

Стабилизация разрядных импульсов и особенности согласования искровой нагрузки при электроэрозионном диспергировании металлических и графитовых гранул в жидкости

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

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: iipr@iipr.com.ua*

Представлены результаты экспериментальных исследований по уменьшению нестабильности параметров искровой нагрузки на модели объемного электроискрового диспергирования для стальных и графитовых гранул путем варьирования емкости конденсаторной батареи и зарядного напряжения, определены условия стабилизации искровых процессов в слое металлических и графитовых гранул. Показано влияние емкости конденсаторной батареи и зарядного напряжения на эффективность распределения энергии в разрядной цепи.

Ключевые слова: объемное электроискровое диспергирование, параметры разрядного контура, стабилизация параметров, согласование искровой нагрузки, электроэрозионные каналы, стальные гранулы, графитовые гранулы, слой гранул.

УДК 621.3.015.3:537.528

ВВЕДЕНИЕ

Явление электрической эрозии представляет собой сложный физический и физико-химический процесс, охватывающий целый ряд явлений: взаимодействие высокотемпературного газа с поверхностью твердого тела, обеспечение быстропротекающих агрегатных превращений, создание особых состояний вещества, взрывное испарение, мгновенное плавление, локальные термические удары. Впервые процесс электрической эрозии изучался в связи с разрушением электрических контактов. В 1940-х гг. было заявлено о принципиальной возможности использования явления искровой эрозии электродов в жидкости для получения порошковых материалов. Следующий этап развития электроэрозионных способов получения порошков токопроводящих материалов связан с идеей заполнить межэлектродный промежуток (МЭП) слоем кусочков металла (слой гранул). При этом протекание одного разрядного импульса вызывает искрение на многих контактах, и производительность электроэрозионного процесса увеличивается на несколько порядков по сравнению с таковой в случае эрозии контактных пар электродов [1].

В последнее время для получения высокодисперсных, в том числе нанодисперсных, порошков все шире стали использовать метод объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД). Реализация этого метода характеризуется простотой технологического оборудования, высокой дисперсностью получаемых порошков, экологической чистотой и безотходностью технологиче-

ских процессов, возможностью его внедрения в крупномасштабное производство. Метод ОЭИД можно использовать для получения высокодисперсных порошков многих видов материалов – чистых металлов, сплавов, компаундов, полупроводников и керамик. Структурное состояние, фазовый состав, дисперсность порошков, а также производительность процесса ОЭИД зависят от многих технологических и физико-химических факторов. Это обусловлено тем, что, несмотря на внешнюю простоту технологической реализации, искровой разряд, особенно в жидких средах, сопровождается сложными физико-химическими процессами.

Для повышения производительности метода ОЭИД металлических и графитовых гранул в жидкости с целью получения порошковых материалов необходимо стабилизировать электроразрядные процессы.

Так, в работах [2, 3] на упрощенных физических моделях реактора ОЭИД вплоть до двумерного слоя, но с малым количеством металлических гранул (4x4 гранулы), были определены условия, при которых наблюдался экстремум отношения выделившейся в электроискровой нагрузке энергии к запасенной в зависимости от электрических параметров (U_0 , C), и сформулированы соответствующие закономерности. Тем не менее данные закономерности требуют проверки применимости на модели слоя с большим, соответствующим технологическим условиям ОЭИД количеством гранул в слое между электродами (10x10, в двумерном срезе реактора вдоль межэлектродного направления). Ранее для таких условий было установлено, что с увеличе-

нием зарядного напряжения доля запасенной энергии, выделившейся в МЭП, возрастает. Однако при этом из-за ограниченного диапазона зарядных напряжений источника питания и фиксированной емкости конденсаторной батареи экстремум найден не был. Для графитовых гранул по тем же причинам не удалось достичь даже условий стабилизации электроискрового процесса в слое и соответствующего уменьшения неустойчивости электрических параметров. Поэтому необходимо найти условия, при которых:

- объемный электроискровой процесс, характеризующийся стохастическим формированием множества локальных искроэрозионных каналов между гранулами в течение одного разрядного импульса, будет протекать таким образом, чтобы электрические параметры разрядного импульса от разряда к разряду повторялись (длительность, амплитуда, форм-фактор); для данного материала и слоя этого можно достичь путем изменения зарядного напряжения (U_0) и емкости конденсаторной батареи (C), при этом важно выявить закономерности способа их комбинирования;

- отношение энергии, выделившейся в электроискровой нагрузке (в основном в виде тепла, работы над жидкостью и по перемещению гранул), к запасенной в конденсаторной батарее будет максимальным.

Такие исследования необходимо проводить в комплексе и на одних физических моделях с исследованиями электрического разряда в слое металлических гранул, для которого общие закономерности и методы стабилизации и согласования искровой нагрузки достаточно изучены и разработаны [4, 5].

Цель работы – определить условия стабилизации разрядных импульсов и согласования искровой нагрузки в процессе электроискрового диспергирования металлических и графитовых гранул в жидкости.

МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ранее было показано, что на основные электрические (напряжение на МЭП, разрядный ток, импеданс МЭП) и интегральные энергетические (выделившаяся в МЭП энергия) характеристики разряда существенно влияет наличие либо отсутствие искроэрозионного порошка в рабочей жидкости. В технологических схемах реализации метода объемного электроискрового диспергирования преимущественно используется проточный режим замены/фильтрации рабочей жидкости. При этом искроэрозионный порошок выносятся из реактора вместе с рабочей жидкостью и отделяется, например, на фильтре (возможно полевое воздействие, автоседimentация). В то же время влияние электропроводности жидкой сре-

ды (водопроводная вода или органическая жидкость) на электрические и энергетические характеристики разряда незначительно. Поэтому факторы влияния на искровой процесс концентрации порошка или смены вида жидкости исключены в контексте обозначенных задач.

В данной работе был реализован двумерный симметричный слой гранул между двумя стальными пластинчатыми электродами, расположенными в ячейке вертикально (рис. 1). Electroды 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. Во всех экспериментах, описанных далее, использовалась чистая водопроводная вода (удельная электропроводность находилась в диапазоне от 0,15 до 0,1 См/м), которая 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.

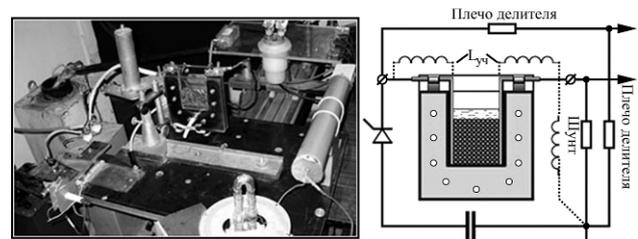


Рис. 1. Внешний вид и схема установки для исследования процессов ОЭИД.

До проведения измерений гранулы подвергались предварительной электроискровой обработке (приработке) до состояния, при котором их поверхности были полностью покрыты эрозионными кратерами, а изначально форма цилиндрических фрагментов была скругленной. Использовались два материала гранул – сталь (Ст3) и графит (чистый) (загрузка в каждом эксперименте только однотипного материала). Графитовые гранулы изготавливались из стержней, используемых в спектрографии в качестве электродов.

В экспериментальном стенде для зарядки конденсатора C применен комплект электрооборудования, состоящий из универсальных источников питания типа УИП-1 ($U = 20-600$ В) и ВС-23 ($U = 500-10000$ В) (использовались раздельно для выбранного режима); высокоомного зарядного сопротивления на базе резисторов ПЭВ-100; тиристора типа ТБ353-630; конденсаторов К41И-7 и К75-17 номиналами 100 и 50 мкФ соответственно (использовались раздельно для выбранного режима).

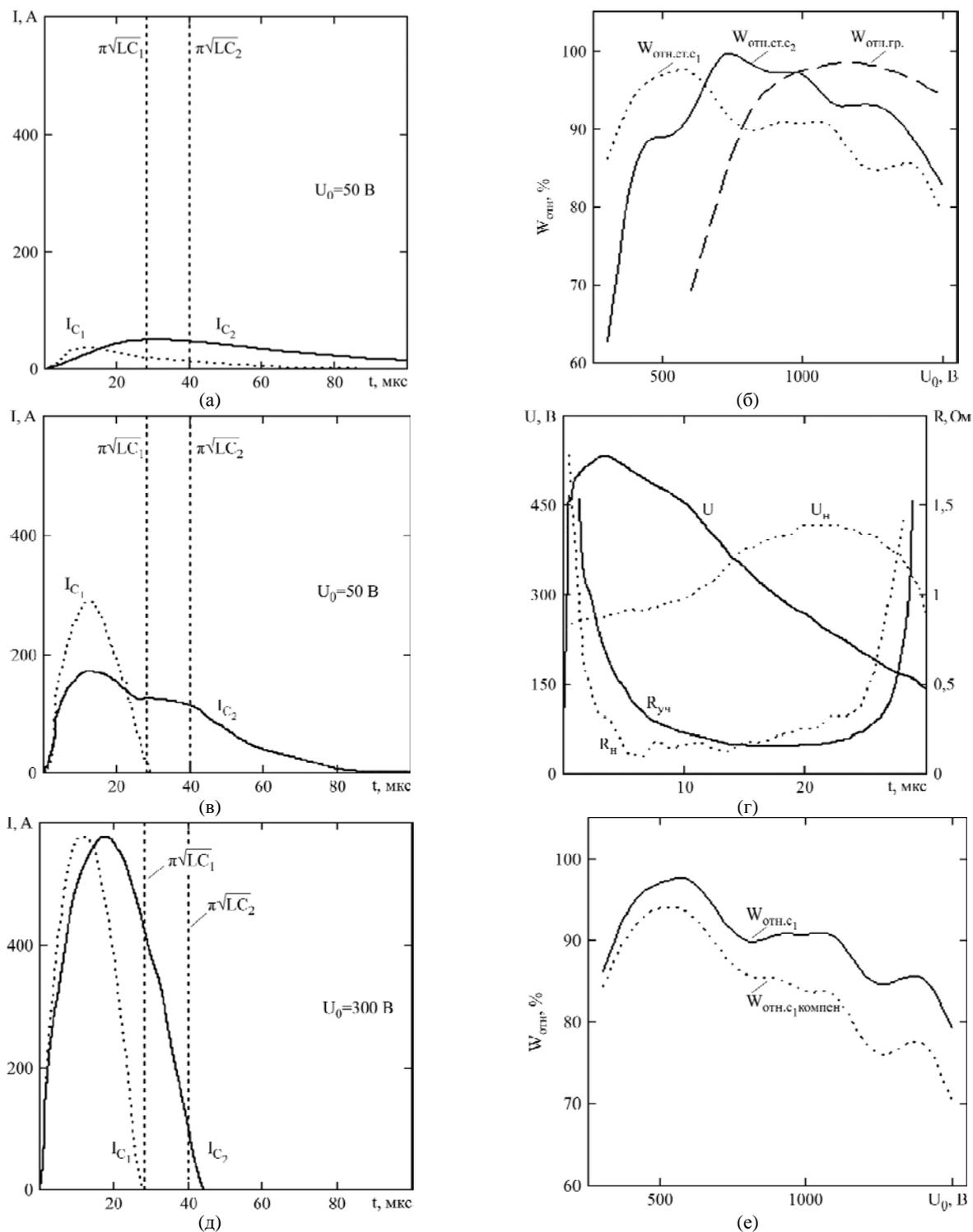


Рис. 2. Характерные временные зависимости разрядных токов при различных C и U_0 для металлических гранул (стохастические и стабильные) (а, в, д), эффективности энергоснабжения в МЭП от зарядных напряжений для разных материалов (б) и результаты компенсации методической ошибки измерений (г, е).

Управление тиристором осуществлялось с помощью генератора прямоугольных (сдвинутых) импульсов Г5-63 в режиме ручного запуска (за исключением процедуры приработки). Измерения производились с применением коаксиального низкоомного шунта и экранированного омического малоиндуктивного делителя напряжения. Сигналы регистрировались двухлучевыми запоминающими осциллографами С8-17 и W 2012 (Wittig Technologies).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одной из задач данной работы было доказательство общего характера положения, полученного ранее в работе [2], для электрических разрядов в элементарной цепочке металлических гранул (формирующей два последовательных контакта в воде) и в двумерном слое с малым количеством гранул (4x4). Суть его заключается

в том, что для меньших емкостей накопителя стабилизация разряда наблюдается при меньших зарядных напряжениях.

Из сравнения электрических характеристик искрового процесса (рис. 2в и 2д) следует, что для $C_1 = 50$ мкФ длительность положительного участка (полуволны) разрядного тока (I) приближается к значению $\pi\sqrt{LC}$ (полупериода короткозамкнутого контура для данных L и C) при меньших зарядных напряжениях, чем для $C_2 = 100$ мкФ. Уже при $U_0 = 150$ В для C_1 наблюдается стабилизация формы разрядного тока. В обоих случаях (C_1 и C_2) при $U_0 = 300$ В разрядный ток приобретает куполообразную форму с длительностью $\pi\sqrt{LC_{1,2}}$. Как видно из рис. 2в, для C_2 при $U_0 = 150$ В ток может иметь произвольную форму импульса на участке спада и носить «затянутый» по времени характер $((2 \div 3)\pi\sqrt{LC})$. Для C_1 такая феноменология наблюдается при меньшем U_0 (рис. 2а). Условия стабилизации разрядных токов по амплитуде принципиально аналогичны.

Важно отметить, что начальные участки фронтов разрядных токов (длительностью около 2–3 мкс) для различных емкостей при одинаковых зарядных напряжениях практически совпадают.

Можно предположить, что длительность совпадающих участков соответствует продолжительности формирования сквозных цепочек локальных искроэрозионных каналов между парами гранул от электрода к электроду. Расхождения фронтов разрядных токов сопровождаются перегибами на соответствующих кривых, что объясняется [6] фазовыми превращениями вещества, формирующего каналы проводимости.

Таким образом, отделив область стохастических разрядов, можно рассмотреть влияние емкости накопителя и зарядного напряжения на выделившуюся в электроискровой нагрузке относительную энергию $W_{отн} = (W/W_0) \cdot 100$ %. Кривая, аппроксимирующая эту зависимость для элементарной цепочки гранул [2], имеет максимум. Гипотетически максимум может присутствовать на кривой и для разряда в произвольно уложенном слое гранул. Ранее ввиду недостаточной величины зарядного напряжения экстремума на кривой зависимости W/W_0 от U_0 и C обнаружить не удалось, наблюдался монотонный рост относительной энергии. По оценкам, представленным в работе [2], экстремум может наблюдаться при условии обеспечения среднего напряжения на одном контакте порядка 60–70 В для $C = 100$ мкФ и при меньших напряжениях для меньших емкостей. Данное положение соответствует полученным новым результатам для

стальных гранул с большим их количеством в слое, чем в работах [2, 3]. Более интересным из практических соображений является наличие горизонтальных участков для зависимостей $W_{отн.см.}(U_0)$ при разных емкостях накопителя (рис. 2б). Эти участки обеспечивают возможность регулирования зарядного напряжения без снижения энергоэффективности электроискрового процесса обработки металлических гранул. Такое регулирование бывает необходимым для интенсификации миграции локальных искроэрозионных каналов в слое в течение одного разрядного импульса либо для увеличения плотностей разрядного тока в цепочках искровых каналов при нежелательном сваривании гранул. Как видно из рис. 2б, таких участков в диапазонах условий эксперимента наблюдалось несколько.

Для оценки методической ошибки, связанной с конечной собственной индуктивностью участка подключения делителя напряжения ($L_{\text{вч}}$) (рис. 1), и для ее учета, что особенно важно при определении интегральных энергетических характеристик, в данной работе по известной методике [3] в поступающем с соответствующего датчика сигнале $U(t)$ численно была скомпенсирована составляющая $L_{\text{вч}}(dI/dt)$. Как видно из рис. 2г, реальное активное динамическое сопротивление МЭП (R_H) на токовой стадии отличается от сопротивления участка ($R_{\text{вч}}$) по форме. С увеличением зарядного напряжения влияние указанной ошибки измерений возрастает (рис. 2е), что подтверждает необходимость ее учета при оценке энергоэффективности процессов диспергирования и использовании скомпенсированной зависимости $W_{отн.компен}(U_0)$ для более точного анализа. При этом кривая $W_{отн.компен}(U_0)$ имеет вид, подобный $W_{отн}(U_0)$. Описанные результаты по компенсации ошибки относятся к экспериментам с использованием стальных гранул.

Как и ожидалось, увеличение зарядного напряжения в 2,5 раза (до 1500 В) приводит к тому, что максимальное значение разрядного тока при реализации разряда в слое графитовых гранул ($I_{м.сп.}$) приближается к аналогичной величине для стальной металлозагрузки ($I_{м.см.}$). Так, если для начальных параметров разрядного контура, соответствующих максимальной по энергоэффективности обработке двумерного слоя стальных гранул ($U_0 \sim 600$ В при $C = 50$ мкФ), значение отношения $I_{м.см.}/I_{м.сп.}$ достигает 8, то при $U_0 = 1500$ В это значение монотонно снижается до 3,5 (рис. 3а). При этом для графитовых гранул к стабилизации формы кривых напряжения на МЭП и разрядного тока (рис. 3б) приводит увеличение U_0 до значений ~ 1200 В. Таким образом, значения зарядных напряжений, при которых происходит стабилизация разрядных

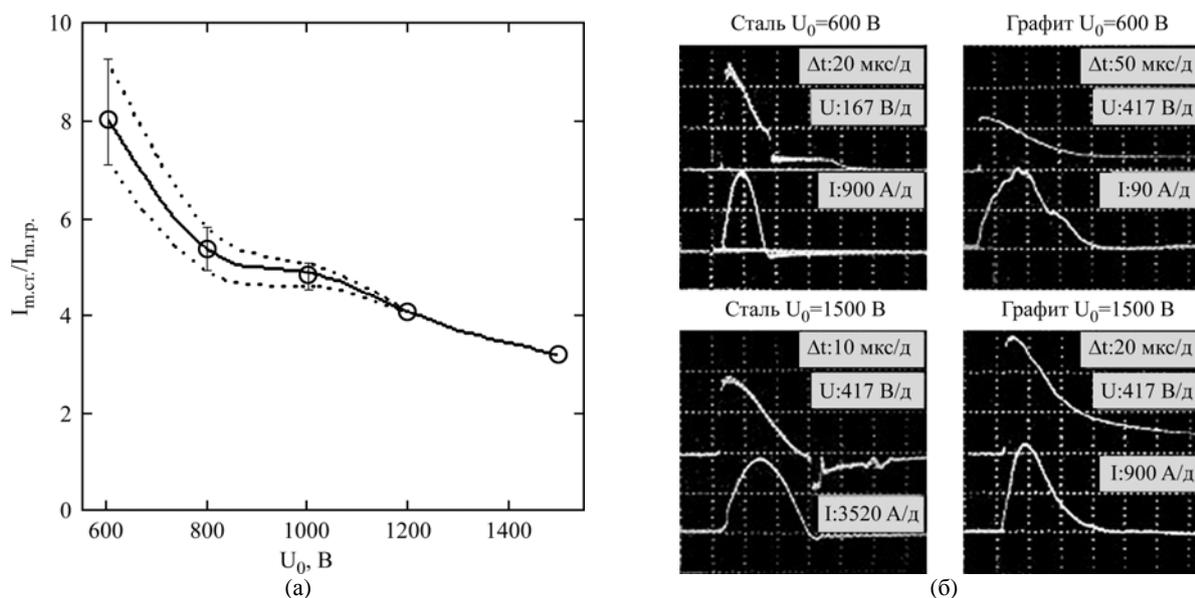


Рис. 3. Кривая зависимости амплитуд разрядного тока от зарядных напряжений для разных материалов гранул (а) и характерные осциллограммы разряда (б).

импульсов, для разных материалов гранул отличаются на порядок.

Установлено, что рост энергоэффективности процесса ОЭИД (в энергетическом отношении, если не рассматривать дисперсность продукта, распределение по фракциям и т.д.) наблюдается и для графитовых гранул (рис. 2б). Для последних при одинаковых емкостях конденсаторной батареи зависимость $W_{отн.сп.}(U_0)$ имеет максимум при зарядном напряжении, в два раза превышающем соответствующую величину U_0 для стальных гранул. Соответственно запасаемая энергия ($W_0 = CU_0^2/2$) в двух описанных экстремальных ситуациях отличается в 4 раза.

Объяснить такой феномен можно следующим образом. Электропроводность гранулированной системы в процессе электрического разряда после его зажигания определяется:

- интенсивностью фазовых превращений материала гранул и жидкости (динамическая составляющая);
- количеством (объемом) материала гранул, в котором произошли фазовые превращения (плавление и испарение в локальных контактных зонах);
- фазовыми состояниями материала гранул (на Р-Т диаграмме) с учетом долевого распределения.

В то же время электропроводность системы (на активной стадии) определяет динамическое и эквивалентное интегральное сопротивление слоя. Ранее было показано, что величина отношения эквивалентного интегрального сопротивления слоя к волновому сопротивлению разрядной цепи является условием экстремума для $W_{отн.сп.}(U_0)$. Отличие величин запасаемой энергии, необходимой для обеспечения экстремумов, объясняет-

ся существенным отличием Р-Т (давление-температура) условий фазовых превращений материалов (стали и графита). Иными словами, чтобы создать жидкогазофазные перемычки (из вещества гранул) между гранулами для графита, необходима существенно большая энергия.

ВЫВОДЫ

Подтверждены общие тенденции и для модельных задач определены условия стабилизации формы и амплитудных значений временных зависимостей электрических характеристик искровых разрядов в двумерном срезе технологического реактора объемного электроискрового диспергирования при использовании существенно различных материалов гранул (сталь и графит) за счет варьирования емкости конденсаторной батареи и зарядного напряжения путем их комбинирования.

Показано, что при прочих равных условиях:

- для стабилизации разряда в слое графитовых гранул необходимо зарядное напряжение, на порядок превышающее аналогичный параметр для стали;
 - для больших емкостей конденсаторной батареи для стабилизации нужно большее зарядное напряжение;
 - начальные участки фронтов разрядных токов в ситуациях с различными соизмеримыми емкостями совпадают, что свидетельствует о меньшем влиянии емкости на этапе формирования первичных сквозных цепочек от электрода до электрода, состоящих из локальных искр между гранулами для одного материала.
- Все полученные интегральные энергетические зависимости процесса от зарядного напряжения имеют экстремум, при этом:

– условия экстремумов для металлических гранул (сталь) совпадают с полученными ранее для малого (4 x 4) модельного слоя из алюминиевых гранул, что гипотетически можно объяснить практически равными молярными теплоемкостями для этих материалов;

– для стальных гранул присутствуют горизонтальные участки – области эффективного регулирования по напряжению;

– для графита область экстремума широкая, но без горизонтальных участков регулирования.

По результатам проведенной численной компенсации индуктивной составляющей участка измерения напряжения получена зависимость отношения выделившейся в искровой нагрузке энергии к запасенной от зарядного напряжения. Показано, что при больших скоростях нарастания тока компенсация индуктивной составляющей позволяет исключить методическую ошибку измерений, которая в диапазоне условий эксперимента составляет от 2 до 10%, что весьма важно при оценке КПД и проектировании электро-технологического комплекса объемного искрового диспергирования в целом.

Отношение амплитуды разрядного тока в слое стальных гранул к амплитуде тока в слое графитовых гранул с ростом зарядного напряжения от 600 до 1500 В уменьшается от 8 до 3,5 раза, при этом $W_{отн}$ для графитового слоя приближается к максимальным значениям $W_{отн}$ для стального.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков А.В., Булгакова Н.М., Бураков И.М. и др. *Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество*. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. 462 с.
2. Petrichenko S.V. Control of the Discharge Plasma Effective Volume at the Contact Electrospark Process in Liquid. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2008, **44**(3), 169–174.
3. 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.
4. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам. *Технічна електродинаміка*. 2014, (3), 12–18.
5. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2014, (5), 23–25.
6. Кускова Н.И., Коваль С.В. Исследование динамики нагрева жидкого проводника при однородном электрическом взрыве. *Письма в журнал технической физики*. 1995, **21**(6), 36–40.

Поступила 10.11.14
После доработки 24.12.14

Summary

The results are presented of the experimental studies of reducing the instability of the spark load parameters using the model of volume electrospark dispersion for steel and graphitic granules by varying the capacity of the capacitor battery and of the charging voltage. Stabilization conditions for the spark processes in the layer of metallic and graphitic granules are determined. Influence of the capacity of the capacitor battery and of the charging voltage on the energy distribution efficiency in the discharge circuit is shown.

Keywords: three-dimensional electrospark dispersion, parameters of the discharge circuit, stabilization of parameters, spark load matching, spark-erosion channels, steel granules, graphitic granules, granule layers.