

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ НА ЇХНЮ ПРОДУКТИВНІСТЬ І ПИТОМІ ЕНЕРГОВИТРАТИ

Д.В. Вінниченко

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
пр. Жовтневий, 43-а, 54018, Миколаїв, Україна.

E-mail: vdvvs@inbox.ru.

Експериментально досліджено вплив електричних параметрів високовольтних електророзрядних установок (ЕРУ) для синтезу нановуглецю на їхню продуктивність і питомі енерговитрати. Визначено закономірності впливу електричних і технологічних характеристик ЕРУ на продуктивність синтезу нановуглецевих матеріалів (НВМ) у газових вуглецевовмісних середовищах при обмежених енерговитратах. Бібл. 12, рис. 2.

Ключові слова: електророзряд, струм, імпульс, висока напруга, потужність, синтез нановуглецю, продуктивність.

Вступ. Електророзрядні установки (ЕРУ), які формують у середовищі між електродами великі імпульсні струми [4,12], зазвичай використовують для отримання потужних електрогідралічних впливів [11], іскроерозійних мікро- і нанопорошків [9,10]. Останнім часом високовольтні ЕРУ з накопичувальними конденсаторами почали застосовувати для електроіскрової обробки графіту й вуглецевовмісних рідин, коли виникає синтез нановуглецевих матеріалів (НВМ) з унікальними властивостями [5,6]. Але значні втрати електроенергії у розрядних колах накопичувальних конденсаторів [8,9], низька частота та велика скважність імпульсних струмів між електродами суттєво обмежують продуктивність таких ЕРУ при синтезі НВМ [2,3]. У роботах [1–3] показано, що при формуванні високовольтним ЕРУ високочастотних електророзрядних струмів у міжелектродному проміжку (МЕП), заповненому вуглецевовмісним газом, продуктивність синтезу НВМ може бути більшою, ніж при формуванні низькочастотних струмів [5,6].

Для оцінки енергетичної і технологічної ефективності запропонованих високочастотних ЕРУ важливо визначити основні закономірності та особливості сукупного впливу їхніх електричних і конструктивних параметрів на продуктивність синтезу НВМ та виникаючі питомі енерговитрати, що і стало метою даної роботи.

Аналіз отриманих результатів. У проведених дослідженнях використовувалася високовольтна ЕРУ з формувачем високочастотних біполярних електророзрядних струмів, виконаним на основі високочастотного транзисторного інвертора напруги з послідовним резонансним контуром, паралельно до конденсатора якого підключався підвищувальний трансформатор [2]. Вторинна високовольтна обмотка трансформатора підключалася у МЕП, заповнений вуглецевовмісним газом. Елементи напівпровідникового формувача, його конструктивне виконання та діапазон регулювання частоти вихідної напруги інвертора вибиралися такими, щоб до електричного пробоя вуглецевовмісного газу в МЕП вихідна напруга трансформатора зростала до 50 кВ, а після пробоя – параметрично зменшувалася до 1–2 кВ і прямо пропорційно збільшувалася при подальшому зростанні довжини МЕП, забезпечуючи параметричну стабілізацію діючого (ефективного) значення I високочастотного струму $i(t)$ у розрядному каналі між електродами [2,3].

На рис. 1, а і б показано вплив вихідної середньої електричної потужності перетворювача P^* і діючого значення I^* його вихідного високочастотного струму на продуктивність K_p^* синтезу НВМ у МЕП довжиною l_1^* та l_2^* .

Для узагальнення результатів параметри P^* , I^* , K_p^* та l^* були безрозмірними і визначалися із співвідношень

$$P^* = P/P_{onm}, \quad I^* = I/I_{onm}, \quad K_p^* = K_p/K_{ponm}, \quad l^* = l/l_{max},$$

де P , I , K_p , l – абсолютні значення середньої потужності, діючого значення струму, продуктивності та довжини МЕП даної конструкції високовольтної ЕРУ (які вимірювалися або розраховувалися при експериментальних дослідженнях); P_{onm} , I_{onm} , K_{ponm} і l_{max} – оптимальні й максимальні значення цих параметрів.

Середня потужність P електроенергії, яка споживалась у каналі розряду під час синтезу тривалістю T , і діюче значення струму I в газовому МЕП за цей самий час T визначалися як

$$P = T^{-1} \int_T i(t)u(t)dt, \quad I = (T^{-1} \int_T i(t)^2 dt)^{0.5}. \quad (1,2)$$

Експериментальні дослідження підтвердили, що після пробоя МЕП збільшення його довжини викликає прямо пропорційне підвищення напруги між електродами, але не змінює діюче значення струму між ними, тобто середня потужність P теж зростає прямо пропорційно. Якщо питомі енерговитрати $W_{II} = \text{const}$, то продук-

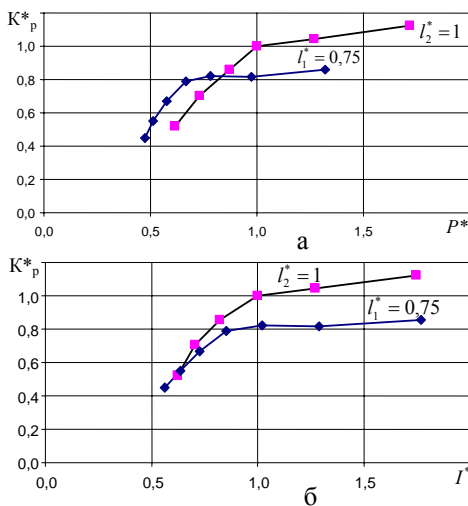


Рис. 1

тивність K_p^* буде зростати аналогічно.

Але із залежностей на рис. 1, а видно, що при збільшенні довжини МЕП від $l_1^* = 0,75$ до $l_2^* = 1$ та $P^* > 0,9$ величина K_p^* дійсно зростає, але не прямо пропорційно, а при $P^* < 0,9$ – вона навіть зменшується. Із кривих на рис. 1, б видно, що при аналогічному збільшенні довжини МЕП та $I^* > 0,6$ величина K_p^* теж зростає і теж не прямо пропорційно. Крім цього, з аналізу залежностей $K_p^*(P^*)$ та $K_p^*(I^*)$ зрозуміло, що при збільшенні відносних значень P^* та I^* від 0,5 до 1,7 продуктивність K_p^* спочатку зростає швидко і майже лінійно, а потім швидкість її зростання різко зменшується і при значному збільшенні P^* та I^* вона прямує до нуля. Зменшення швидкості зростання продуктивності установок при збільшенні їхньої потужності вказує на одночасне збільшення їхніх питомих енерговитрат. Тому при розробці нових електроімпульсних технологій як цільові функції зазвичай вибирають їхню продуктивність і питомі енерговитрати, а при синтезі електричних кіл ЕРУ, які реалізують такі технології, – середню потужність і діюче значення струму в навантаженні [4,8,12]. Це додатково обрuntuє те, що при виборі оптимальних режимних параметрів важливо враховувати вплив середньої потужності P^* і діючого значення струму I^* установок на їхню продуктивність і питомі енерговитрати W_{Π}^* .

На рис. 2, а і б для створених високовольтних ЕРУ представлено залежності відносних питомих енерговитрат W_{Π}^* від величин P^* і діючого значення струму I^* у МЕП. Енергія, яка витрачалася на синтез НВМ, розраховувалася на основі вимірювання вхідних параметрів установок, тобто з урахуванням їхніх внутрішніх енерговитрат.

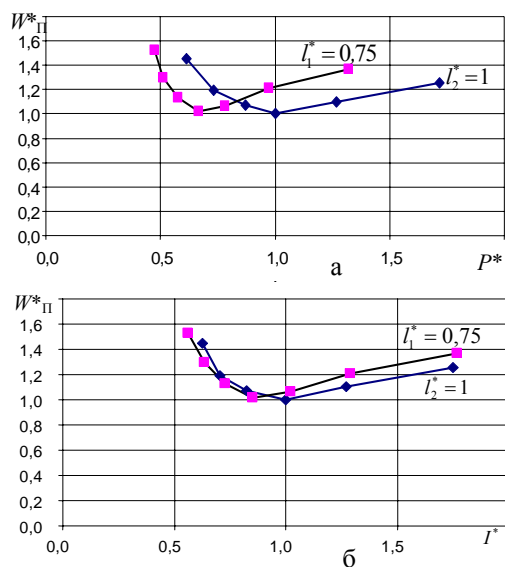


Рис. 2

Залежності $W_{\Pi}^*(P^*)$ і $W_{\Pi}^*(I^*)$ підтверджують, що при електророзрядній обробці вуглецевовмісних газів високочастотним струмом у МЕП довжиною від $l_1^* = 0,75$ до $l_2^* = 1$ існують оптимальні режими синтезу НВМ ($P^* \approx 1$ та $I^* \approx 1$), за яких в ЕРУ можна реалізувати близькі до мінімальних питомі енерговитрати W_{Π} [кДж/г] і близьку до максимальної продуктивність K_p [г/год]. Ці режими доцільно застосовувати при найбільшій довжині МЕП, яку можна реалізувати при вибраному електротехнічному і конструктивному рішенні ЕРУ. Тому при визначенні відносних значень довжини між електродами за базову вибиралася максимальна довжина l_{max} між ними, яка обмежувалася лише параметрами конструкції розрядної камери та її електричної міцності. За базове (оптимальне) значення продуктивності $K_{p\,opt}$ вибиралося таке її значення при максимальній довжині МЕП l_{max} , яке виникає при мінімальних (вибраних базовими) питомих енерговитратах $W_{\Pi\,min}$ (тобто при $W_{\Pi}^* = 1$). Для $W_{\Pi}^* = 1$ визначалися також оптимальні значення струму I_{opt} [А] та середньої потужності P [кВт] на виході ЕРУ, при яких їхні відносні значення на рис. 1 і рис. 2 дорівнюють $P^* = 1$ та $I^* = 1$.

Висновок.

Високовольтні електророзрядні установки, які формують високочастотні струми у вуглецевовмісному газі між електродами і забезпечують прямо пропорційне зростання напруги та незмінність діючого значення струму між ними, є ефективним електротехнічним рішенням для продуктивного синтезу нановуглецевих матеріалів.

Найбільшу продуктивність і найменші енергозатрати у запропонованих високовольтних електророзрядних установках доцільно реалізувати при максимально можливій відстані між електродами вибраного конструктивного рішення установок, їхніми вихідними електричними параметрами та стійкістю до високовольтних електричних пробів їхніх елементів, блоків і конструктивних рішень.

1. Богуславський Л.З., Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з onion-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду // Вісник НТУ "ХПІ". – 2015. – № 20 (1129). – С. 11–23.
2. Вінниченко Д.В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 129–131.
3. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Розробка принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів // Вісник НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12(1121). – С. 292–297.
4. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
5. Золотаренко А.Д., Золотаренко А.Д., Щур Д.В., Загинайченко С.Ю., Дубовой А.Г. К процессам формирования углеродных наноструктур в жидкой фазе // Труды XI Международной конференции "Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов". ICNMS'2009. – Украина. – 2009. – С. 404–407.
6. Кускова Н.И., Петриченко С.В., Цолин П.Л., Бакларь В.Ю. Зависимость выхода углеродных наноматериалов от строения молекул органических жидкостей в процессе электроразрядной обработки // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49. – № 1. – С. 14–19.
7. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–11.

8. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицин В.К., Иващенко Д.С. Аperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of duration // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 11–12.
9. Berkowitz A.E., Walter J.L. Sparc erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders // J. of Mater. Res. – March/April, 1987. – No 2 (2). – Pp. 277–288.
10. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2009. – T. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
11. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an Electrohydraulic installation // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2015. – Vol. 51. – No 6. – Pp. 581–588.
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014 – Conference Proceedings. – 2014. – Pp. 50–54.

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК СИНТЕЗА НАНОУГЛЕРОДА НА ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И УДЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГОЗАТРАТЫ

Винниченко Д.В.

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,

пр. Октябрьский, 43-а, Николаев, 54018, Украина.

E-mail: vdvvs@inbox.ru

Экспериментально исследовано влияние электрических параметров высоковольтных электроразрядных установок (ЭПУ) синтеза наноклерода на их производительность и удельные энергозатраты. Определены закономерности влияния электрических и технологических характеристик ЭПУ на производительность синтеза наноклеродных материалов (НУМ) в газовых углеродосодержащих средах при ограниченных энергозатратах. Библи. 12, рис. 2.

Ключевые слова: электроразряд, ток, импульс, высокое напряжение, мощность, синтез наноклерода, производительность.

INFLUENCE OF ELECTRICAL PARAMETERS OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC-DISCHARGE SYSTEMS FOR SYNTHESIS OF NANOCARBON ON THEIR PERFORMANCE AND SPECIFIC POWER INPUTS

D.V. Vinnychenko

Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Zhovtnevyi, 43-a, Mykolayiv, 54018, Ukraine.

E-mail: vdvvs@inbox.ru.

The influence of electrical parameters of high-voltage electric-discharge systems (EDS) for synthesis of nanocarbon on their performance and specific power inputs was experimentally studied. The regularities of influence of electrical and technological characteristics of EDS on synthesis efficiency of nanocarbon materials (NCM) in gaseous carbonic mediums at limited power inputs are determined. References 12, figures 2.

Key words: electric-discharge, current, pulse, high voltage, power, nanocarbon synthesis, productivity.

1. Bohuslavskyy L.Z., Vinnychenko D.V., Nazarova N.S. High voltage installation for the synthesis of nanocarbon with onion-like structure with the control system of electrical characteristics of gas discharge // Visnyk NTU "KhPI". – 2015. – No 20 (1129). – Pp. 11–23. (Ukr)
2. Vinnychenko D.V. Determination of the optimal characteristics of high voltage electric-discharge system for implementing electro-pulse synthesis technology of nanocarbon // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 4. – Pp. 129–131. (Ukr)
3. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S. Development of principles of management regime parameters of electrical systems for the electric-discharge synthesis of carbon nanomaterials // Visnyk NTU "KhPI". – 2015. – No 12(1121). – Pp. 292–297. (Ukr)
4. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive nonlinear-parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // Zbirnyk Naukovykh Prats Natsionalnoho Universytetu Korablebuduvannia. – 2010. – No 4. – Pp. 118–124. (Rus)
5. Zolotareno An.D., Zolotareno Al.D., Shchur D.V., Zahynaichenko S.Ju., Dubovoj A.H. By the processes of carbon nanostructures formation in the liquid phase // Trudy konferentsii ICHMS'2009. – 2009. – Pp. 404–405. (Rus)
6. Kuskova N.Yu., Petrychenko S.V., Tsolyn P.L., Baklar V.Yu. Dependence of carbon nanomaterials on the molecular structure of organic liquids in the process of discharge machining // Elektronnaia Obrabotka Materialov. – 2013. – Vol. 49. – No 1. – Pp. 14–19. (Rus)
7. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 4. – Pp. 3–11. (Rus)
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Synytsyn V.K., Ivashchenko D.C. Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of duration // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 9–10. (Rus)
9. Berkowitz A.E., Walter J.L. Sparc erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders // J. of Mater. Res. – March/April, 1987. – No 2 (2). – Pp. 277–288.
10. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2009. – T. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
11. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an Electrohydraulic installation // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2015. – Vol. 51. – No 6. – Pp. 581–588.
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014 – Conference Proceedings. – 2014. – Pp. 50–54.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 07.04.2016