

УДК 621.3.015.3 : 537.528

*Д. И. ЛИСТОВСКИЙ, С. В. ПЕТРИЧЕНКО***ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ В ЖИДКОСТИ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ, ВЫДЕЛИВШЕЙСЯ В ЭЛЕМЕНТАХ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ**

Запропоновано методику визначення початкових умов реалізації розряду в гранульованому шарі для оптимізації розподілу енергії в елементах розрядного контуру установок об'ємного електроіскрового диспергування. Проведено експериментальну перевірку розрахункових виразів для оцінки амплітуд розрядних струмів при реалізації розряду в реакторі з великою кількістю металевих гранул, показані способи визначення емпіричних коефіцієнтів і запропонований спосіб масштабування їх значень для різних геометричних характеристик реактора і гранул.

**Ключові слова:** об'ємне електроіскрове диспергування, оптимізація енергорозподілу в розрядному контурі, реактор диспергування, шар гранул, двоконтактна модель, коефіцієнти емпіричної залежності розрядного струму, міжелектродний проміжок, контакт між гранулами, іскровий розряд, електроіскрове навантаження.

Предложена методика определения начальных условий реализации разряда в гранулированном слое для оптимизации распределения энергии в элементах разрядной цепи установок объемного электроискрового диспергирования. Проведена экспериментальная проверка расчетных выражений для оценки амплитуд разрядных токов при реализации разряда в реакторе с большим количеством металлических гранул, показаны способы определения эмпирических коэффициентов и предложен способ масштабирования их значений для различных геометрических характеристик реактора и гранул.

**Ключевые слова:** объемное электроискровое диспергирование, оптимизация энергораспределения в разрядной цепи, реактор диспергирования, слой гранул, двухконтактная модель, коэффициенты эмпирической зависимости разрядного тока, межэлектродный промежуток, контакт между гранулами, искровой разряд, электроискровая нагрузка.

Problem of the energy efficiency increase of the equipment for volume electro spark dispersion of metal granules in liquid was addressed. Dynamic dependencies of discharge currents on discharge circuit's parameters were formalized. Methods of definition of initial conditions of the granulated layer discharge implementation for the optimization of energy distribution in elements of volume electro spark dispersion installations discharge circuit were offered. Calculated expressions for discharge current amplitude's estimation during discharge realization in the reactor with a large number of metal granules were experimentally approbated. Methods of definition of empirical coefficients were shown and the method of scaling of their values for different geometrical characteristics of the reactor and granules was offered.

**Keywords:** volume electro spark dispersion, optimization of energy distribution in the discharge circuit, the dispersion reactor, a layer of granules, double-contact model, coefficients of empirical dependence of a discharge current, an inter electrode gap, contact between granules, a spark discharge, electro spark loading.

**Введение.** Развитие промышленности связано с применением материалов, обладающих улучшенными характеристиками и новыми функциональными свойствами. При создании таких материалов все чаще используются порошковые системы. Например, для нанесения покрытий (повышенная износостойкость, твердость поверхности; экранирование либо поглощение электромагнитного излучения и пр.) или в качестве шихты компактов. Наноразмерные и наноструктурированные порошки используются и как конечный продукт – присадки триботехнического назначения; абсорбенты или агенты в водородной энергетике, медицине, биотехнологии; для создания изделий электроники (суперконденсаторы, полупроводниковые элементы) с улучшенными характеристиками и т.д.

Задачи производства порошков часто требуют не только обеспечения распределения продукта по дисперсности и морфологии, но и модификации фазового состава по сравнению с материалом исходного сырья (например, карбидизации) или даже получения других аллотропных форм химических элементов (например, углерода).

Качество порошка, производительность, удельные энергозатраты (энергоэффективность процесса синтеза и устройств) являются наиболее важными характеристи-

ками при производстве порошковых материалов (представлены по степени важности). Улучшение этих характеристик – актуальная научно-техническая проблема на стыке нескольких дисциплин.

Большинство из задач получения порошков решаемы с применением способа объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) токопроводящих гранул в жидкости. Реализация ОЭИД в устройстве с установленной мощностью в несколько кВ·А обеспечивает производительность синтеза порошков до нескольких кг/ч с удельными энергозатратами порядка нескольких кВт·ч/кг. Таким образом, ОЭИД гранул из проводящего материала в диэлектрической жидкости является производительным и энергоэффективным способом получения тонкодисперсных порошков с уникальными функциональными свойствами, морфологией и распределением по дисперсности [1-4]. В его основе лежит эффект пространственной концентрации электрической мощности при разряде конденсаторной батареи на межэлектродный промежуток, заполненный, как правило, металлическими гранулами, погруженными в воду, жидкие углеводороды и другие диэлектрические жидкости. На множестве контактов между гранулами в течение единичного импульса возникают локальные искировые разряды – зоны фазо-

вого превращения материала гранул и деструкции жидкости, с последующим образованием субмикронного или наноразмерного порошка. Сами импульсы разряда конденсаторной батареи подаются с частотой до нескольких кГц. Этот способ, доведенный до промышленной реализации, ранее по большей части применялся для решения специфических задач, таких как получение порошков из дорогостоящих материалов или небольших партий порошков для использования в электронной, химической промышленности и прочих областях. В настоящее время потребность промышленности в порошковых материалах возросла на несколько порядков, поэтому задача снижения удельных энергозатрат на их производство приобретает все более важное значение. Вопросы синтеза зарядных цепей с учетом остаточных напряжений на емкости подробно описаны в работе [5]. Поэтому, не останавливаясь на качестве получаемого порошка, производительности синтеза и энергоэффективности электроискровых процессов диспергирования – характеристиках, высокие показатели которых для способа ОЭИД доказаны, рассмотрим в данной работе задачи повышения энергоэффективности оборудования ОЭИД за счет оптимизации распределения энергии разрядного импульса в элементах разрядной цепи соответствующих устройств.

**Методика эксперимента.** В этой работе для определения коэффициентов и оценки справедливости эмпирических зависимостей использовались экспериментальные результаты, часть из которых была приведена в работах [6, 7]. Для дополнения и проверки этих результатов проведена новая серия экспериментов по общей методике, изложенной в [7]. Результаты были дополнены данными эксперимента по формированию электроискрового разряда на двухконтактной модели – модели элементарной цепочки гранул. Принцип и конструктивное исполнение модели элементарной цепочки подробно описаны в работе [8], а полученные ранее на модели данные обобщены для экспериментов с алюминиевыми гранулами. Модель одного контакта между двумя гранулами не применяется, так как для ее конструктивной реализации еще не решены вопросы точного воспроизведения (от разряда к разряду) и контроля механической плотности контакта.

Коротко суть экспериментальной методики сводится к следующему. Бумажно-плёночный конденсатор с емкостью, которую выбирают из диапазона практически применяемых в действующих установках ОЭИД (от единиц до сотен мкФ), заряжают от источника постоянного тока до определенного уровня напряжения. Этот уровень для применяемых на практике параметров и размеров гранулированного слоя составляет сотни вольт. Для моделей уровень зарядного напряжения может быть пересчитан. Существует несколько близких по сути принципов и методик пересчета, на чем мы остановимся в ходе изложения результатов. Далее заряженный конденсатор посредством тиристорного коммутатора разряжают на электроды модельной разрядной камеры, между которыми расположены металлические гранулы (гранула), по-

груженные в жидкость (рис. 1). Диаметр гранул (или скругление электродов на модели), параметры и геометрию слоя также выбирают из условий соответствия практически применяемым в действующих установках с одним дополнительным условием. Условие состоит в том, чтобы гидродинамические возмущения за время токовой стадии разряда не могли распространиться до ближайшего контактного узла, чтобы исключить дополнительный возмещающий фактор. Сигналы с датчиков (шунт тока и делитель напряжения) поступают на запоминающий осциллограф, который синхронизируется по моменту подачи управляющего импульса на тиристор.

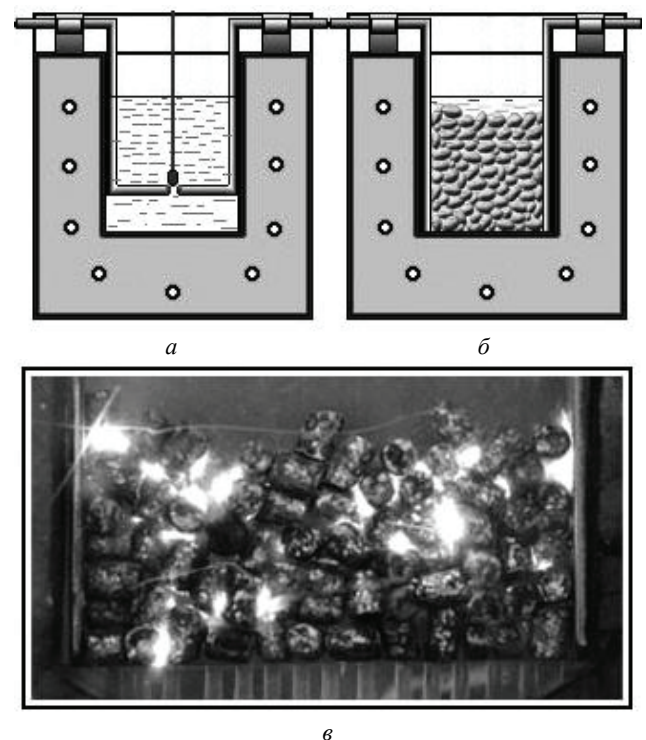


Рисунок 1 – Конструкция двухконтактной (а) и двумерной модели (б) реактора ОЭИД, фотография разрядов в прозрачной ячейке (в)

Анализируемые в этой работе экспериментальные результаты были получены при  $C = 50; 100$  мкФ и  $L = 2$  мкГн:

– для двухконтактной модели:  $d_{zp} = 6$  мм, материал – алюминий и сталь (новые экспериментальные данные);

– для двумерного слоя:  $d_{zp} = 6$  мм,  $l = 60$  мм,  $h \leq 60$  мм; материал – алюминий и сталь (экспериментальные данные были дополнены).

Зарядные напряжения – от минимальных для формирования разряда при данных условиях до 1,5 кВ. Более высокие напряжения по условиям работы полупроводниковых коммутаторов, как правило, не применяют.

**Обсуждение результатов.** Ранее была установлена эмпирическая зависимость, связывающая значения амплитуд разрядных токов с зарядным напряжением накопительного конденсатора и его емкостью, а также с индуктивностью разрядной цепи (варьируе-

мые параметры) [9]. Показана ее применимость для двумерных моделей технологического аппарата диспергирования с малым количеством сферических (алюминиевых) гранул (до 4x4 гранулы).

Для подтверждения ее применимости при диспергировании материалов, существенно отличающихся своими теплофизическими характеристиками и плотностью от алюминия, на модели элементарной цепочки и двумерного слоя с количеством гранул, соответствующим количеству гранул в плоском сечении промышленного реактора ОЭИД, была проведена серия дополнительных экспериментов. Помимо применимости зависимости важной задачей является обоснование и уточнение методики определения коэффициентов зависимости и пояснения их содержания.

Эмпирическая зависимость (1) содержит два коэффициента [9], первый из которых ( $a_1$ ) имеет величину порядка волнового сопротивления разрядной цепи, а второй ( $a_2$ ) – величину порядка зарядного напряжения, как было показано ранее. Величину  $a_2$  определяли по пересечению экстраполированных зависимостей амплитуд разрядного тока от зарядного напряжения ( $U_0$ ) с осью  $U_0$  (отсечка по оси абсцисс). Причем использовались зависимости, полученные для стабильных разрядов при реализации разрядов на элементарной цепочке гранул. Можно предположить, что коэффициенты, которые в работе [9] выбирались постоянными, для различных емкостей конденсаторной батареи, подлежат уточнению, что позволит снизить отклонение расчетных значений амплитуд разрядных токов от зарегистрированных в эксперименте.

$$I_{ma}(U_0, C, L) = \ln \left[ a_1 \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^2} \right] \cdot (U_0 - a_2). \quad (1)$$

В первую очередь рассмотрим элементарную модель – **цепочку из двух последовательных контактов между тремя гранулами** (крайние гранулы являются, собственно, электродами). Далее, по ходу изложения, индуктивность не рассматривается в качестве варьируемого параметра, так как ее значение было фиксировано по величине и соответствовало индуктивности разрядных цепей применяемых технологических устройств диспергирования.

Несложно показать, что изменение емкости приводит к изменению отношения волновых сопротивлений ( $\rho_B$ ) разрядных контуров – обратно пропорционально корню квадратному отношения емкостей. Вместе с тем, как было показано ранее, увеличение/уменьшение емкости конденсаторной батареи приводит к увеличению/уменьшению минимального напряжения формирования стабильной искры в элементарной цепочке гранул. Рассмотрим эту ситуацию, выполнив соответствующие подстановки в эмпирическую зависимость. Примем значение  $a_1 = n\rho_B$  (где для элементарной цепочки число последовательных контактов  $n = 2$ ), а  $a_2$  определим из новых экспериментальных данных (рис. 2, а, в). Для этого выполним регрессионный анализ экспериментальных точек зависимости  $I_{me}(U_0)$ , представив его результат линейными функциями (штриховая линия на рис. 2, а, в),

например

$$\text{для } C = 50 \text{ мкФ: } I_m(U_0) = 5,24 \cdot U_0 - 174;$$

$$\text{для } C = 100 \text{ мкФ: } I_m(U_0) = 5,02 \cdot U_0 - 152.$$

Экстраполировав эти функции, что графически показано на рис. 2 а, в, определим, соответственно, коэффициенты для разных емкостей (в скобках указана емкость в мкФ):  $a_2(50) = 33,0$ ;  $a_2(100) = 30,3$ . Максимальные относительные отклонения регрессионных функций  $I_m(U_0)$  от экспериментальных данных в точках, соответствующих условиям эксперимента, не превышает: для 50 мкФ – 3 %, для 100 мкФ – 9 %, что является удовлетворительным значением указанной величины. Малое отличие  $a_2$  от приведенного в работе [9], где использовались алюминиевые гранулы объясняется тем, что регрессионный анализ и экстраполяция выполнялись по осциллограммам (экспериментальным точкам) стабильных разрядов, где использовалось зарядное напряжение, заведомо превышающее минимальное напряжение формирования искры – напряжение зажигания ( $U_{заж}$ ), а также близкими значениями молярных теплоемкостей используемых материалов. Очевидно, что прямое экспериментальное определение  $a_2$  по  $U_{заж}$  в элементарной цепочке вызовет существенные отличия значений  $a_2$  для разных материалов, связанные с различной электрической прочностью оксидных пленок, различным микрорельефом поверхности и другими факторами. Величина  $U_{заж}$  имеет важное значение при анализе процессов многократного формирования и перераспределения искр в технологическом слое с большим количеством гранул в ходе единичного разряда. Однако на значения амплитуды тока в этом слое существенного влияния не оказывает вследствие самосогласованности объемных интегральных и локальных энергетических процессов в искрящем слое.

Можно допустить, что величина  $a_2$  связана с минимальным напряжением, необходимым для формирования стабильной искры в двух последовательных контактах, т.е. стабильного (повторяется форма кривых и амплитуда разрядного тока) сквозного проводящего канала. Если накопители различной емкости при этом заряжены до уровня энергии, достаточного для формирования стабильной искры, то сама величина емкости принципиального влияния ни на коэффициент  $a_2$ , ни на минимальное напряжение формирования стабильной искры не оказывает. Т.е. можно предположить, что коэффициенты  $a_2$  для различных емкостей по сути своего содержания не отличаются при выполнении обозначенного условия.

В определенных из экспериментальных данных значениях  $a_2(50)$  и  $a_2(100)$  присутствуют незначительные расхождения, которые для различных емкостей могут объясняться неустраняемыми техническими трудностями воспроизведения всех прочих равных условий в экспериментах с различными емкостями, т.е. реальные конденсаторы на 50 и 100 мкФ имеют ряд дополнительных расходящихся параметров. Усредним коэффициент  $a_2$  и проверим отклонения эмпирической зависимости амплитуд (1) от экспериментальных значений в точках и в среднем по всему массиву. Как видно из табл. 1 подстановка усредненного

коэффициента  $a_2 = 31,65$  в эмпирическое выражение (рис. 1, а, в, сплошная линия) дает среднее отклонение по экспериментальным массивам данных ( $\delta_{\text{ср}}$ ) не превышающее: для 50 мкФ – 10,5 %, для 100 мкФ – 5,2 %. При этом в экспериментальных точках для обеих ем-

костей отклонение ( $\delta$ ) не превышает 12 %. Если же использовать в зависимости (1) значения  $a_2(50)$  и  $a_2(100)$  – отклонение в экспериментальных точках может достигать 14 % (табл. 1), а среднее – 12,5 % и 6 %, соответственно.

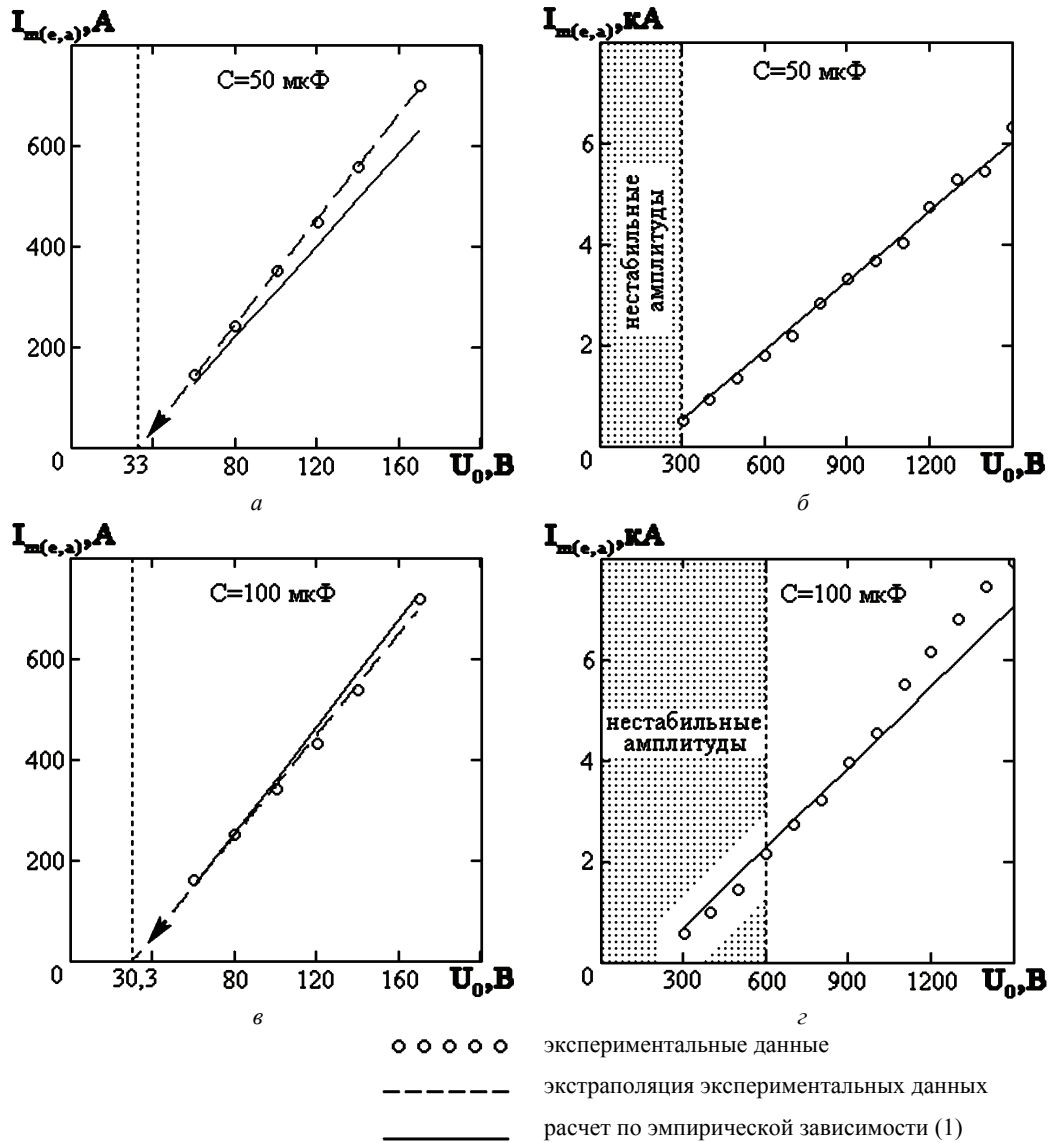


Рисунок 2 – Зависимости амплитуд разрядных токов от зарядного напряжения для двухконтактной модели (а, в) и двумерного слоя гранул (б, з)

Рассмотрим ситуацию с **прямоугольным слоем гранул**, где между электродами по одной кратчайшей линии расположены минимум 10 гранул и, соответственно, сформированы минимум 11 контактов. Не выполняя предварительного экспериментального определения коэффициентов  $a_1'$  и  $a_2'$  (коэффициенты со штрихом соответствуют слою гранул  $10 \times 10$ , без штриха – двухконтактной элементарной модели) рассмотрим гипотезу объясняющую их содержание. Так, допустим, что в прямоугольном **плоском** слое увеличение числа последовательных контактов между гранулами от электрода до электрода и соответственное увеличение значения импеданса одной замыкающей цепочки искрящих контактов компенсируется сниже-

нием общего сопротивления слоя на токовой стадии за счет формирования параллельных искрящих ветвей количеством, приблизительно равным числу последовательных искрящих контактов. Таким образом, соотношение между эквивалентным интегральным сопротивлением слоя в ходе разряда и волновым сопротивлением разрядной цепи измениться незначительно [6,7] если энергии запасенной в конденсаторной батарее достаточно для формирования необходимого количества искрений в параллельных ветвях тока. Т.е. запасенной энергии должно быть достаточно для формирования  $n \times n$  локальных искровых каналов, где  $n$  – условное число последовательных контактов между гранулами от электрода до электрода. Как правило,

это условие выполняется, т.к. увеличение числа последовательных контактов обеспечивается соответствующим увеличением зарядного напряжения конденсаторной батареи, а ее запасенная энергия пропорцио-

нальна квадрату этого напряжения ( $n \times n$ ). Поэтому можем принять значение  $a_1'$  таким же как для элементарной цепочки гранул.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений амплитуд разрядных токов (двухконтактная модель)

	$U_0, \text{В}$	$I_{me}, \text{А}$	$I_{ma}, \text{А}$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$	$I_{ma}, \text{А}$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$
			$a_2(50)=33,0$			$a_2(cp)=31,65$		
$C_1=50\text{мкФ}$	60	144	124	13,9	12,5	130	9,9	10,5
	80	243	215	11,5		221	8,9	
	100	351	307	12,6		313	10,8	
	120	450	398	11,5		404	10,1	
	140	558	490	12,2		496	11,1	
	170	720	627	12,9		633	12,0	
$C_2=100\text{мкФ}$	$a_2(100)=30,3$			2,9	6,0	$a_2(cp)=31,65$		
	60	162	157	4,5		150	7,3	5,2
	80	252	263	8,0		256	1,7	
	100	342	369	10,0		362	5,9	
	120	432	475	7,6		468	8,4	
	140	540	581	2,8		574	6,3	
	170	720	740			733	1,8	

Несколько иная ситуация с коэффициентом  $a_2'$ . Ранее показано, что он имеет величину порядка зарядного напряжения. Поскольку, как мы допустили ранее, величина  $a_2$  связана с минимальным напряжением необходимым для формирования одной сквозной стабильной цепочки искрящих контактов между двумя электродами, проверим эту гипотезу. В элементарной цепочке, по определению, таких контактов два. При загрузке гранул в нужном количестве для обеспечения параметров слоя (в нашем случае  $10 \times 10$  гранул) происходит ограниченно контролируемая их упаковка. В реальных технологических аппаратах диспергирования, где не используются идеально сферические гранулы, а перекомпоновка (перекомпактирование) слоя происходит постоянно после каждого разряда, расположение гранул носит стохастический характер, поэтому задача идеальной упаковки гранул в слой в работе не ставилась. Как видно из фотографии ячейки с искрящим слоем (рис. 1), в одной кратчайшей цепочке искрений между электродами может находиться более 10 гранул (более 11 искрящих контактов). В принципе, возможны две крайние ситуации, когда промежуток замыкают 10 гранул при наличии между ними контакта (11 контактов между электродами) и когда промежуток замыкают 19 гранул (20 контактов между электродами). Второй вариант в двумерном и трехмерном технологическом слое практически нереализуем, всегда найдется одна кратчайшая цепочка с меньшим количеством контактов. Поэтому если считать оценку минимального количества контактов между электродами, приведенную в работе [10] достоверной, для определения  $a_2'$  достаточно масштабировать значение  $a_2$ , связанное с пробоем двух контактных промежутков на ситуацию с  $n'$  контактными промежутками, где в общем случае  $n'$  определяется как

$$n' = \left( \frac{l}{d_{zp}} + 1 \right); \quad (2)$$

где  $l$  – длина промежутка между электродами;  $d_{zp}$  – характерный диаметр гранулы.

Тогда путем масштабирования, из данных полученных для элементарной цепочки,  $a_2'$  можно вычислить из выражения

$$a_2' = a_2 \cdot \frac{n'}{2}. \quad (3)$$

Вернемся к сравнению экспериментальных значений амплитуд разрядных токов в слое с расчетными значениями, полученными из выражения (1) с подстановкой  $a_2'$  по (3), а  $a_1' = a_1$ . Визуально, результаты сравнения можно оценить из рис. 2, б, з, количественно – из табл. 2.

Отклонения расчетных значений амплитуд разрядных токов, где коэффициенты определялись на основании предложенной методики, от экспериментальных не превышают в точках 15 % по обеим емкостям, в среднем по массиву данных для 50 мкФ – не более 6 %, для 100 мкФ – 8 %, что является хорошим результатом и подтверждает применимость эмпирической зависимости (1), по меньшей мере, для двумерного слоя с количеством гранул между электродами и по высоте слоя, соответствующим технологическим реакторам диспергирования.

Рассмотрим условия оптимальной энергоэффективности в разрядной цепи, критерием которой выберем экстремум (выпуклая кривая) на отношении выделившейся в межэлектродном промежутке энергии к запасенной. Ранее в работе (8) было показано, что для элементарной цепочки из алюминиевых гранул таким условием является приближенное равенство волнового сопротивления разрядной цепи и интегрального эквивалентного сопротивления межэлектродного промежутка в процессе электрического разряда. Это же условие, как следует из рис. 3, выполняется и для разряда в элементарной цепочке стальных гранул и для разряда в двумерном слое с большим ( $10 \times 10$ ) количеством гранул при разных емкостях накопителя. Но  $R_3$  – величина, рассчитанная на основе экспериментальных данных, что не позволяет прямо и предельно определить условия согласования искровой нагрузки. Вместе с тем в данной работе мы пока-

зали возможность определения амплитуд разрядных токов расчетным путем на основании эмпирической зависимости для широкого класса технологических задач (материал гранул, параметры слоя, диапазоны по  $U_0$  и  $C$  и т.д.). Известен типовой вид кривых динамических зависимостей сопротивления разрядного промежутка (от времени) [6,10], это U – образные зависимости с выраженным горизонтальным участком, причем значения  $R_3$  коррелируют с уровнем горизонтального участка на динамических зависимостях сопротивления. С другой стороны, динамические зависимости разрядного тока [7] имеют, как правило, куполообразную форму, где фронт несколько короче, чем спад импульса и имеет слабо выраженный перегиб, соответствующий замыканию межэлектродного промежутка сквозной цепочкой искрящих контактов. Тем не менее, как было показано в работе [11], временную зависимость разрядного тока с достаточной степенью точности (для решения задач не связанных с этапом формирования разряда, а связанных с активной токовой стадией разряда) можно представить синусоидальной функцией (4). Таким образом, определение условий согласования может сводиться к численному либо аналитическому решению уравнения

разрядной цепи (5) относительно сопротивления разрядного промежутка, где ток выражен указанной зависимостью с последующим интегрированием  $R(t)$  для определения  $R_3$ . Однако в этом случае неопределенными будут начальные условия.

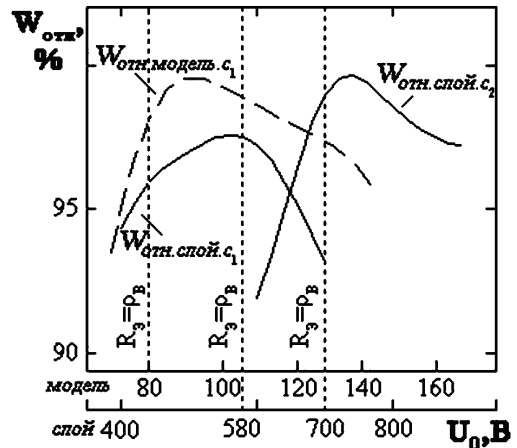


Рисунок 3 – Зависимость отношения выделившейся в межэлектродном промежутке энергии к запасенной от зарядных напряжений

Таблица 2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений амплитуд разрядных токов (слой)

	$U_0, B$	$I_{me}, A$	$I_{ma}, A$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$
			$a_2(cp)=31,65$		
$C_1=50\text{мкФ}$	300	504	576	14,4	5,5
	400	936	1034	10,5	
	500	1350	1492	10,5	
	600	1800	1950	8,3	
	700	2205	2408	9,2	
	800	2835	2866	1,1	
	900	3330	3323	0,2	
	1000	3690	3781	2,5	
	1100	4048	4239	4,7	
	1200	4752	4697	1,2	
	1300	5280	5155	2,4	
	1400	5456	5613	2,9	
1500	6336	6070	4,2		
$C_2=100\text{мкФ}$	600	2160	2257	4,5	7,4
	700	2754	2786	1,2	
	800	3240	3316	2,4	
	900	3969	3846	3,1	
	1000	4536	4376	3,5	
	1100	5508	4906	10,9	
	1200	6156	5436	11,7	
	1300	6804	5965	12,3	
1400	7452	6495	12,8		
1500	7938	7025	11,5		

Для вычисления  $R_3$  на основании экспериментальных данных используем зависимость (6), в числителе которой находится выделившаяся в ходе разряда в межэлектродном промежутке энергия. Оптимизация режима обработки по распределению энергии в элементах разрядной цепи предполагает ситуацию, когда доля выделившейся в межэлектродном промежутке энергии будет максимально возможной. В идеальном случае условно можем принять это значение равным запасенной в конденсаторной батарее энергии (достижимый на практике уровень – порядка 90 %). Тогда

выполнив подстановку запасенной в конденсаторе энергии в выражение (6), а также значение разрядного тока из выражения (4) определим зависимость эквивалентного интегрального сопротивления от основных параметров разрядной цепи (7).

Выполнив подстановку пределов интегрирования в (7) и приравняв предложенную зависимость к значению волнового сопротивления разрядной цепи, получим однозначно определенную взаимосвязь  $U_0, C, L$  (8), которая и будет являться условием оптимизации по экстремуму выделившейся в искровой нагрузке энер-

гии. Его проверка приводит к совпадению для выбранных  $C$  и  $L$  расчетного значения  $U_0$  и практического (экспериментального), которые с высокой степенью точности соответствуют экстремуму  $W/W_0$ .

$$i(t) = \ln \left( a_1 \cdot \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot (U_0 - a_2) \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad (4)$$

$$\frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R(t) \cdot i(t) = U_0; \quad (5)$$

$$R_3 = \frac{\int_0^{\tau} i(t) \cdot U(t) dt}{\int_0^{\tau} i^2(t) dt}; \quad (6)$$

$$R_3(U_0, C, L) \approx \frac{W_0}{\int_0^{\tau} i^2(t) \cdot dt} = \frac{C \cdot U_0^2}{2 \cdot I_{ma}^2} \cdot \frac{1}{\int_0^{\tau} \sin^2(\omega \cdot t) \cdot dt} =$$

$$= \frac{C \cdot U_0^2}{2 \cdot \left( \ln \left( a_1 \cdot \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot (U_0 - a_2) \right)^2} \times$$

$$\times \frac{1}{\left( -\frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot t \right) \Big|_0^{\tau}}, \quad (7)$$

где примем  $\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R_3^2}{4 \cdot L^2}} \approx 1/\sqrt{LC}$ ;

$\tau \approx \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ , т.к. значения угловой частоты в рассматриваемом диапазоне входящих в соответствующее выражение величин для затухающих и свободных колебаний отличается практически на порядок.

$$\frac{U_0^2}{(\ln(2 \cdot C) \cdot (U_0 - a_2))^2 \cdot \pi} = \rho_B^2 = \left( \sqrt{\frac{L}{C}} \right)^2. \quad (8)$$

Таким образом, методика оптимизации режима обработки для действующей установки сводится к следующему (вариант). Допустим, имеется реактор диспергирования с известными геометрическими параметрами и материал – металлические гранулы с известным характерным диаметром. Индуктивность, как правило, является фиксированным параметром, установленным на минимально технически реализуемом уровне (~2 мкГн). В генераторе импульсов реализована возможность варьирования зарядного напряжения и емкости конденсаторной батареи в практически применяемых пределах. Последовательность выбора оптимальных параметров для обработки:

– по (2) вычисляется  $n'$ , а по (3) –  $a_2'$ . При этом для обработки стальных и алюминиевых гранул можно воспользоваться значением  $a_2$ , приведенным в данной работе. Для металлических материалов с близкими к обозначенным молярными теплоемкостями, значение  $a_2$  не должно существенно отличаться от приведенного. Для различных металлов целесообразно про-

вести серию несложных экспериментов на модели элементарной цепочки и подготовить таблицу значений коэффициентов;

– в зависимости от характерного диаметра гранул, исходя из условия отсутствия гидродинамического взаимодействия активизированных контактов [11]

$$r_0 + 0,5\pi \cdot v_{ВОЗМ} (LC)^{1/2} / d_0 \geq 1; \quad (9)$$

где  $r_0$  – начальный радиус канала;  $v_{ВОЗМ}$  – скорость распространения гидродинамического возмущения в жидкой среде;  $d_0$  – диаметр гранул; из диапазона практически применяемых емкостей задается емкость конденсаторной батареи  $C$ .

– на основании (8) вычисляется необходимое значение зарядного напряжения и проверяется на соответствие достаточному условию по обеспечению стабильной искры на паре контактов [11] для данной емкости с использованием предложенного подхода к масштабированию.

**Выводы.** В работе предложена методика определения начальных условий реализации разряда в гранулированном слое для оптимизации распределения энергии в элементах разрядной цепи установок ОЭИД. Проведена экспериментальная проверка расчетных выражений для оценки амплитуд разрядных токов при реализации разряда в реакторе с большим количеством металлических гранул, показаны способы определения эмпирических коэффициентов и предложен способ масштабирования их значений для различных геометрических характеристик реактора и гранул.

#### Список литературы

1. Асанов У. А. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов / У. А. Асанов, А. Д. Цой, А. А. Щерба [и др.]. – Фрунзе: Илим, 1990. – 256 с.
2. Левченко В. Ф. Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов / В. Ф. Левченко // Проблемы машиностроения. – 1992. – № 38. – С. 78–86.
3. Berkowitz A. E. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion / A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker [et.al] // J. Magn. Magn. Mater. – 2003. – № 1. – С. 254–255.
4. Carrey J. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters / J. Carrey, H. B. Radousky, A. E. Berkowitz // Journal of Applied Physics. – 2004. – Т. 95, № 3. – С. 823–829.
5. Щерба А. А. Закономерности изменения потерь энергии в RL-цепях, соединяющих конденсаторы, заряженные до разных напряжений / А. А. Щерба, Н. И. Супруновская // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 3–6.
6. Петриченко С. В. Сравнение электрических характеристик искровых разрядов в слое металлических и графитовых гранул, погруженных в жидкость / С. В. Петриченко, Н. И. Кускова, Д. И. Листовский // Электронная обработка материалов. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 38–43.
7. Петриченко С. В. Стабилизация разрядных импульсов и особенности согласования искровой нагрузки при электроэрозионном диспергировании металлических и графитовых гранул в жидкости / С. В. Петриченко, Н. И. Кускова, Д. И. Листовский // Электронная обработка материалов. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 8–13.
8. Петриченко С. В. Регулирование эффективного объема разрядной плазмы при контактном электроискровом процессе в жидкости / С. В. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3. – С. 4–10.

9. Щерба А. А. Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости / А. А. Щерба, С. В. Петриченко // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 3. – С. 27–32.

10. Щерба А. А. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, С. Н. Захарченко // Праці ІЕД НАНУ. Електротехніка'2001. – 2001. – С. 3–17.

11. Петриченко С. В. Підвищення продуктивності і стабілізація режимів об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині / С. В. Петриченко // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Техніка і електрофізика високих напруг: сб. научн. трудов. – 2010. – № 18. – С. 139–148.

#### References (transliterated)

1. Asanov U. A., Coj A. D., Shherba A. A., Kazekin V. I. Jelektrojerozionnaja tehnologija soedinenij i poroshkov metallov [Electroerosive technology of compounds and powders of metals]. Frunze, Ilim Publ., 1990. 256 p.

2. Levchenko V. F. Jelektroiimpul'snyj metod kompleksnoj pererabotki materialov [Electropulse method for complex processing of materials]. Problemy mashinostroenija [Mechanical engineering problems]. 1992, no. 38, pp. 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. Mater. 2003, no. 1, pp. 254–255.

4. Carrey J., Radousky H. B., Berkowitz A. E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters. Journal of Applied Physics. 2004, vol. 95, no. 3, pp. 823–829.

5. Shherba A. A., Suprunovskaja N. I. Zakonomernosti izmenenija poter' jenerгии v RL-cerjajah, soedinjajushhikh kondensatory, zarjzhennye do raznyh naprjazhenij [Regularities of change of losses of energy in the RL-circuits connecting the capacitors charged up to the various voltage]. Tehnichna elektrodinamika, 2015, no. 6, pp. 3–6.

6. Petrichenko S. V., Kuskova N. I., Listovskij D. I. Sravnenie jelektricheskikh harakteristik iskrovyyh razrjadov v sloe metallicheskih i grafitovyh granul, pogruzhennyh v zhidkost'

[Comparison of the electrical characteristics of spark discharges in a layer of metal and graphite granules immersed in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 38–43.

7. Petrichenko S. V., Listovskij D. I., Kuskova N. I. Stabilizacija razrjadnyh impul'sov i osobennosti soglasovanija iskrovoj nagruzki pri jelektrojerozionnom dispergirovanii metallicheskih i grafitovyh granul v zhidkosti [Stabilization of discharge pulses and peculiarities of spark load matching at electroerosive dispersion of metal and graphite granules in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 8–13.

8. Petrichenko S. V. Regulirovanie jeffektivnogo ob'ema razrjadnoj plazmy pri kontaktnom jelektroiiskrovom processe v zhidkosti [Regulation of the effective volume of the discharge-plasma in contact electrospark process in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2008, no. 3, pp. 4–10.

9. Shherba A. A., Petrichenko S. V. Fizicheskoe modelirovanie i analiz dinamiki iskroplazmennyyh processov pri jelektrojerozionnom dispergirovanii tokoprovodjashhikh granul v zhidkosti [Physical modeling and the analysis of dynamics of spark-plasma processes at the electroerosive dispersion of conducting granules in liquid]. Tehnichna elektrodinamika. 2004, no. 3, pp. 27–32.

10. Shherba A. A., Podol'cev A. D., Zaharchenko S. N. Regulirovanie dinamicheskikh parametrov tehnologicheskikh sistem ob'emnoj jelektroiiskrovoy obrabotki geterogennyh tokoprovodjashhikh sred [Regulation of dynamic parameters of technological systems of volume electrospark processing of heterogeneous conducting environments]. Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrainy. Elektrotekhnika'2001 [Proc. of the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Electrical Engineering'2001]. pp. 3–17.

11. Petrychenko S. V. Pidvyshchennya produktyvnosti i stabilizatsiya rezhymiv ob'yemnoho elektroiskrovoho dysperhuvannya strumoprovodnykh hranul u ridyni [Increase of productivity and stabilization of regimes of volume electric dispersion of conductive granules in the liquid]. Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Tehnika i jelektrofizika vysokikh naprjazhenij [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technics and electrophysics of high voltage]. Kharkiv, 2010, no. 18, pp. 139–148.

Поступила (received) 09.08.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація режимів електроіскрового диспергування металевих гранул з розподілу енергії, що виділилася в елементах розрядного контуру / Д. І. Листовський, С. В. Петриченко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Оптимизация режимов электроискрового диспергирования металлических гранул по распределению энергии выделившейся в элементах разрядной цепи / Д. И. Листовский, С. В. Петриченко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Electrospark dispersion of metal granules regimes' optimization on distribution of energy released in discharge circuit elements / D. I. Listovskii, S. V. Petrichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Листовський Дмитро Ігорович – аспірант Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Листовський Дмитрій Ігорович – аспірант Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Listovskii Dmitriy Igorevich – Postgraduate Student, Institute of Pulses Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Director of the Institute of Pulses Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.