

# Сравнение электрических характеристик искровых разрядов в слое металлических и графитовых гранул, погруженных в жидкость

С. В. Петриченко, Н. И. Кускова, Д. И. Листовский

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

Представлены результаты экспериментальных исследований отличий и общих закономерностей в электрических характеристиках разрядов на модели объемного электроискрового диспергирования для различных параметров электрической цепи при замене жидкости с воды на углеводородную среду, наличии либо отсутствии в ней синтезированных порошковых материалов, применении графитовых гранул вместо металлических.

*Ключевые слова:* объемное электроискровое диспергирование, электрические характеристики разряда, электрический разряд в жидкости, модель гранулированного слоя, углеродные наноструктуры, углеродные порошковые композиты.

УДК 621.3.015.3:537.528

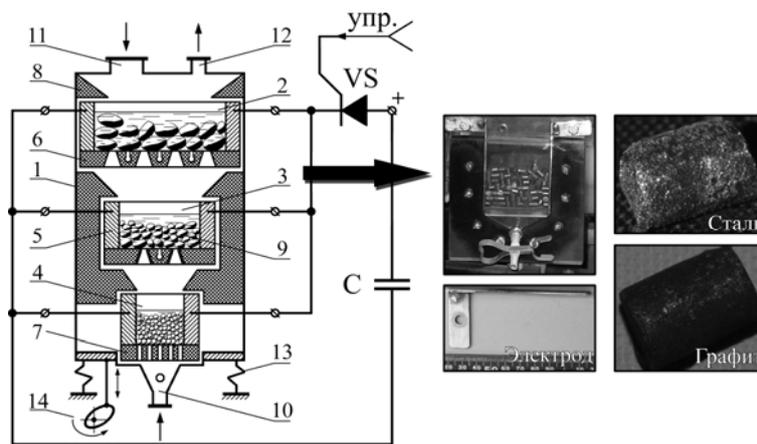
## ВВЕДЕНИЕ

Объемное электроискровое диспергирование (ОЭИД) токопроводящих гранул в диэлектрических жидкостях хорошо зарекомендовало себя как технологический процесс получения субмикронных порошков металлов и сплавов с уникальными морфометрическими и структурными характеристиками, достаточно узким диапазоном по фазовому составу и размерности [1–3]. Сам способ реализации разряда, применяемый в ОЭИД, может быть также использован для очистки воды и технических жидкостей, получения водорода и водородосодержащих газов [2]. Метод ОЭИД реализуется путем коммутации заряженного конденсатора с частотой до нескольких килогерц на нагрузку, которая представляет собой слой токопроводящих гранул между плоскими электродами, заполненный диэлектрической жидкостью. В местах контактов между гранулами в течение одного импульса возникают множественные искровые разряды [4]. При этом материал гранул в областях искровых разрядов претерпевает фазовые превращения: плавится и испаряется с последующей конденсацией вещества и образованием высокодисперсной порошковой твердой фазы. Фазовый состав порошка может быть модифицирован за счет участия жидкости в процессе фазовых превращений материала гранул. Вместе с тем жидкость обеспечивает высокие скорости охлаждения разогретого вещества на межфазных границах.

В промышленности для высокопродуктивной (до 20 кг/час) реализации метода ОЭИД и стабилизации его параметров может применяться реактор, показанный на рис. 1. Стабилизация пара-

метров осуществляется за счет применения нескольких блоков диспергирования 2–4 с классификаторами 6, обеспечивающими по мере уменьшения размеров гранул в ходе переработки их материала на порошок, распределение гранул между блоками диспергирования с тем, чтобы в каждом из них средний размер гранул 9 был приблизительно одинаковым. Вместе с тем применяют сугубо электротехнические способы стабилизации параметров разрядов – адаптивное изменение емкости конденсаторной батареи (С), ее зарядного напряжения, индуктивности разрядного контура [5–7]. Такое изменение осуществляют между разрядами, для каждого последующего – по результатам аналитической обработки электрических характеристик предыдущего [8]. Используют и непрерывное воздействие на процесс ОЭИД: вибрационное – при помощи толкателей и пружинной подвески (14 и 13 соответственно); барботаж через патрубок для подачи жидкости 10; изменение скорости протока жидкости.

В последние годы все более востребованными становятся порошковые углеродные наноматериалы, карбиды и углеродсодержащие композиты, применяемые в нанотехнологиях, а в качестве функциональных материалов – в промышленности (триботехнические, сорбенты и т.д.). Наиболее важной задачей для развития методов их получения и соответствующего оборудования является достижение высокой производительности и качества порошковых продуктов. Преимущество ОИЭД в этом отношении состоит в том, что сам процесс образования порошка происходит за один разрядный импульс во множестве локальных искрообразных зон между гранулами. Множественность обеспечивает производи-



**Рис. 1.** Технологическая схема ОЗИД (вариант) и элементы экспериментальной модели: 1 – корпус реактора; 2–4 – блоки диспергирования; 5 – электроды; 6 – перфорированные днища с каналами для подачи жидкости; 7 – днище нижнего блока; 8 – профильные вставки для установки блоков; 9 – слой гранул в жидкости; 10 – патрубок для подачи жидкости; 11 – патрубок для подачи гранул; 12 – патрубок для сбора суспензии; 13 – пружинная подвеска; 14 – толкатель с приводом.

тельность, а локализация разрядных зон способствует однородности порошковых продуктов по составу.

Существует положительный опыт применения ОЗИД (способ реализации разряда, близкий по условиям к ОЭИД) для формирования углеродных наноструктур [9] и углеродных порошковых композитов. Однако в отличие от ОЭИД металлов и сплавов объемный электроискровой процесс, феноменология и динамика разрядов в слое графитовых гранул, их электрические характеристики практически не изучены. Недостаточно изучено и влияние жидкой среды, особенно углеводородной. Имеющиеся результаты для металлов и сплавов не могут быть распространены на процессы электроискровой обработки углеродных гранул в жидкости из-за существенных отличий в строении и теплофизических свойствах указанных исходных материалов.

Цель работы – экспериментальное исследование отличий и общих закономерностей в электрических характеристиках разрядов на модели ОЗИД для различных параметров электрической цепи при замене жидкости с воды на углеводородную среду, наличии либо отсутствии в ней синтезированных порошковых материалов, применении вместо металлических гранул графитовых.

#### МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Реализован двумерный симметричный слой гранул между двумя стальными пластинчатыми электродами, расположенными в ячейке вертикально (рис. 1). Электроды сориентированы рабочими плоскостями пластин параллельно. Расстояние между электродами (рабочими плоскостями) – 60 мм. Соответственно длина слоя  $l = 60$  мм, высота, до которой загружались гранулы,  $h = 60$  мм. Жидкость в ячейку заливалась таким образом, чтобы ее уровень по высоте на

10 мм превышал уровень загрузки гранул. Условный диаметр каждой гранулы слоя составлял около 6 мм. Гранулы изготавливались из цилиндрического прута диаметром 6 мм путем его нарезки на фрагменты длиной 6 мм.

До проведения измерений гранулы подвергались предварительной электроискровой обработке (приработке) до состояния, при котором их поверхности были полностью покрыты эрозионными кратерами (рис. 1), а форма цилиндрических фрагментов изначально была скругленной. Приработка осуществлялась в жидком углеводороде (циклогексане) для исключения в измерительных экспериментах неучтенного, привнесенного фактора окисления их поверхностей. Приработка производилась в том же слое при напряжениях заряда конденсатора 500 В, которое является типичным для объемного электроискрового диспергирования в промышленных целях.

Использовались два материала гранул – сталь и графит (чистый). Графитовые гранулы изготавливались из стержней, используемых в спектрографии в качестве электродов.

В экспериментальном стенде применен комплект электрооборудования, состоящий из универсального источника питания типа УИП-1, обеспечивающего стабилизированное напряжение постоянного тока от 20 до 600 В (при токе нагрузки до 0,6 А); высокоомного зарядного сопротивления на базе резисторов ПЭВ-100; тиристора типа ТБ353-630; конденсатора К41И-7 номиналом 100 мкФ. Во всех экспериментах применялся один и тот же конденсатор, топология соединительных проводов не изменялась.

Управление тиристором осуществлялось при помощи генератора прямоугольных (сдвинутых) импульсов Г5-63 в режиме ручного запуска (за исключением процедуры приработки). Измерения производились с применением коаксиального низкоомного шунта и экранированного оми-

ческого малоиндуктивного делителя напряжения. Сигналы регистрировались двухлучевыми запоминающими осциллографами С8-17 и W 2012 (Wittig Technologies). Подробней вопросы синхронизации измерений, процедура работы стенда, обоснование модели и сведения о датчиках изложены в работах [10, 11].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для условий эксперимента область стабильных разрядов характеризовалась повторением формы напряжения на межэлектродном промежутке (МЭП) и разрядного тока, а также одинаковыми амплитудными значениями указанных величин, относительное изменение которых при воспроизводстве начальных условий реализации не превышало 10% (рис. 2б,в). Для всех применяемых жидкостей стабилизация разряда в двумерном слое металлических гранул наблюдалась при  $U_0 > 200$  В, что соответствует среднему напряжению на одном контактном промежутке  $U_{01К} > 20$  В. Величина среднего напряжения на одном контактном промежутке определялась по формуле

$$U_{01К} = U_0 / (n + 1), \quad (1)$$

где  $n$  – количество гранул в одном ряду.

При использовании графитовых гранул (рис. 2г) стабилизация формы разрядного тока не наблюдалась. Не наблюдалась стабилизация и для металлических гранул при зарядных напряжениях менее 200 В (рис. 2а).

Сравнение осциллограмм стабильного электроискрового разряда между гранулами в чистой воде и воде, содержащей порошковые продукты электроэрозионного диспергирования, для одинаковых зарядных напряжений показало, что:

- амплитуды разрядных токов для разрядов в чистой воде ( $I_{m,ч}$ ) несколько ниже соответствующих амплитуд для разрядов в воде с содержанием продуктов диспергирования ( $I_{m,н}$ ) (рис. 3а). Максимальное отличие амплитудных значений ( $\Delta I_m = I_{m,н} - I_{m,ч}$ ) наблюдается для низких зарядных напряжений. Относительная величина  $\Delta I_m / I_{m,ч}$  может достигать значений 0,45, что наблюдается для зарядного напряжения  $U_0 = 300$  В (рис. 3б);

- при увеличении зарядного напряжения от 300 до 600 В значение  $\Delta I_m / I_{m,ч}$  для одинаковых  $U_0$  уменьшается и при  $U_0 = 600$  В может достигать нуля;

- отношение выделившейся в межэлектродном промежутке энергии ( $W_\tau$ ) к запасенной ( $W_{омн} = W_\tau / W_0$ ) с увеличением зарядного напряжения возрастает как для разрядов в чистой воде ( $W_{омн,ч}$ ), так и для разрядов в воде с содержанием

порошковых продуктов ( $W_{омн,н}$ ) (рис. 3в).  $W_\tau$  определяется на основании выражения

$$W_\tau = \int_0^\tau U(t)I(t)dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  – момент времени, соответствующий пересечению кривой тока нулевого значения на осциллограмме, с.

Большая от запасенной доля энергии для одинаковых значений  $U_0$  выделяется при разряде в чистой воде. Так, для  $U_0 = 300$  В разница  $\Delta W_{омн,\%} = (W_{омн,ч} - W_{омн,н}) \cdot 100\%$  минимальна и может достигать нуля, а для  $U_0 = 600$  В увеличивается до 16% (рис. 3б). При этом интегральное эквивалентное сопротивление межэлектродного промежутка на токовой стадии, определяемое на основании выражения [8]:

$$R_\Sigma = \frac{\int_0^\tau U(t)I(t)dt}{\int_0^\tau I(t)^2 dt}, \quad (3)$$

для разрядов в чистой воде и разрядов в воде с содержанием порошка с увеличением зарядного напряжения (в диапазоне условий эксперимента) сопротивление снижается (таблица). Максимальная от запасенной доля энергии, выделившейся в межэлектродном промежутке, соответствует зарядному напряжению 600 В, однако экстремума в этом диапазоне не наблюдается (рис. 3в).

Замена чистой воды на углеводородную жидкость – циклогексан (предельный циклический углеводород) – не приводит к заметным качественным изменениям электрических характеристик искрового процесса на токовой стадии. Важной отличительной особенностью является то, что после каждого искрового разряда для экспериментов с применением циклогексана не наблюдается резкого стекания заряда конденсаторной батареи сквозь среду. На осциллограммах присутствует горизонтальный участок напряжения на МЭП (рис. 2в). Таким образом, можно сделать вывод о том, что изменение удельной электропроводности среды путем замены жидкости не приводит к существенным изменениям в электрических характеристиках разряда на активной стадии.

В то же время наличие электроэрозионного порошка в жидкости изменяет как интегральные энергетические характеристики разряда ( $W_{омн}$ ), так и амплитудные значения электрических величин:  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $R(t)$ , приведенные в таблице и на рис. 3. Иными словами, для примененных жидкостей динамика электрических характеристик определяется в основном наличием либо отсутствием искроэрозионного порошка в жидкости. Это подтверждается практически полным совпадением горизонтальных участков кривых

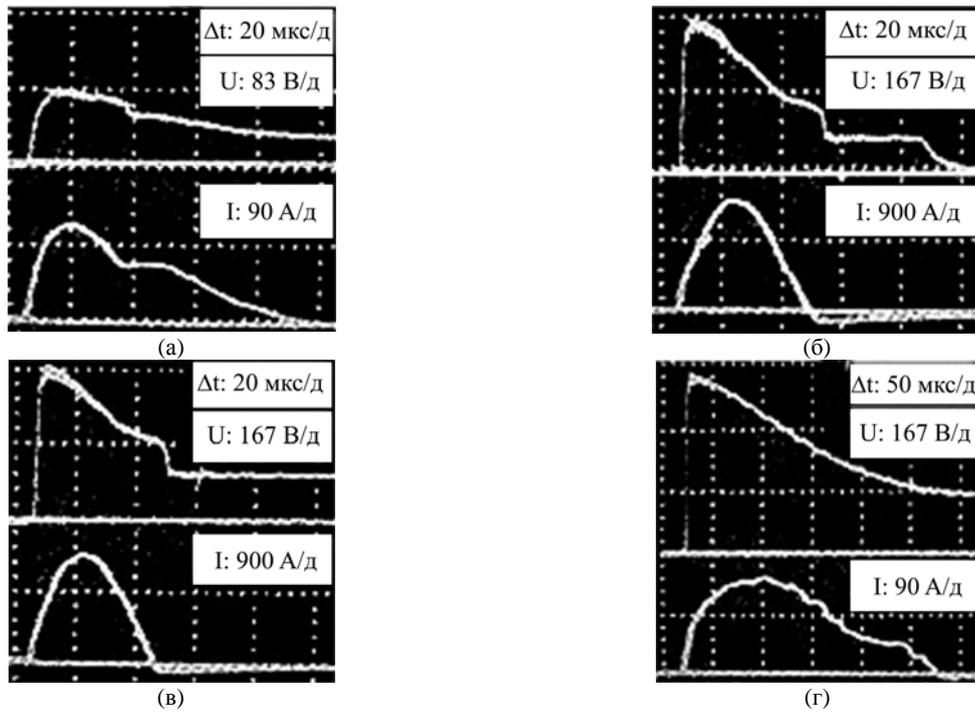


Рис. 2. Характерные осциллограммы различных видов разряда.

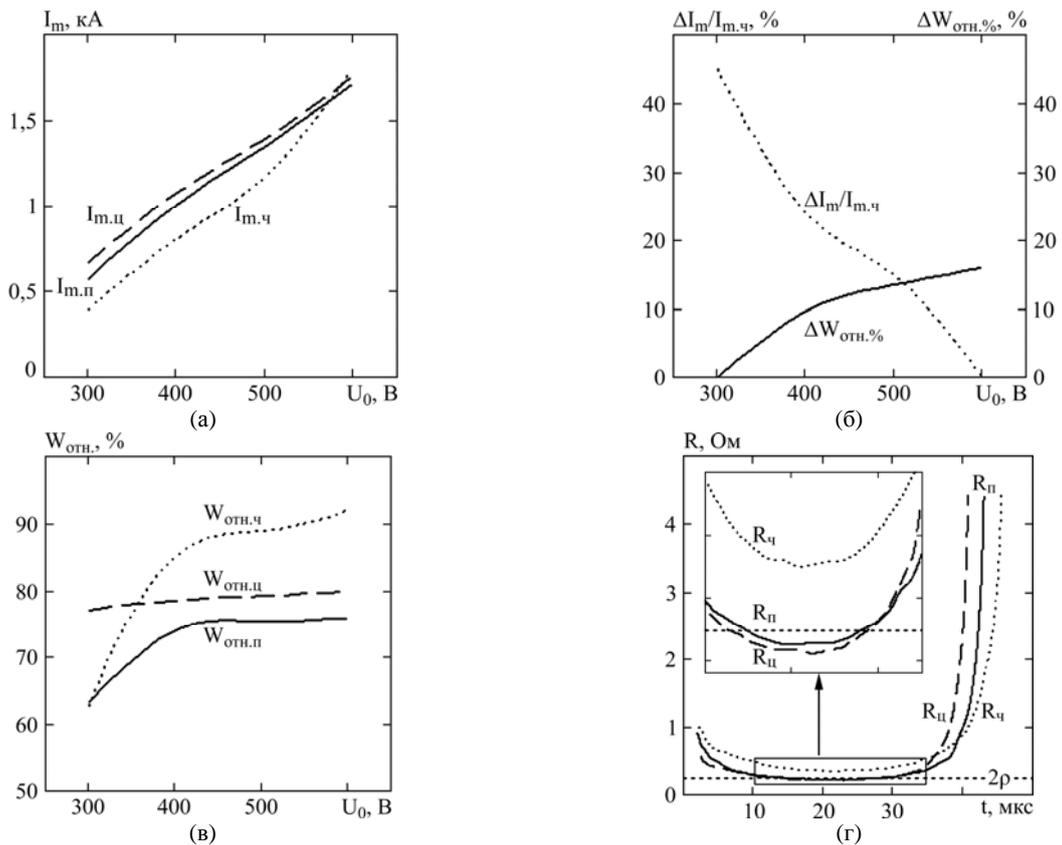


Рис. 3. Сравнительные электрические и энергетические характеристики разрядов в двумерном слое металлических гранул.

импеданса МЭП  $R(t)$  при реализации разряда с одинаковым  $U_0$  (при 400, 500, 600 В) и содержанием порошка в циклогексане и воде (рис. 3г). Интегральные эквивалентные сопротивления в этих случаях также практически не отличаются (см. таблицу).

Из рисунков видно, что для случая использования стальных гранул кривые  $R(t)$  при разряде в

циклогексане с порошком и в воде с порошком в точке своего минимума на 45% ниже, чем при разряде в чистой воде (рис. 3г).

Вместе с тем увеличение зарядного напряжения для стабильных разрядов от 300 до 600 В в жидкости с содержанием эрозионного порошка приводит к снижению минимального значения  $R(t)$  в 2 раза (рис. 4а), характер кривой сопротив-

## Основные характеристики искровых разрядов

Слой	$U_0$ , В	$U_m$ , В	$I_m$ , А	$P$ , кВт	$W_{зан}$ , Дж	$W_m$ , Дж	$W_m/W_{зан}$ , %	$R_{экс}$ , Ом
Стальные гранулы/вода с порошком	300	208	576	108	4,5	2,85	63,3	0,389
	400	267	1008	245	8	6,04	75,5	0,276
	500	333	1350	381	12,5	9,42	75,4	0,242
	600	400	1710	559	18	13,67	75,9	0,225
Стальные гранулы/вода	300	267	396	103	4,5	2,82	62,7	0,839
	400	317	810	237	8	6,81	85,1	0,432
	500	383	1170	409	12,5	11,11	88,9	0,351
	600	400	1800	630	18	16,55	91,9	0,232
Стальные гранулы/циклогексан с порошком	300	225	666	142	4,5	3,47	77,1	0,37
	400	267	1080	274	8	6,28	78,5	0,259
	500	333	1395	396	12,5	9,90	79,2	0,240
	600	392	1755	585	18	14,37	79,8	0,223
Графитовые гранулы/циклогексан/порошок	400	383	92	31	8	4,23	52,9	4,37
	500	475	149	58	12,5	7,55	60,4	3,02
	600	567	216	103	18	11,51	63,9	2,52

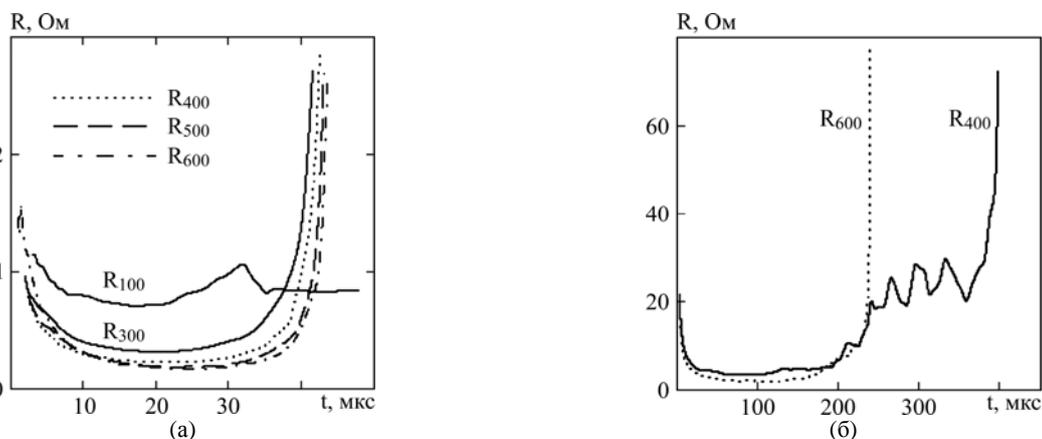


Рис. 4. Временные зависимости сопротивлений при разряде в слое металлических (а) и графитовых (б) гранул.

ления не изменяется. Как видно из рис. 4а, нестабильный разряд ( $R_{100}$ ) имеет значительно более продолжительную токовую стадию, временная зависимость сопротивления может характеризоваться участками его роста, что, по всей видимости, связано с потерей проводимости одной совокупности локальных искровых разрядов между гранулами, которая образовывала сквозной канал протекания тока, и формированием альтернативной. Возможно, этому способствует низкая подвижность гранул (перемещение за четверть периода  $\delta$  [12]) при низких зарядных напряжениях.

Совершенно иной характер имеет электроискровой процесс при использовании двумерного слоя графитовых гранул в циклогексане с наличием искроэрозионного (углеродного) порошка (рис. 2г). Продолжительность стадии протекания разрядного тока в несколько раз выше, чем при использовании стальных гранул, для тех же прочих условий, а его максимальное значение на порядок ниже. Кривая тока имеет множество перегибов (по длительности – до 15 мкс), которые, очевидно, связаны с формированием и разрушением локальных искровых каналов между

парами гранул в слое. Из-за малости приращений тока по амплитуде вследствие этих процессов соответствующее падение напряжения на индуктивности промежутка (по завышенной оценке) не проявляется на осциллограмме напряжения МЭП (рис. 2г) и временных зависимостях сопротивления ( $R_{600}$  на рис. 4б).

## ВЫВОДЫ

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что замена воды на углеводородную жидкость при реализации разрядов и соответственно электропроводности жидкой среды ОЭИД меньше влияет на характер электроискровых процессов в слое гранул, чем наличие или отсутствие искроэрозионного порошка в данной жидкости. Электрические характеристики разрядов в качественном и количественном отношении для ОЭИД металлических и графитовых гранул (при одинаковом их размере и размере слоя) в близких диапазонах электрических параметров разрядной цепи (во взаимосвязанном комплексе) имеют характерные особенности, определяемые свойствами исходных ма-

териалов гранул. Изучение этих особенностей необходимо для развития технологии получения углеродных наноструктур и углеродных порошковых композитов методом объемного электроискрового диспергирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

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. Левченко В.Ф. Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов. *Проблемы машиностроения*. 1992, (38), 78–86.
3. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous Soft Magnetic Particles Produced by Spark Erosion. *J Magn Magn Mater*. 2003, (1), 254–255.
4. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул. *Стабилизация параметров электрической энергии*. Сборник научных трудов. Киев: ИЭД НАНУ. 1991, 65–74.
5. Подольцев А.Д., Супруновская Н.И. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в нелинейной RLC цепи. *Технічна електродинаміка*. 2006, (4), 3–8.
6. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded Particles: Influence of Processing Parameters. *J Appl Phys*. 2004, **95**(3), 823–829.
7. Шидловский А.К., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электрических цепях разрядно-импульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда. *Технічна електродинаміка*. 2010, (1), 42–48.
8. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка*. 2001. Київ: Вид.-во Ін-ту електродинаміки НАНУ, 2001. С. 3–16.
9. Золотаренко Ан.Д., Золотаренко Ал.Д., Щур Д.В., Загинайченко С.Ю., Дубовой А.Г. К процессам формирования углеродных наноструктур в жидкой фазе. *Труды 11-й Международной конференции «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов»*, Ялта, Крым, Украина, 25–31 августа 2009 г., т. 3, с. 404–405.
10. Щерба А.А., Петриченко С.В. Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2004, (3), 27–32.
11. Щерба А.А., Петриченко С.В. Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул. *Технічна електродинаміка*. 2002, (3), 61–65.
12. Петриченко С.В. Регулирование эффективного объема разрядной плазмы при контактном электроискровом процессе в жидкости. *ЭОМ*. 2008, (3), 4–10.

Поступила 17.02.14

#### Summary

The results of experimental studies of the differences and general regularities of electrical characteristics of discharges using the model of three-dimensional electrodispersion for an electrical circuit with different parameters are presented. In the investigations, water, as the liquid medium, was substituted by the hydrocarbon liquid, with or without synthesized powder materials, in addition, graphitic pellets were used instead of metallic ones.

*Keywords: three-dimensional electrical spark dispersion, electrical characteristics of discharge, electrical discharge in liquids, model of granulated layer, carbon nanostructures, carbon powder composites.*