 %. Кількість іскрінь корелює з електричною потужністю так, що більшому загальному числу локальних іскрових каналів відповідає більша доля нестабільних. Для ряду металів, що взаємодіють з киснем, визначено тривалість екзотермічних реакцій, яка досягає подвійної тривалості розряду.

Ефект регулювання величин  $q(t_{\text{ЕФ}})$ ,  $S(t_{\text{ЕФ}})$ ,  $\Theta q(t_{\text{ЕФ}})$  та  $I(t_{\text{ЕФ}})$  за рахунок зміни параметрів розрядних імпульсів ( $U_0$ ,  $C$ ,  $L_K$ ) і характеристик навантаження (величин:  $d_0$ ,  $d_{\text{П}}$ ,  $h$ ) наведено в табл. Рекомендації щодо регулювання цих величин полягають у комбінуванні означених параметрів і характеристик відповідно до (2), (5)–(7) у визначених діапазонах (див. таблицю) за умови виконання вимог щодо стабілізації (1) і узгодження іскрового навантаження ( $R_E = \rho_{\text{хв}}$ ), де  $R_E$ , а також приведення напруги до міжелектродної, визначається на підставі емпіричних формул і методики перерахунку [8].

Діапазони параметрів і ефект регулювання

Параметри, що змінюються		$C$	$L_K$	$d_0$	$d_{\text{П}}$			
$\Delta(q_{\text{ЕФ}})$ , від середнього знач.		$\pm 0,84$	$\pm 0,31$	$\pm 0,16$	$+0,3$			
діапазони параметрів								
варійованих			контрольованих		вторинних динамічних		діапазони регулювання	
$U_0$ , В	$C$ , мкФ	$L_K$ , мкГн	$d_0$ , мм	$m(h)$ , г	$v$ , м/с	$\delta$ , мм	$I_m$ , кА	$q_{\text{ЕФ}}$ , мм <sup>3</sup>
50 ÷ 500	10 ÷ 100	1,8 ÷ 2,9	3 і 6	7 ÷ 80	50 ÷ 70	0,7 ÷ 0,9	0,12 ÷ 2,67	0,8 ÷ 9,8

**Висновки.** В роботі наведено узагальнення результатів експериментальних досліджень: режимів і просторової динаміки розряду; залежностей розрядного струму, інтегральних електричних і енергетичних характеристик від зарядної напруги, ємності накопичувача і індуктивності розрядного кола; взаємозв'язку радіуса і об'єму плазмового каналу з електричними характеристиками. Досліджено моделі впливу газових включень, висоти шару і діаметра гранул на характерний розмір локальних іскрових каналів, переміщення гранул і концентрацію продуктів ерозії в розрядній зоні, встановлено умови гідродинамічної взаємодії активованих контактних проміжків, що дозволяє шляхом відповідного вибору комбінації параметрів розрядних імпульсів і ха-



рактистик навантаження інтенсифікувати об'ємну міграцію іскрових розрядів і видалення іскроерозійних порошків під час протікання одиничного розрядного імпульсу. Такі результати можуть бути застосовані в установках УЕД для підвищення їх продуктивності і зменшення нестабільності параметрів розрядних імпульсів, зменшення дисперсії розподілу порошків і непродуктивних втрат енергії.

Запропоновані співвідношення для регулювання площі зняття матеріалу з поверхні гранули, об'єму плазми і області дії на гранулу теплового потоку, які пов'язують ці величини з параметрами розрядного контуру і характеристиками навантаження і дозволяють детермінувати існуючі математичні моделі електротеплових і гідродинамічних процесів при обробці шару струмопровідних рухомих гранул у рідині іскровими розрядами, визначати об'єм матеріалу, що зазнав фазових перетворень в локальних розрядних зонах.

**Список літератури:** 1. *Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucherjavaja I.N.* Spark erosion of conducting granules in a liquid: analysis of electromagnetic, thermal and hydrodynamic processes // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 6. – С. 4–18. 2. *Luo Y.F.* An Evaluation of Spark Mobility in Electrical Discharge Machining // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1998. – Vol. 26, № 3. – P. 1010–1016. 3. А.с. 1389956 СССР, МКИ В 23 Н 9/00. Способ электроэрозионного диспергирования металлов / *В.И. Казекин, В.Г. Гошченко.* (СССР). – № 4044046/25-08; заявл. 28.03.86; опубл. 23.04.88, Бюл. № 15. 4. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Математическое моделирование электротепловых процессов в токопроводящих гранулах при их обработке искровыми разрядами // Техническая электродинамика. – 1993. – № 3. – С. 12–17. 5. *Петриченко С.В.* Регулирование эффективного объема разрядной плазмы при контактном электроискровом процессе в жидкости // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3. – С. 4–10. 6. *Щерба А.А., Петриченко С.В.* Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 3. – С. 27–32. 7. *Щерба А.А., Петриченко С.В.* Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2002. – Ч. 3. – С. 61–65. 8. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н.* Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці ІЕД НАНУ. Електротехніка. – К., 2001. – С. 3–17.

*Надійшла до редколегії 09.03.2010.*