

PACS numbers: 52.80.Wq, 62.23.St, 81.07.Bc, 81.07.Wx, 81.20-n, 83.50.Uv, 83.85.-c

## **Электроискровое диспергирование металлических материалов. I. Влияние скорости потока рабочей жидкости на дисперсность порошков**

С. Н. Захарченко, А. Е. Перекоз<sup>\*</sup>, Н. А. Шидловская, А. И. Устинов<sup>\*\*</sup>,  
О. Ф. Бойцов<sup>\*</sup>, В. З. Войнаш<sup>\*</sup>

*Институт электродинамики НАН Украины,  
просп. Победы, 56,  
03057 Киев, Украина*

*<sup>\*</sup>Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03142 Киев, Украина*

*<sup>\*\*</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
ул. Казимира Малевича, 11,  
03150 Киев, Украина*

С использованием методов оптической гранулометрии изучено влияние скорости ламинарного потока этилового спирта на распределение по размерам частиц высокоуглеродистой стали, полученных в нём методом объёмного электроискрового диспергирования исходных гранул. Обнаружены и объяснены тенденции уменьшения среднего размера и дисперсии распределения по размерам искроэрозионных частиц. Показано, что основное влияние на размер эрозионных частиц крупной фракции оказывают условия их образования, а мелкой — условия их нахождения в дис-

Corresponding author: Serhiy Mykolayovich Zakharchenko  
E-mail: snzakhar@ukr.net

*Institute of Electrodynamics, N.A.S. of Ukraine,  
56 Peremohy Ave., UA-03057 Kyiv, Ukraine*

*<sup>\*</sup>G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

*<sup>\*\*</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,  
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. M. Zakharchenko, A. O. Perekos, N. A. Shidlovska, A. I. Ustinov, O. F. Boytsov, and V. Z. Voynash, Electrospark Dispersion of Metal Materials. I. Influence of Velocity of Flow of Operating Fluid on Dispersity of Powders, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 3: 339–357 (2018) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.40.03.0339.

персионной среде. Объяснено явление скачкообразного увеличения доли мелкой фракции эрозивных частиц при увеличении скорости потока рабочей жидкости.

**Ключевые слова:** электроискровое диспергирование металлов, высокодисперсные частицы, оптическая гранулометрия.

З використанням метод оптичної гранулометрії вивчено вплив швидкості ламінарного потоку етилового спирту на розподіл за розмірами частинок високовуглецевої сталі, одержаних у ньому методом об'ємного електроіскряного диспергування вхідних гранул. Виявлено та пояснено тенденції зменшення середнього розміру та дисперсії розподілу за розмірами іскроерозійних частинок. Показано, що основний вплив на розмір ерозійних частинок крупної фракції чинять умови їх утворення, а дрібної — умови їх знаходження в дисперсійному середовищі. Пояснено явище стрибкоподібного збільшення частки дрібної фракції ерозійних частинок при збільшенні швидкості потоку робочої рідини.

**Ключові слова:** електроіскряне диспергування металів, високодисперсні частинки, оптична гранулометрія.

The high-carbon steel particles obtained by electrospark dispergation of initial granules in ethanol are investigated. The influence of velocity of ethanol laminar flow on particle-size distribution is studied by means of the optical-granulometry method. The tendency towards to decrease of average size of spark-erosion particles is revealed and explained. As shown, the conditions of a particle formation from large fraction have basic influence on particle size, and sizes of particles from small fraction depend on conditions of particles being in dispersion medium. The effect of intermittent increase of small-fraction part under increase of velocity of the working-fluid flow is explained.

**Key words:** electrospark dispergation of metals, superfine particles, optical granulometry.

*(Получено 6 ноября 2017 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди известных на сегодняшний день методов получения микро- и нанодисперсных порошков токопроводящих материалов [1, 2] электроискровое диспергирование (ЭИД) является одним из самых эффективных и универсальных [3–6]. Данный метод позволяет получать в промышленных масштабах [4, 6] не только порошки металлов и их химических соединений [7], но и многокомпонентных сплавов без существенного изменения их химического состава [4, 6–12], а также полупроводников [13].

Высокие (до  $10^4$  К) значения температур в искровом канале позволяют сравнительно просто получать порошки тугоплавких,

сверхтвёрдых, сверхпрочных, жаростойких, многокомпонентных, вязких и других сплавов, получение которых другими методами крайне затруднительно. Большие (порядка  $10^8$  К/с) скорости охлаждения эрозионных частиц в парогазовой рубашке рабочей жидкости позволяют изменять их структурное состояние от кристаллического до аморфного регулированием параметров процесса [3, 14, 15]. В зависимости от энергии и длительности разрядных импульсов, а также от физических параметров диспергируемых материалов и рабочих жидкостей, размеры эрозионных частиц могут варьироваться от десятков нанометров до сотен микрометров [3, 5, 9, 11, 16–18].

На сегодняшний день существуют два наиболее часто применяемых варианта реализации метода ЭИД: одноканальный [5] и многоканальный [3, 8, 11]. Первый вариант позволяет непосредственно контролировать напряжение на разрядном промежутке и его ток, что существенно снижает дисперсию распределения искроэрозионных частиц по размерам. В многоканальном варианте существует возможность контроля данных параметров лишь на всем слое гранул металла или сплава, т.е. на большом числе одновременно существующих искровых каналов, параметры каждого из которых контролю не подлежат. Это приводит к увеличению дисперсии распределения искроэрозионных частиц по размерам, но позволяет на 2–3 порядка увеличить производительность метода [3, 11, 19].

Исследованию влияния параметров разрядных импульсов и химического состава рабочих жидкостей на распределение по размерам, морфологию и структурно-фазовое состояние искроэрозионных частиц различных металлов и сплавов посвящено значительное количество работ [6, 8, 9, 11, 15, 16], однако влияние на свойства искроэрозионных частиц скорости протока и температуры рабочих жидкостей практически не отражено в литературе. Целью данной работы является исследование влияния скорости протока рабочей жидкости на распределение по дисперсности искроэрозионных частиц.

## **2. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Эксперименты проводились на лабораторном оборудовании, упрощённая функциональная схема которого представлена на рис. 1. Для диспергирования использовалась стальная литая дробь квазисферической формы, средний радиус которой  $r$  составлял 1,6 мм. Перед экспериментами поверхность дроби прошла предварительную искроэрозионную обработку, что необходимо для повышения стабильности и воспроизводимости параметров процесса её диспергирования [20, 21]. Дробь размещалась в разрядной камере (РК), которая имела форму прямоугольного параллелепипеда. Электроды в ней располагались вертикально (рис. 1). Расстояние между

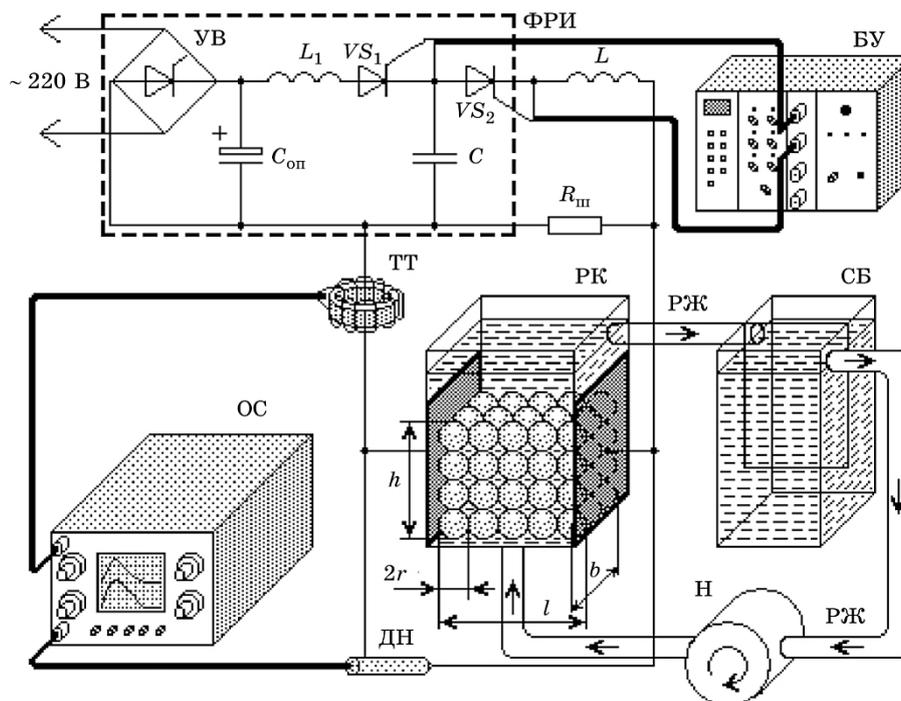


Рис. 1. Функциональная схема установки ЭИД.

Fig. 1. Functional flow diagram of the experimental setup.

электродами  $l$  составляло 56 мм, а ширина камеры  $b = 60$  мм. Средняя высота  $h$  слоя дроби в РК была 17 мм.

В качестве рабочей жидкости (РЖ) использовался 95% технический этиловый спирт при комнатной температуре ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). С помощью центробежного насоса (Н), приводимого в движение коллекторным двигателем постоянного тока, объемная скорость её потока  $\Theta$  регулировалась в диапазоне от 0 до 41 мл/с. Рабочая жидкость циркулировала по замкнутому контуру: РК–седиментационный бак (СБ)–ротаметр–Н–РК (рис. 1). Подавляющее число эрозионных частиц оседало в СБ, обеспечивая близкий к постоянному состав взвеси в РК в течение всего времени проведения экспериментов. После завершения экспериментов при одном значении скорости потока РЖ, последняя сливалась и заменялась новой. Пробы РЖ с содержащимися в ней искроэрозионными частицами отбирались из СБ.

От регулируемого тиристорного формирователя разрядных импульсов (ФРИ) импульсы электрической энергии прикладывались к электродам РК (рис. 1), обеспечивая требуемые параметры процесса. В состав ФРИ входил тиристорный управляемый выпрями-

тель (УВ), опорный конденсатор  $C_{\text{оп}}$ , фильтрующий выпрямленное напряжение, зарядный дроссель  $L_1$ , зарядный тиристор  $VS_1$ , рабочий конденсатор  $C = 200$  мкФ и разрядный тиристор  $VS_2$  (рис. 1). ФРИ питался от однофазной сети переменного тока с действующим значением напряжения 220 В. Индуктивность кабелей, соединяющих ФРИ и РК на рис. 1 обозначена  $L$ , которая в ходе экспериментов составляла около 1 мкГн.

По командам блока управления (БУ) зарядный  $VS_1$  и разрядный  $VS_2$  тиристоры поочередно открывались в противофазе, обеспечивая на электродах РК импульсы напряжения  $u(t)$ , которые приводили к протеканию импульсов тока  $i(t)$  в слое дробы. При этом импульсы тока в слое протекали только в те моменты времени, когда зарядный тиристор  $VS_1$  был закрыт, что обезопасило питающую сеть от возникновения в ней импульсов тока амплитудой до 2000 А. Для предотвращения аварийных режимов, которые могут возникнуть во ФРИ при случайном увеличении эквивалентного сопротивления слоя дробы в РК [20] и приводить к нарушению синхронной работы  $VS_1$  и  $VS_2$ , РК была зашунтирована резистором  $R_{\text{ш}}$  сопротивлением 6 Ом (рис. 1). Электромагнитные процессы в тиристорном ФРИ, нагрузкой которого является слой металлических гранул, подробно описаны в [22].

Параметры разрядных импульсов измерялись и контролировались запоминающим двухканальным осциллографом С8-17, который на рис. 1 обозначен ОС. Для измерения напряжения использовался делитель напряжения (ДН) 1:10, а тока — импульсный трансформатор тока (ТТ) (рис. 1), который обеспечивал гальваническую развязку входов осциллографа. В ходе экспериментов стабилизировали напряжение на опорном конденсаторе СОП, частоту повторения разрядных импульсов  $f = 5$  Гц, а также параметры слоя дробы и протока спирта. Во всех экспериментах разряд конденсатора  $C$  был апериодическим. Типичные синхронные осциллограммы напряжения на РК и тока в ней при  $\Theta = 7,76$  мл/с после оцифровки приведены на рис. 2. Во всех экспериментах длительность импульсов тока в РК  $\tau$  составляла около 50 мкс, а амплитуда импульсов напряжения  $U_m$  лежала в пределах от 320 до 390 В.

Распределение искроэрозионных частиц по размерам определяли с помощью оптического микроскопа Neophot-2. Из каждой, отобранной из СБ пробы выбирали по 10 образцов, для которых получали не менее 10 изображений при увеличении оптической системы от 400 до 1000. Величину увеличения выбирали таким образом, чтобы достичь максимального значения числа объектов в поле изображения без потери глубины резкости. Статистическую обработку изображений, полученных в цифровом формате, проводили с помощью стандартной программы анализа изображений материаловедческого комплекса SIAMS.

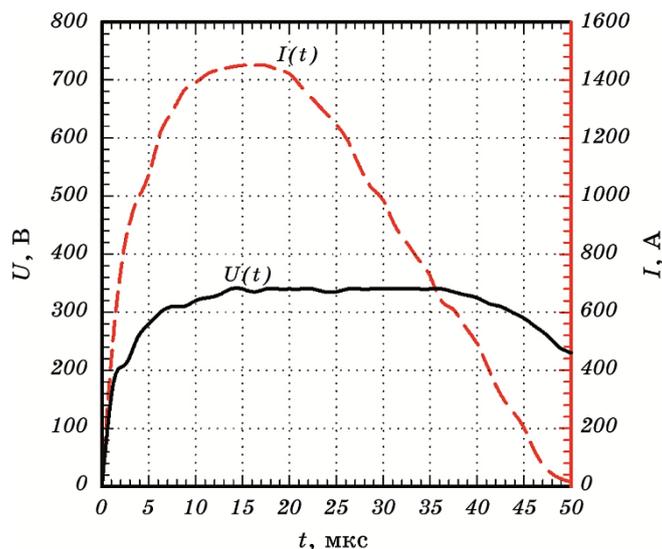


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока.

Fig. 2. Voltage and current oscillograms.

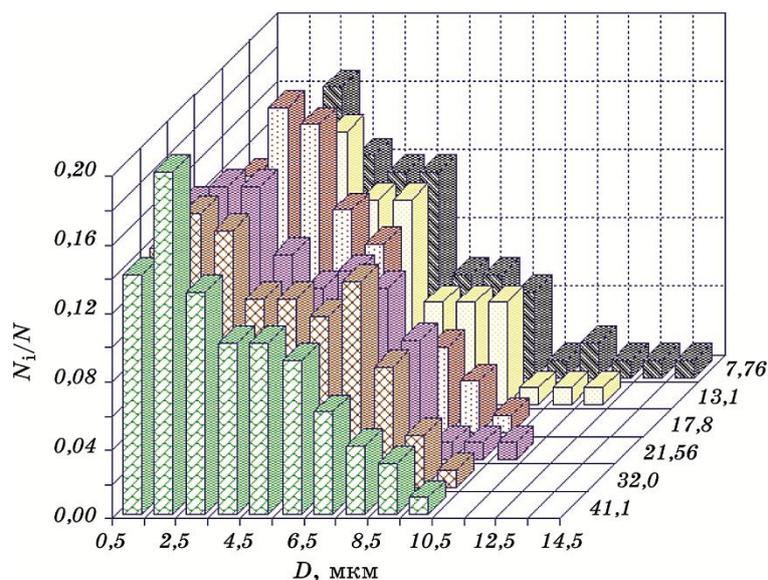
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные согласно описанной выше методике распределения по размерам искроэрозионных частиц для шести различных скоростей протока РЖ  $\Theta$  (от 7,76 до 41,1 мл/с) представлены на рис. 3, а статистические характеристики распределений этих частиц приведены в табл. 1.

Как следует из полученных результатов, увеличение скорости протока РЖ в исследованном диапазоне способствует сужению распределений по размерам искроэрозионных частиц (рис. 3), что численно выражается в уменьшении их дисперсии (табл. 1). При этом средний размер частиц изменяется незначительно, однако наблюдается тенденция его уменьшения.

Зависимости от скорости протока РЖ содержания крупной (выборка от 1 до 10 мкм) и мелкой (до 1 мкм) фракций искроэрозионных частиц представлены на рис. 4, а и б соответственно. Как следует из рис. 4, а, удельный вес выборки от 1 до 10 мкм крупной фракции искроэрозионных частиц экспоненциально уменьшается с ростом скорости протока РЖ, что согласуется с данными рис. 3 и табл. 1.

Увеличение скорости потока РЖ в РК, направленного снизу вверх, уменьшает силу, с которой дробь давит на дно РК, увеличивает подвижность отдельных гранул дробы и среднее расстояние между ними, а также способствует повышению концентрации газовых микропузырей в РЖ, возникающих вследствие кавитации. Это



**Рис. 3.** Распределения по размерам искроэрозионных частиц, полученных при разных значениях скорости потока рабочей жидкости (указаны внизу справа).

**Fig. 3.** Size distributions of spark-erosion particles produced at different working fluid velocities (signed on right beneath).

приводит к увеличению количества плазменных каналов, возникающих в соответствии со следующими механизмами [23]: 1) электрического пробоя жидкости [24]; 2) пробоя газовых микропузырей [25] в объёме жидкости и на поверхности гранул, которые либо находились там изначально, либо возникли в результате разогрева РЖ электрическим током (теплого пробоя) [24] или её электрохимического разложения или кавитации; 3) пробоя тонких окисных плёнок на поверхности гранул [26].

В то же время это приводит к уменьшению количества плазменных каналов, возникающих вследствие электрического взрыва микровыступов на поверхностях соседних гранул, между которыми ранее существовали омические контакты [2, 27]. Последний механизм образования плазменных каналов наиболее энергоёмкий из всех рассмотренных и отличается от других механизмов большим объёмом расплавленного металла из приконтактных зон контактирующих гранул и невозможностью ограничения эволюции плазменных каналов предискровой стадией [23].

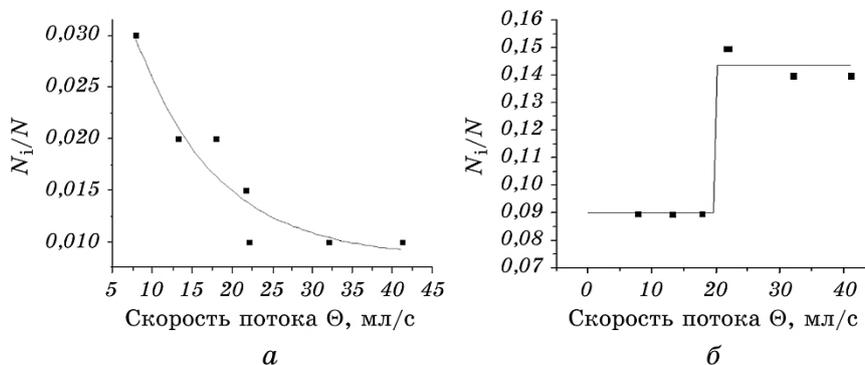
При условии, что из массы расплавленного металла формируется только одна эрозионная частица, её размер будет увеличиваться с ростом энергии, выделяющейся в одном плазменном канале [28].

**ТАБЛИЦА 1.** Статистические характеристики распределений по размерам искроэрозионных частиц, полученных при разных значениях скорости протока рабочей жидкости.**TABLE 1.** Statistic characteristics of distributions of spark-erosion particles produced at different working-liquid velocities.

Скорость протока $\Theta$ , мл/с	0	7	13	18	22	32	40
Общее число частиц в изображениях	1585	1588	2005	1738	2787	1850	3500
Минимальный размер, мкм	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
Максимальный размер, мкм	91	19	11	9	14	13	13
Среднее значение размера, мкм	7	4	5	4	4	3	3
Дисперсия распределения	37	8	6	6	5	5	5

Это справедливо и для случая, в котором из этой массы формируется несколько частиц, число которых не зависит от подведённой в канал энергии. Следовательно, уменьшение количества плазменных каналов, возникающих в соответствии с последним механизмом, например, при увеличении скорости протока РЖ снизу вверх, или любое другое ограничение энергии, подведённой в отдельный плазменный канал [23], будут способствовать снижению доли крупных эрозионных частиц, что и наблюдается на рис. 4, а.

Увеличение среднего расстояния между гранулами и их подвижности, а также снижение доли плазменных каналов, возникающих в соответствии с последним механизмом при увеличении скорости

**Рис. 4.** Зависимости от скорости протока РЖ содержания крупной (выборка от 1 до 10 мкм) (а) и мелкой (до 1 мкм) (б) фракций искроэрозионных частиц.**Fig. 4.** Dependences of percentage of coarse-grain (selected from 1 to 10  $\mu\text{m}$ ) (а) and fine-grain (less 1  $\mu\text{m}$ ) (б) fractions of spark-erosion particles on working-liquid velocity.

протока РЖ, приводят к росту среднего за время импульса сопро-

тивления слоя гранул  $\bar{R} = \int_0^\tau u(t)i(t)dt / \int_0^\tau i^2(t)dt$ , зависимость которо-

го от объёмной скорости потока РЖ приведена на рис. 5. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению энергии электрического импуль-

са  $E = \int_0^\tau u(t)i(t)dt$  (рис. 5) и его средней в течение времени протека-

ния тока мощности  $\bar{P} = \tau^{-1} \int_0^\tau u(t)i(t)dt$ , а также к увеличению ампли-

туды напряжения импульсов на слое гранул  $U_m$  при увеличении скорости потока РЖ, что отражено на рис. 6. Данные явления обусловлены наличием паразитных индуктивности  $L$  и сопротивления соединительных кабелей, а также шунтирующего резистора  $R_{III}$  в выходной цепи ФРИ (рис. 1).

Зависимости рисунков 5 и 6 являются подтверждением рассмотренного выше влияния скорости потока РЖ на механизмы возникновения плазменных каналов, их параметры и эволюцию, которые во многом определяют вид зависимости рис. 4, а.

Оценим влияние скорости потока РЖ на силу, с которой гранулы давят на дно РК. На каждую покоящуюся гранулу плотностью  $\rho_G$  (для высокоуглеродистой стали 7870 кг/м<sup>3</sup>), объёмом  $V_G$  и массой

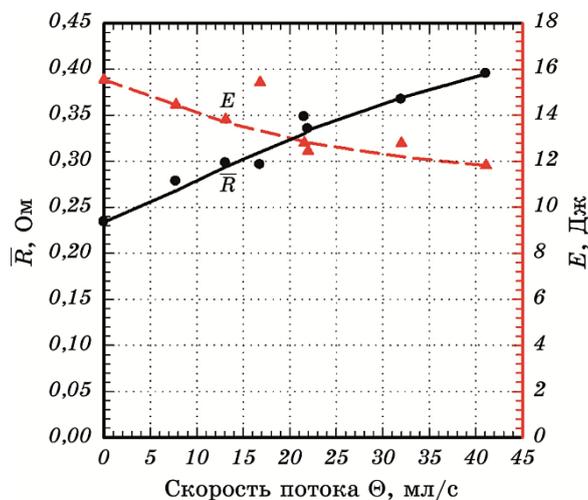
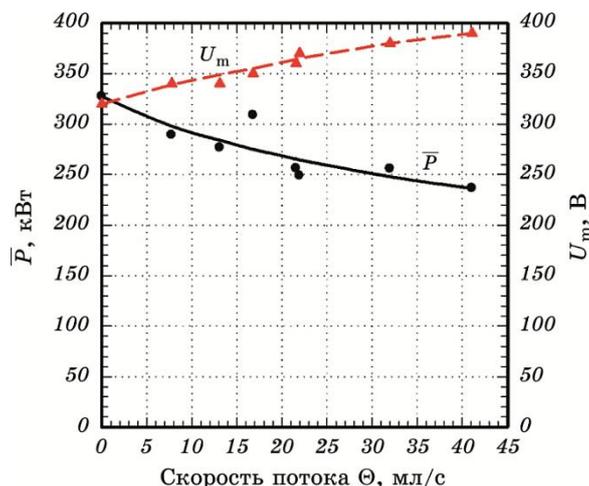


Рис. 5. Зависимость от скорости потока РЖ среднего сопротивления слоя гранул.

Fig. 5. Dependence of average resistance of the layer of granules on average working-liquid velocity.



**Рис. 6.** Зависимости от скорости потока РЖ средней мощности импульса и амплитуды напряжения на слое гранул.

**Fig. 6.** Dependences of average pulse power and average voltage amplitude on the layer of granules on average working-liquid velocity.

$m$ , погруженную в РЖ плотностью  $\rho_F$  ( $804 \text{ кг/м}^3$  для 95% этанола при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ ), в условиях притяжения с ускорением свободного падения  $g$  (на широте г. Киева  $9,81 \text{ м/с}^2$ ) действуют четыре силы: сила тяжести  $F_{T1} = mg$ , сила Архимеда  $F_{A1} = \rho_F V_G g$ , сила давления потока РЖ  $F_{F1}$  и сила реакции опоры  $F_{O1}$ . При этом  $F_{T1}$  направлена вертикально вниз,  $F_{A1}$  — вертикально вверх,  $F_{F1}$  — по направлению потока РЖ (в нашем случае вертикально вверх) и  $F_{O1}$  — вертикально вверх. Тогда проекция на направленную вниз вертикальную ось силы давления на дно РК одной сферической гранулы, объём которой равен  $V_G = (4/3)\pi r^3$ , (равная по модулю, но противоположная по направлению силе реакции опоры) будет

$$F_{P1} = F_{T1} - F_{A1} - F_{F1} = (4/3)\pi r^3(\rho_G - \rho_F)g - F_{F1}. \quad (1)$$

Для нахождения  $F_{F1}$  вначале рассмотрим монослой гранул. Приняв рабочую жидкость несжимаемой, а её движение ламинарным, согласно закону Бернулли [29] найдём избыточное давление, которое создаёт её поток на рассматриваемый слой гранул на высоте  $r$  от дна камеры (в плоскости его наибольшего горизонтального сечения) по сравнению с давлением на уровне дна камеры

$$\Delta p = 0,5\rho_F(v_r^2 - v_0^2) - \rho_F g r, \quad (2)$$

где  $v_0$  и  $v_r$  — линейные скорости движения РЖ на уровне дна РК и

на высоте  $r$  от него соответственно. Поскольку площадь поперечного сечения потока РЖ у дна РК  $S_0$  равна площади её поперечного сечения  $S_C = S_0 = lb$ , то  $v_0 = \Theta/S_0 = \Theta/(lb)$ . При условии, что вдоль каждой из сторон РК  $l$  и  $b$  без зазоров располагается целое число гранул  $n_l = l/(2r)$  и  $n_b = b/(2r)$  соответственно, суммарная площадь горизонтального сечения монослоя сферических гранул на высоте  $r$  от дна РК составит  $S_G = n_l n_b \pi r^2 = lb \pi r^2 / (4r^2) = lb \pi / 4$ . Тогда площадь поперечного сечения потока РЖ на высоте  $r$  от дна РК составит:  $S_r = S_C - S_G = lb - \pi lb / 4 = lb(1 - \pi/4)$ . В этом случае линейная скорость РЖ на высоте  $r$  от дна РК будет  $v_r = \Theta/S_r = \Theta/[lb(1 - \pi/4)]$ .

Ввиду малых (0,0016 м) значений  $r$  статическим давлением  $\rho_F g r$  в (2) можно пренебречь. Тогда с учётом сказанного выше сила давления потока РЖ на весь монослой гранул составит:  $F_F = \Delta p S_G = 0,5 S_G \rho F \Theta^2 \{1/(S_C - S_G)^2 - (1/S_C)^2\}$ . Поскольку монослой содержит  $n_l n_b = lb/(4r^2) = S_C/(4r^2)$  гранул, то для нахождения силы, с которой поток РЖ давит на одну гранулу, полученное выражение  $F_F$  следует разделить на их количество:

$$F_{F1} = 0,5 \pi r^2 \rho_F \Theta^2 [1 - (1 - \pi/4)^2] / [lb(1 - \pi/4)^2]. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) для монослоя сферических, согласно закону Бернулли, гранул имеем

$$F_{P1} = \pi r^2 [4r(\rho_G - \rho_F)]g/3 - 0,5 \rho_F \Theta^2 [1 - (1 - \pi/4)^2] / [lb(1 - \pi/4)^2]. \quad (4)$$

Построенная согласно (4) для монослоя стальных сферических гранул в техническом 95% этаноле зависимость на рис. 7 обозначена  $B_1$ .

Рассмотрим альтернативный вариант нахождения  $F_{F1}$ . На движущийся с линейной скоростью  $v$  в РЖ с коэффициентом вязкости  $\eta$  (0,00119 Па·с для 95% этанола при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ ) гладкий шар в отсутствие турбулентности, согласно закону Стокса [29], действует сила сопротивления жидкости, модуль которой равен

$$F_{F1C} = 6 \pi r v \eta. \quad (5)$$

Будем считать, что максимально возможная скорость  $v = v_r$ . Тогда число Рейнольдса для шара будет  $Re = 2r v_r \rho_F / \eta$ . Подставив соответствующие константы [29], в нашем случае для максимальной скорости потока этанола имеем  $Re \cong 140$ , что меньше 200 — критического значения для шара. Следовательно, поток РЖ можно считать ламинарным, а формулу (5) — применимой в рассматриваемом случае. Подставив (5) в (1) для монослоя сферических гранул, согласно закону Стокса, имеем

$$F_{P1C} = \pi r \{4r^2(\rho_G - \rho_F)g/3 - 6\eta\Theta/[lb(1 - \pi/4)]\}. \quad (6)$$

Построенная согласно (6) для монослоя стальных сферических гранул в техническом 95% этаноле зависимость на рис. 7 обозначена  $C_1$ . Как видно из рис. 7, вид зависимости (4) ближе к виду зависимостей рис. 5, 6 по сравнению с зависимостью (5). В то же время скорости потока РЖ недостаточно для отрыва всего слоя гранул от дна РК, что обеспечило бы максимальную свободу их передвижения в слое.

Рассмотрим слой гранул высотой  $h$ . В реальности гранулы располагаются хаотическим образом, так что чётко выделить их монослои крайне затруднительно, что приводит к огромным сложностям при построении их гидродинамических моделей. Для обобщения результатов (4) для случая нескольких слоёв условно будем полагать, что на первый снизу монослой гранул действует такая же сила потока РЖ, как на все лежащие выше слои, а число всех расположенных друг над другом монослоёв равно  $n_h = n/(2r)$ . Тогда для определения разницы сил тяжести и Архимеда в (1) соответствующие члены необходимо домножить на  $n_h$ , а выражение (3) умножить на 2. С учётом изложенных выше предположений (4) трансформируется в

$$F_{Ph} = \pi r^2 \{ 2h(\rho_G - \rho_F)g/3 - \rho_F \Theta^2 [1 - (1 - \pi/4)^2] / [lb(1 - \pi/4)]^2 \}. \quad (7)$$

Построенная согласно (7) зависимость для рассматриваемого случая  $n_h = 0,016/(2 \cdot 0,0016) = 5$  монослоёв стальных сферических гранул в техническом 95% этаноле на рис. 7 обозначена  $B_5$ . При адаптации (6) на случай  $n_h$  монослоёв гранул будем условно пола-

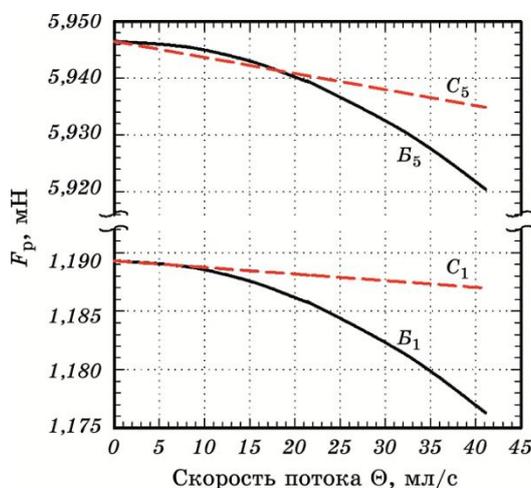


Рис. 7. Зависимости силы давления гранул на дно РК от скорости потока РЖ.

Fig. 7. Dependences of force pressuring on working-camera bottom on working-liquid velocity.

гать, что на все гранулы во всех слоях действует одинаковая сила сопротивления РЖ. Тогда (6) трансформируется в

$$F_{phc} = \pi h \{ 2r^2 (\rho_G - \rho_F) g / 3 - 3\eta \Theta / [lb(1 - \pi/4)] \}. \quad (8)$$

Построенная по (8) для рассматриваемого случая  $n_h = 5$  монослоёв стальных сферических гранул в техническом 95% этаноле зависимость на рис. 7 обозначена  $C_5$ . Как видно из рис. 7, зависимости, построенные на основании одних и тех же законов, как для монослоя, так и для слоя гранул, подобны друг другу. При увеличении количества слоёв гранул сила давления их столбиков на дно возрастает, затрудняя передвижение нижних гранул.

Изложенное выше объясняет характер зависимости рис. 4, а и общую тенденцию увеличения доли высокодисперсных частиц (ВДЧ) (рис. 4, б) при увеличении скорости потока РЖ, но совершенно не объясняет пороговый (ступенчатый) характер последней. Возможно, при образовании ВДЧ важную роль играют не только процессы их отделения от исходных гранул, но и процессы агломерации, агрегации и коагуляции в дисперсионной среде. При высокой концентрации ВДЧ в дисперсионной среде, например, в малом объёме РЖ между гранулами (в активной зоне РК) в процессе их электроэрозионной обработки действие ударных волн электрических разрядов в жидкости существенно и могут возникнуть условия для сближения частиц, преодоления сил их электростатического отталкивания и агломерации их в более крупные объекты.

Для предотвращения этих явлений РЖ, содержащая ВДЧ должна быть вынесена из активной зоны РК до прихода следующего разрядного импульса. Следовательно, если скорость потока РЖ обеспечивает вынос из активной зоны РК подавляющего большинства ВДЧ до прихода следующего разрядного импульса, то вероятность образования более крупных их агломератов и агрегатов существенно снижается. Это может объяснить резкое уменьшение доли более крупных частиц мелкой фракции (рис. 4, б) при превышении скоростью потока РЖ некоторого порогового значения.

Для проверки этой гипотезы рассчитаем время нахождения ВДЧ в пространстве между гранулами и в активной зоне РК и сравним его с длительностью паузы между разрядными импульсами  $T_1 = 1/f - \tau = 1/5 - 5 \cdot 10^{-5} \cong 0,2$  с. Определим все составляющие скорости движения ВДЧ  $v_p$  под действием: 1) гидродинамических сил потока РЖ, 2) силы тяжести, приводящей к седиментации  $v_s$  и 3) броуновского движения  $v_B$ .

Формулы для определения линейных скоростей движения РЖ были приведены выше. Для минимальной в описанных экспериментах  $\Theta = 7,76$  мл/с у дна РК она составит  $v_{0 \min} = 0,0026$  м/с, а для максимальной  $\Theta = 41,1$  мл/с на высоте  $r$  от дна РК она будет

$v_{r \max} = 0,0647$  м/с.

Уравнение движения ВДЧ радиусом  $r_p$  в процессе седиментации под действием сил тяжести, Архимеда и сопротивления РЖ при нулевой начальной скорости будет иметь вид:  $\rho_G V_G (dv_s/dt) = (\rho_G - \rho_F) V_G g - 6\pi r_p \eta v_s$ . Для случая сферической формы ВДЧ данное уравнение примет вид:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{\rho_G - \rho_F}{\rho_G} g - \frac{9\eta}{2r_p^2 \rho_G} v_s. \quad (9)$$

Решением дифференциального уравнения (9) будет

$$v_s = v_{SM} [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (10)$$

где  $v_{SM} = 2r_p^2 g (\rho_G - \rho_F) / (9\eta)$  — предельное значение скорости движения ВДЧ в результате седиментации,  $\beta = 2r_p^2 \rho_G / (9\eta)$  — постоянная времени переходного процесса увеличения скорости движения ВДЧ в результате седиментации.

Из анализа (10) следует, что с течением времени  $t$  величина скорости движения ВДЧ в результате седиментации  $v_s$  будет расти, приближаясь асимптотически к своему предельному значению  $v_{SM}$ , достижение которого означает окончание переходного процесса и установление стационарного режима движения при  $t \gg \beta$ . Как следует из определения  $\beta$ , стационарный режим наступит тем быстрее, чем больше вязкость дисперсионной среды  $\eta$  и меньше радиус ВДЧ  $r_p$ . Результаты расчётов параметров  $v_{SM}$  и  $\beta$  движения сферических дисперсных частиц из высокоуглеродистой стали в 95% этаноле при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$  в результате седиментации приведены в табл. 2 для различных их радиусов  $r_p$ .

Определим составляющую скорости ВДЧ, вызванную броуновским движением. Как известно [30, 31], в результате броуновского движения за время наблюдения  $t$  ВДЧ проходит путь  $\Lambda_B = [kTt/(3\pi\eta r_p)]^{1/2}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана. Тогда средняя скорость броуновского движения за время наблюдения, равное дли-

**ТАБЛИЦА 2.** Зависимости параметров седиментационного и броуновского движений дисперсных частиц от их радиуса.

**TABLE 2.** Sedimentation and Brownian motions dependences for dispersed particles on their radius.

$r_p$ , МКМ	1	3	5	10	20	40
$\beta$ , МКс	1,46	13	37	146	584	2340
$v_{SM}$ , МКМ/с	12,5	110	317	1250	5000	20000
$v_B$ , МКМ/с	1,4	0,58	0,45	0,32	0,22	0,16

тельности паузы между разрядными импульсами  $T_1$  составит:

$$v_B = \sqrt{kT / (3\pi\eta r_p T_1)}. \quad (11)$$

Рассчитанные по (11) скорости броуновского движения дисперсных частиц сферической формы из высокоуглеродистой стали в 95% этаноле при температуре  $T = 300$  К в зависимости от их радиуса представлены в табл. 2.

Из анализа приведённых в таблице 2 результатов и их сравнения с расчётами линейной скорости движения РЖ следует:

1) для всех радиусов дисперсных частиц из распределений рис. 3 и 4  $\beta \ll T_1$ , т.е. стационарный процесс равномерного движения частиц в результате седиментации наступает практически сразу после окончания текущего разрядного импульса, задолго до появления следующего;

2) в рассмотренных условиях скорость движения дисперсных частиц под действием седиментации становится соизмеримой с наименьшей линейной скоростью движения РЖ при значениях радиуса дисперсных частиц свыше 10 мкм;

3) наименьшая скорость движения РЖ на три порядка превосходит скорость броуновского движения ВДЧ, и, следовательно, последней можно пренебречь во всем исследованном диапазоне значений размеров дисперсных частиц.

Итогом сказанного выше является то, что при исследовании скоростей движения ВДЧ в рассматриваемых условиях достаточно учесть только одну составляющую, которая вызвана скоростью потока РЖ. Найдём критическое значение скорости потока РЖ  $\Theta_{CR}$ , которая обеспечивает вынос абсолютно всего её объёма из пространства между гранулами слоя дробы в РЖ за время длительности паузы между разрядными импульсами. Для нахождения объёма жидкости между сферическими гранулами, слой которых располагается внутри прямоугольного параллелепипеда со сторонами рёбер  $l$ ,  $b$ ,  $h$ , воспользуемся коэффициентом заполнения объёма такой формы жидкостью  $\lambda$ . В [32] для такой формы рекомендуется значение  $\lambda = 0,2-0,3$ , а для частиц несферической формы значение этого коэффициента уменьшается и для плоских частиц составляет менее 0,1. В [33] рассчитана пористость кубической гранецентрированной упаковки идентичных сфер, которая, по сути, и есть коэффициент заполнения её объёма жидкостью, и составляет  $\lambda = 1 - \pi / (3\sqrt{2}) \cong \cong 0,26$ . Это значение и примем для наших расчётов. Тогда

$$\Theta_{CR} = \lambda l b h / T_1 = 0,26 \cdot 5,12 \cdot 5,76 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} / 0,2 \cong 60 \text{ мл/с}. \quad (12)$$

В реальном процессе ЭИД гранул металлов возникновение искровых каналов наблюдается преимущественно в средних слоях. В са-

мых нижних слоях давление на гранулы существенно выше оптимального, а в самых высоких — ниже, что делает возникновение искровых каналов в них менее вероятным, чем в средних слоях. При этом в нижних слоях выше вероятность возникновения омических контактов между гранулами, что может привести к короткому замыканию, а в верхних — отсутствия каналов протекания тока, что может привести к режиму холостого хода. В проводимых экспериментах подавляющее большинство искровых каналов наблюдалось в двух внутренних слоях гранул из пяти слоёв в РК. Следовательно, для определения реального критического значения скорости потока РЖ, выражение (12) необходимо домножить на коэффициент, значение которого составляет  $2/5$ . Тогда полученное значение  $\Theta_{CR}$  составит 24 мл/с, что согласуется с положением ступеньки на рис. 4, б.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Увеличение скорости ламинарного потока рабочей жидкости при электроискровом диспергировании гранул металлов способствует уменьшению дисперсии и средних значений распределений по размерам их эрозионных частиц.
2. Доля эрозионных частиц фракции от 1 до 10 мкм экспоненциально уменьшается с увеличением скорости потока рабочей жидкости, а доля фракции до 1 мкм скачкообразно увеличивается после достижения данной скоростью некоторого критического значения.
3. Увеличение скорости направленного снизу вверх потока рабочей жидкости способствует уменьшению силы давления слоя гранул на дно разрядной камеры, увеличению их подвижности и среднего расстояния между ними. Это вызывает увеличение среднего сопротивления слоя, а также уменьшение доли плазменных каналов, которые образуются в соответствии с механизмом электрического взрыва микровыступов на поверхности контактирующих между собой гранул. Все эти факторы вместе способствуют уменьшению средних размеров крупной фракции эрозионных частиц.
4. Ключевое влияние на размеры мелкой фракции эрозионных частиц имеют не условия их образования, а условия их нахождения в дисперсионной среде. Если скорость потока рабочей жидкости превышает некоторое критическое значение и обеспечивает вынос этих частиц из активной зоны процесса до прихода следующего разрядного импульса, то существенно снижается доля частиц, которые в результате большой концентрации и действия ударных волн вступают во взаимодействие друг с другом, образуя более крупные агломераты и агрегаты.

Авторы выражают благодарность члену-корреспонденту НАН Украины, доктору технических наук, профессору А. А. Щербе за участие в обсуждении результатов.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. И. Дрожалова, Ф. В. Седыкин, В. П. Смоленцев, В. М. Ямпольский, *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов* (Москва: Высшая школа: 1983).
2. А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. Ю. Лабеецкий, С. А. Чайковский, А. В. Шишлов, *Журнал технической физики*, **7**, вып. 5: 35 (2007).
3. А. Е. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker, K. S. Vecchio, F. E. Spada, E. J. Lavernia, and R. Rodriguez, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **254–255**: 1 (2003).
4. J. I. Hong, V. C. Solomon, D. J. Smith, F. T. Parker, E. M. Summers, and A. E. Berkowitz, *Appl. Phys. Lett.*, **89**: 142506 (2006).
5. К. В. Чуистов, А. П. Шпак, А. Е. Перекос, А. Д. Рудь, В. Н. Уваров, *Успехи физ. мет.*, **4**, № 4: 235 (2003).
6. А. Е. Perekos, V. A. Chernenko, S. A. Bunyaev, V. P. Zalutskiy, T. V. Ruzhitskaya, O. F. Boitsov, and G. N. Kakazei, *J. Appl. Phys.*, **112**: 093909 (2012).
7. P. K. Nguyen, K. H. Lee, S. I. Kim, K. A. Ahn, L. H. Chen, S. M. Lee, R. K. Chen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *Nanotechnology*, **23**: 415604 (2012).
8. О. М. Иванова, М. И. Даниленко, Г. С. Монастирський, В. І. Коломицев, Ю. М. Коваль, А. А. Щерба, С. М. Захарченко, Р. Портъе, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 5: 603 (2009).
9. Г. С. Монастирський, В. В. Односум, В. І. Коломицев, Ю. М. Коваль, Р. Ochin, R. Portier, A. A. Щерба, С. М. Захарченко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**, № 5: 761 (2008).
10. А. А. Щерба, В. В. Кокорин, А. Е. Перекос, Л. А. Олиховская, О. Ф. Бойцов, С. Н. Захарченко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **29**, № 2: 201 (2007).
11. G. Ya. Kolbasov, A. I. Ustinov, A. A. Shcherba, A. Ye. Perekos, M. O. Danilov, N. V. Vyunova, S. N. Zakharchenko, and G. Hossbah, *J. Power Sources*, **150**: 276 (2005).
12. Ph.-Kh. Nguyen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, **115**: 17A756 (2014).
13. D. Ruter and W. Bauhofer, *J. Luminescence*, **57**: 19 (1993).
14. J. I. Hong, F. T. Parker, V. C. Solomon, P. Madras, D. J. Smith, and A. E. Berkowitz, *J. Mater. Res.*, **23**, Iss. 6: 1758 (2008).
15. Y. J. Tang, F. T. Parker, H. Harper, A. E. Berkowitz, K. Vecchio, A. Rohatgi, and B. M. Ma, *Appl. Phys. Lett.*, **86**: 122507 (2005).
16. J. Carrey, H. V. Radousky, and A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, **95**, No. 3: 823 (2004).
17. К. В. Чуистов, А. Е. Перекос, В. П. Залуцкий, Т. В. Ефимова, Н. И. Главацкая, *Металлофиз. новейшие технол.*, **18**, № 8: 18 (1996).
18. А. Г. Дубовой, А. Е. Перекос, К. В. Чуистов, *Металлофизика*, **6**, № 5: 129 (1984).
19. Н. А. Шидловська, С. М. Захарченко, О. П. Черкаський, *Технічна електродинаміка*, № 2: 5 (2017).
20. С. М. Захарченко, *Науковий вісник Національного гірничого університету*, **133**, № 1: 62 (2013).
21. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка*, № 5: 17 (2012).
22. С. Н. Захарченко, *Новини енергетики*, № 6: 41 (2012).
23. С. Н. Захарченко, *Технічна електродинаміка*, № 1: 16 (2013).

24. В. Я. Ушаков, *Импульсный электрический пробой жидкостей* (Томск: Издательство Томского университета: 1975).
25. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (Москва: Наука: 1987).
26. Г. А. Воробьев, В. А. Мухачев, *Пробой тонких диэлектрических плёнок* (Москва: Советское Радио: 1977).
27. К. К. Намитоков, *Электроэрозионные явления* (Москва: Энергия: 1978).
28. Н. А. Шидловська, С. М. Захарченко, О. П. Черкаський, *Технічна електродинаміка*, № 3: 3 (2017).
29. И. М. Дубровский, Б. В. Егоров, К. П. Рябошапка, *Справочник по физике* (Киев: Наукова думка: 1986).
30. В. Г. Левич, *Курс теоретической физики* (Москва: Физматгиз: 1962), т. 1.
31. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Статистическая физика* (Москва: Наука: 1964).
32. Дж. Займан, *Модели беспорядка* (Москва: Мир: 1982) (пер. с англ.).
33. Н. В. Ширгина, А. И. Кокшайский, А. И. Коробов, *Учёные записки физического факультета МГУ*, № 6: 146318 (2014).

## REFERENCES

1. B. A. Artamonov, Yu. S. Volkov, V. I. Drozhalova, F. V. Sedykin, V. P. Smolentsev, and V. M. Yampol'skiy, *Elektrofizicheskie i Elektrokhimicheskie Metody Obrabotki Materialov* [Electrophysical and Electrochemical Methods of Materials Processing] (Moscow: Vysshaya Shkola: 1983) (in Russian).
2. A. G. Russkikh, V. I. Oreshkin, A. Yu. Labetskiy, S. A. Chaykovskiy, and A. V. Shishlov, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **7**, Iss. 5: 35 (2007) (in Russian).
3. A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker, K. S. Vecchio, F. E. Spada, E. J. Lavernia, and R. Rodriguez, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **254–255: 1** (2003).
4. J. I. Hong, V. C. Solomon, D. J. Smith, F. T. Parker, E. M. Summers, and A. E. Berkowitz, *Appl. Phys. Lett.*, **89: 142506** (2006).
5. K. V. Chuistov, A. P. Shpak, A. E. Perekos, A. D. Rud', and V. N. Uvarov, *Usp. Fiz. Met.*, **4, No. 4: 235** (2003) (in Russian).
6. A. E. Perekos, V. A. Chernenko, S. A. Bunyaev, V. P. Zalutskiy, T. V. Ruzhitskaya, O. F. Boitsov, and G. N. Kakazei, *J. Appl. Phys.*, **112: 093909** (2012).
7. P. K. Nguyen, K. H. Lee, S. I. Kim, K. A. Ahn, L. H. Chen, S. M. Lee, R. K. Chen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *Nanotechnology*, **23: 415604** (2012).
8. O. M. Ivanova, M. I. Danylenko, H. Ye. Monastyr's'kyy, V. I. Kolomytsev, Yu. M. Koval', A. A. Shcherba, S. M. Zakharchenko, and R. Portier, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 5: 603 (2009) (in Ukrainian).
9. H. Ye. Monastyr's'kyy, V. V. Odnosum, V. I. Kolomytsev, Yu. M. Koval', P. Ochinnikov, R. Portier, A. A. Shcherba, and S. M. Zakharchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 5: 761 (2008) (in Ukrainian).
10. A. A. Shcherba, V. V. Kokorin, A. E. Perekos, L. A. Olikhovskaya, O. F. Boytsov, and S. N. Zakharchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **29**, No. 2: 201 (2007) (in Russian).
11. G. Ya. Kolbasov, A. I. Ustinov, A. A. Shcherba, A. Ye. Perekos, M. O. Danilov, N. V. Vyunova, S. N. Zakharchenko, and G. Hossbah, *J. Power Sources*, **150: 276** (2005).

12. Ph.-Kh. Nguyen, S. Jin, and A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, **115**: 17A756 (2014).
13. D. Ruter and W. Bauhofer, *J. Luminescence*, **57**: 19 (1993).
14. J. I. Hong, F. T. Parker, V. C. Solomon, P. Madras, D. J. Smith, and A. E. Berkowitz, *J. Mater. Res.*, **23**, Iss. 6: 1758 (2008).
15. Y. J. Tang, F. T. Parker, H. Harper, A. E. Berkowitz, K. Vecchio, A. Rohatgi, and B. M. Ma, *Appl. Phys. Lett.*, **86**: 122507 (2005).
16. J. Carrey, H. B. Radousky, and A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, **95**, No. 3: 823 (2004).
17. K. V. Chuistov, A. E. Perekos, V. P. Zalutskiy, T. V. Efimova, and N. I. Glavatskaya, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **18**, No. 8: 18 (1996) (in Russian).
18. A. G. Dubovoy, A. E. Perekos, and K. V. Chuistov, *Metallofizika*, **6**, No. 5: 129 (1984) (in Russian).
19. N. A. Shydlovs'ka, S. M. Zakharchenko, and O. P. Cherkas'kyy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 2: 5 (2017) (in Ukrainian).
20. S. M. Zakharchenko, *Naukovyy Visnyk Natsional'noho Girnychogo Universytetu*, **133**, No. 1: 62 (2013) (in Ukrainian).
21. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 5: 17 (2012) (in Russian).
22. S. N. Zakharchenko, *Novyny Enerhetyky*, No. 6: 41 (2012) (in Russian).
23. S. N. Zakharchenko, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 1: 16 (2013) (in Russian).
24. V. Ya. Ushakov, *Impul'snyy Elektricheskiy Probov Zhidkostey* [Pulsed Electrical Breakdown of Liquids] (Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta: 1975) (in Russian).
25. Yu. P. Rayzer, *Fizika Gazovogo Razryada* [Physics of Gas Discharge] (Moscow: Nauka: 1987) (in Russian).
26. G. A. Vorob'ev and V. A. Mukhachev, *Probov Tonkikh Dielektricheskikh Plenok* [Breakdown of Thin Dielectric Films] (Moscow: Sovetskoe Radio: 1977) (in Russian).
27. K. K. Namitokov, *Elektroerozionnye Yavleniya* [Electroerosion Phenomena] (Moscow: Energiya: 1978) (in Russian).
28. N. A. Shydlovs'ka, S. M. Zakharchenko, and O. P. Cherkas'kyy, *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 3: 3 (2017) (in Ukrainian).
29. I. M. Dubrovskiy, B. V. Egorov, and K. P. Ryaboshapka, *Spravochnik po Fizike* [Handbook of Physics] (Kiev: Naukova Dumka: 1986) (in Russian).
30. V. G. Levich, *Kurs Teoreticheskoy Fiziki* [Course of Theoretical Physics] (Moscow: Fizmatgiz: 1962), vol. 1 (in Russian).
31. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Statisticheskaya Fizika* [Statistical Physics] (Moscow: Nauka: 1964) (in Russian).
32. D. M. Ziman, *Modeli Besporyadka* [Models of Disorder] (Moscow: Mir: 1982) (Russian translation).
33. N. V. Shirgina, A. I. Kokshayskiy, and A. I. Korobov, *Uchenye Zapiski Fizicheskogo Fakul'teta MGU*, No. 6: 146318 (2014) (in Russian).