

УДК 621.762.3:537.528

О. Н. Сизоненко, В. А. Трегуб, Е. В. Липян, А. С. Торпаков

### АНАЛИЗ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

*Методами физического моделирования и теоретического анализа исследованы факторы воздействия высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в дисперсной системе «порошок–керосин» и их влияние на дисперсность порошка Ti после обработки. Экспериментально показана эффективность управления дисперсностью порошков при ВЭР-воздействии за счет частоты следования разрядов.*

**Ключевые слова:** высоковольтный электрический разряд, порошок, седиментация, амплитуда волны давления, плазма.

#### Введение. Постановка задачи

Необходимость существенного повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик материалов обусловила создание новых материалов с микро- и нанодисперсной структурами. Традиционная схема подготовки шихты для получения изделий методами порошковой металлургии является многостадийным и трудоёмким процессом. Высоковольтная электро-разрядная обработка (ВЭР-обработка) позволяет заменить такие этапы подготовки шихты, как перемешивание, формирование прессовки, реакционное спекание и размол в мельнице [1].

Характерной особенностью метода ВЭР-обработки порошков является многофакторность воздействия [1]. При прохождении электрического тока через гетерогенную среду на границах раздела сред «частица металла – жидкий диэлектрик» происходит разогрев жидкости, который приводит к появлению локальных плазменных образований [2]. Температурное воздействие плазмы, в свою очередь, приводит к выбросу расплавленного металла в охлаждающую жидкость с последующей рекристаллизацией [3]. При использовании углеводородной жидкости в качестве рабочей среды при обработке порошков в плазменных образованиях возникают условия, способствующие химическим реакциям между частицами обрабатываемого порошка и нанопорошком различных аллотропных форм, образуемым при пиролизе дисперсионной среды [4], результатом которого является синтез карбидных фаз металлов [1]. Волны сжатия/растяжения, возникающие в обрабатываемой среде вследствие стремительного расширения плазменных образований, также выполняют функцию диспергирования частиц металла и препятствуют образованию конгломератов частиц. Циклическое же гидродинамическое воздействие обеспечивает равномерное распределение упрочняющей карбидной фазы в объеме выходного материала.

---

© Сизоненко Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; раб. тел. (0512) 58-71-43; e-mail: sizonenko43@rambler.ru; Трегуб Владимир Александрович – инженер этого же Института; моб. тел. (063) 41-95-582; e-mail: vladmirtregub@gmail.com; Липян Евгений Васильевич (моб. тел. (093) 592-90-45; e-mail: lypian@ukr.net), Торпаков Андрей Сергеевич (моб. тел. (093) 846-93-58; e-mail: torpakov@gmail.com) – младшие научные сотрудники того же НИИ; 54018, г. Николаев, пр. Октябрьский, 43а

В вышеприведенных работах авторами было предложено множество гипотез о механизмах влияния каждого из факторов воздействия ВЭР-обработки дисперсных систем на характеристики получаемого продукта. Однако на сегодняшний день все еще недостаточно экспериментальных данных, которые позволили бы окончательно подтвердить или опровергнуть предложенные гипотезы.

*Целями данной работы* являются анализ физико-технических процессов воздействия при ВЭР-обработке металлических порошков и установление их влияния на изменение дисперсности.

### **Методики испытаний. Результаты экспериментов**

*Исследование процессов распределения плазменных образований.* Объектом исследования был порошок Ti-фракции (100 мкм) в осветительном керосине (ТУ 3840158–10–90). Для физического моделирования электроразрядных процессов, происходящих в слое порошка Ti в керосине, была изготовлена плоская и прозрачная разрядная камера (что позволило произвести фотографическую регистрацию разрядов в толще порошка). Эта камера была подключена к конденсаторной батарее ёмкостью  $C = 0,2$  мкФ, тогда как зарядное напряжение составляло  $U = 30$  кВ. При физическом моделировании обработки порошка Ti на начальном этапе плазменные образования были зарегистрированы исключительно в прианодной и прикатодной областях (рис. 1, а, б), что и привело к увеличению зазора между слоем порошка и анодом. Так, на осциллограмме (рис. 1, б) видно, что данное изменение положения порошка приводит к возникновению задержки между пробоями воздушного разрядника и рабочей среды.

Также на снимке 10-го импульса (рис. 1, б) следует отметить появление локальных плазменных образований между частицами в толще порошка и увеличение диаметра плазменного образования в прианодной области – что свидетельствует об увеличении доли выделяющейся на участке между анодом и слоем порошка энергии.

Дальнейшее же увеличение доли выделяемой на данном участке энергии приводит к усилению гидродинамического воздействия парогазовой полости на среду, перемешиванию порошка и образованию взвеси частиц порошка Ti в керосине (рис. 1, в). Объединённые в каналы плазменные образования в центральной части камеры постепенно вытесняют порошок в ее углы, уменьшая концентрацию твердой фазы в центральной области – что, в свою очередь, приводит к увеличению значения сопротивления межэлектродного промежутка (рис. 1, в, з).

Образующиеся по причине интенсивного расширения плазменных каналов в центральной части камеры гидротоки выносят порошок из межэлектродного промежутка. Вследствие уменьшения концентрации твердой фазы в межэлектродном пространстве увеличивается доля выделяющейся на промежутках между частицами энергии – усиливая, тем самым, гидродинамическое воздействие на среду и интенсифицируя процессы образования нанопорошка. Вместе с тем, стоит учитывать, что с усилением фактора гидродинамического влияния ослабевает эрозионное разрушение частиц (абляция).

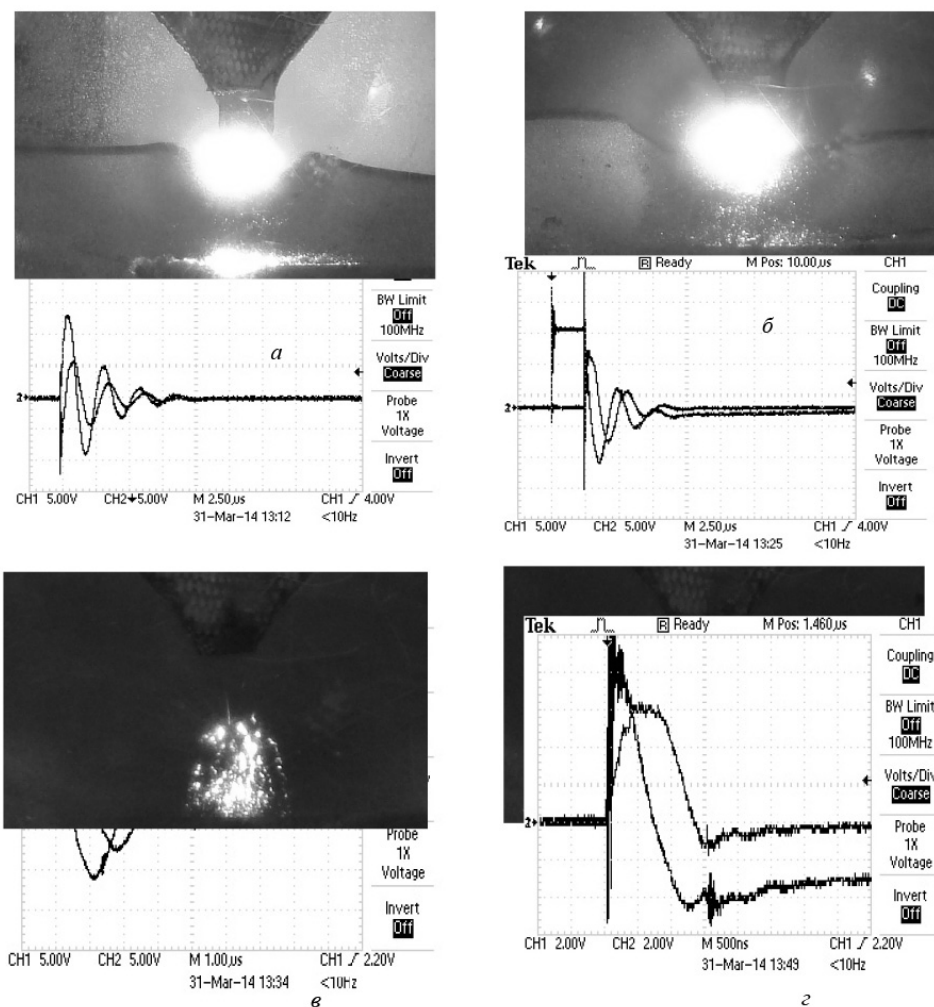


Рис. 1. Интегральные снимки и осциллограммы разрядов в дисперсной системе «порошок титана в керосине» ( $W_{\text{ед}} = 90$  Дж,  $d_{\text{ср}} = 100$  мкм): а – 5-й; б – 10-й; в – 50-й; г – 100-й импульсы

*Анализ процессов седиментации порошка.* Приведенные выше результаты физического моделирования позволили установить, что геометрическое расположение частиц порошка в разрядной камере в процессе обработки под воздействием гидродинамических факторов разряда изменяется, а это оказывает влияние на физико-технические процессы в дисперсной системе «порошок–керосин». Следует также учитывать, что в свободнодисперсных системах частицы дисперсной фазы могут свободно перемещаться по всему объему дисперсионной среды, а происходящие в таких системах явления можно оценить с единой позиции – с точки зрения общих закономерностей седиментации. Исходя из этого, расчет скорости седиментации выполнялся согласно закону Стокса с поправкой Озеена (как наиболее корректный для данного диапазона размеров частиц) [5, 6]. Моделировалось осаждение частиц порошков титана, железа и алмаза в воде, а титана, железа и карбида бора – в керосине, а также частиц образующихся в процессе ВЭР-обработки синтезируемых веществ: графита, карбидов титана и железа в керосине (при этом частицы графита рас-

сматривались как одни из представителей аллотропных форм углерода, образующихся при ВЭР-обработке вследствие пиролиза керосина).

Полученные результаты (табл. 1) позволяют в любой момент после единичного воздействия ВЭР оценить вероятность нахождения в определенном слое рабочей жидкости частиц, имеющих размеры определенного диапазона: изменение частоты следования разрядов (с учетом закономерностей высоковольтной импульсной обработки) позволяет управлять эффективностью воздействия на частицы порошков с точки зрения смены их дисперсности. Например, при ВЭР-обработке порошков титана и железа в керосине время оседания с высоты  $h = 1$  см отличается примерно в 2 раза, а, следовательно, двухкратное увеличение частоты разрядов при ВЭР-обработке этих порошков (с 0,5 до 1 Гц) должно привести к более эффективному, по сравнению с частицами железа такой же дисперсности, измельчению частиц титана размером 50 мкм.

Таблица 1

Расчетное время оседания частиц суспензии для разных фракций в керосине с высоты  $h = 1$  см

Материал частиц	Часы			Минуты				Секунды		
	0,5	1,5	3	Размер частиц, мкм				100	150	200
Титан	5,56	0,62	0,15	3,33	1,48	0,83	2,07	0,62	0,36	0,26
Железо	2,92	0,32	0,08	1,75	0,78	0,44	1,12	0,37	0,23	0,17
Графит	13,94	1,55	0,39	8,36	3,72	2,09	5,09	1,38	0,72	0,50
Карбид титана TiC	5,00	0,56	0,14	3,00	1,33	0,75	1,87	0,56	0,33	0,24
Карбид железа Fe <sub>3</sub> C	2,99	0,33	0,08	1,79	0,80	0,45	1,14	0,37	0,23	0,18

Исследование амплитудных значений волн давления на стенке электро-разрядного реактора. Представленные выше результаты физического моделирования и седиментационного анализа свидетельствуют о том, что в процессе обработки в разрядной камере изменяется положение частиц обрабатываемого порошка, часть из которых может находиться во взвешенном состоянии. В связи с этим возникла необходимость оценить влияние частиц порошка в дисперсионной среде на амплитуду волны давления при ВЭР. Соответствующие исследования выполнялись в разрядной камере с помощью волноводного датчика давления (ВДД), где схема разрядного контура соответствует приведенной в работе [1]. На рис. 2 показано расположение ВДД в камере по отношению к элементам электродной системы.

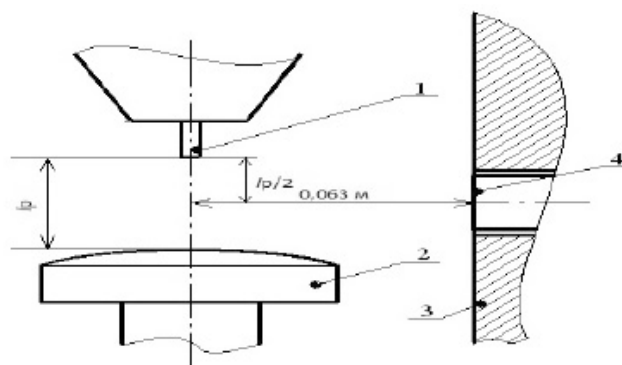


Рис. 2. Расположение волноводного датчика давления: 1 – электрод-анод; 2 – электрод-катод; 3 – внутренняя поверхность камеры высокого давления; 4 – приемное доньшко волноводного датчика давления

Эти исследования выполнялись при следующих условиях: объем рабочей жидкости – 5,5 дм<sup>3</sup>; в качестве рабочей среды использовались керосин чистый и с добавлением порошка Ti ( $d_{cp} = 100$  мкм) массой 250 и 500 г (массовое соотношение твердой и жидкой фаз (Т:Ж) – 1/18 и 1/9 соответственно). Параметры контура были выбраны согласно работам [1, 7]: при постоянном рабочем напряжении 50 кВ, индуктивности разрядного контура 0,8 мкГн, разрядном промежутке 12 мм и частоте следования разрядов 0,3 Гц емкость накопителя варьировалась от 0,4 до 1,6 мкФ. Для каждого из рассмотренных режимов делалось не менее 30 разрядов, данные по которым усреднялись.

Результаты исследований показали, что во всем исследованном диапазоне емкостей добавление в керосин порошка Ti ( $d_{cp} = 100$  мкм) массой 250 г (массовое соотношение Т:Ж – 1/18) приводит к снижению амплитуды давления в среднем в ~1,5 раза (рис. 3). Так, при емкости 0,8 мкФ амплитуда давления снижается с 16,8 до 10,8 МПа, что свидетельствует о диссипации энергии волны давления на частицах порошка.

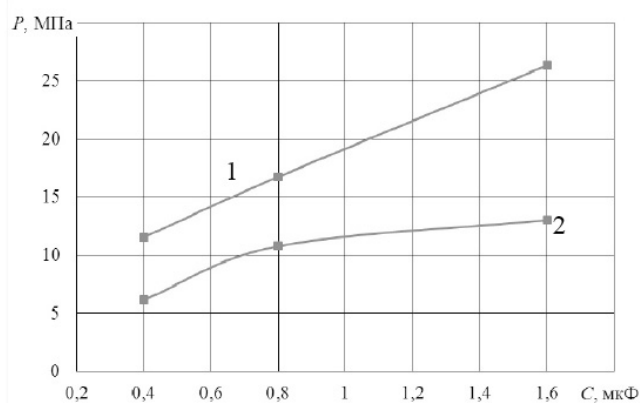


Рис. 3. Амплитуда давления при ВЭР-обработке: 1 – в керосине; 2 – в керосине с добавлением порошка Ti (массовое соотношение Т:Ж – 1/18)

Увеличение содержания порошка Ti до 500 г (массовое соотношение Т:Ж – 1/9) приводит к снижению амплитуды давления в 2,6 раза (с ~11 до ~4,2 МПа) (рис. 4), а с повышением числа импульсов до 100 разрядов происходит дальнейшее снижение значения амплитуды давления до примерно 2 МПа.

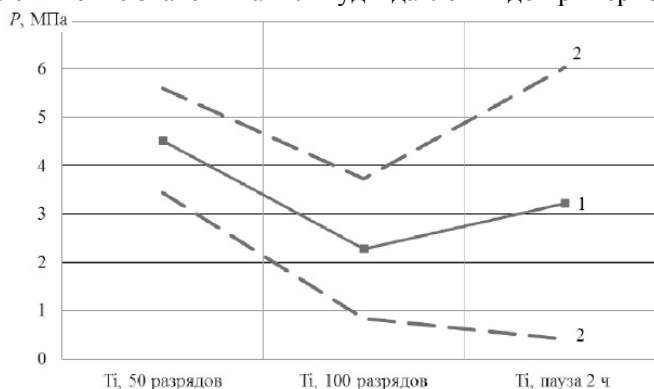


Рис. 4. Амплитуда давления при ВЭР-обработке в керосине с добавлением порошка Ti: 1 – экспериментальные значения амплитуды давления; 2 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Такое снижение амплитуды давления в процессе ВЭР-обработки может быть объяснено тем, что уже после 100 разрядов возрастает количество мелко-дисперсных частиц порошка Ti и наноуглерода [4, 7], время оседания которых превышает паузу между разрядами (табл. 1).

После паузы длительностью 2 часа, достаточной для полного оседания частиц порошка Ti на дно камеры (табл. 1), значение амплитуды давления возрастает до ~3 МПа (рис. 4) – что свидетельствует о диссипации энергии волны давления не только на частицах Ti, но и на синтезированных в процессе ВЭР-обработки частицах наноуглерода, время оседания которых значительно превышает двухчасовую.

*Исследование влияния частоты следования разрядов при ВЭР-обработке на дисперсность порошков титана.* Результаты исследования амплитуды волны давления показали, что на частицах порошка, находящихся во взвешенном состоянии в дисперсионной среде, происходит диссипация энергии волны давления. В связи с этим выполненный нами анализ процессов седиментации порошков позволил внести гипотезу о том, что для повышения эффективности высоковольтной импульсной обработки порошков необходимо обеспечить наличие их обрабатываемых частиц в зоне максимального давления волны сжатия перпендикулярно плоскости канала разряда [1, 7]. Установление же частоты следования разрядов при ВЭР-обработке соответственно времени оседания частиц определенной дисперсности должно обеспечить необходимые условия для максимального воздействия волн сжатия на порошок.

Для проверки вышеприведенной авторской гипотезы было проведено экспериментальное исследование по взаимосвязи частоты следования электрических разрядов и эффективности диспергирования порошков (на примере ВЭР-обработки порошка титана в керосине). Предварительно выполненный ситовый анализ показал, что размеры частиц исходного порошка находятся в диапазоне от 100 до 160 мкм (рис. 5, столб. 1). Расчетное время осаждения частиц исходного порошка титана в керосине от поверхности рабочей жидкости до зоны максимального давления волны сжатия в разрядной камере составляет 3 с (табл. 1). Соответственно, частота следования импульсов, согласно описанным выше теоретическим исследованиям, должна составлять  $f = 1/t = 1/3 = 0,3$  Гц.

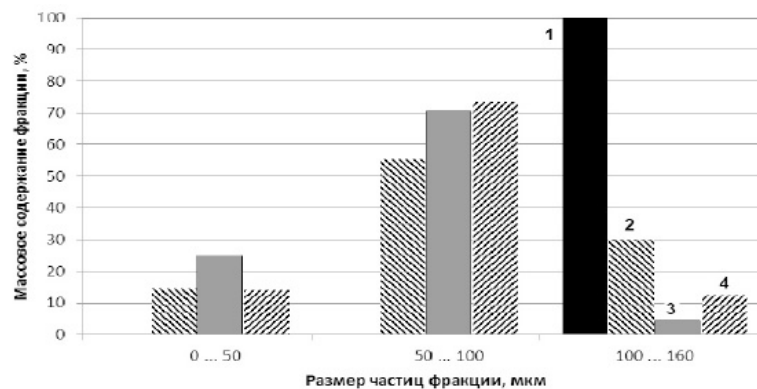


Рис. 5. Распределение по размерам частиц порошка титана до и после ВЭР-обработки:  
 1 – исходный порошок; 2 – после ВЭР-обработки при  $f = 0,07$  Гц;  
 3 – после ВЭР-обработки при  $f = 0,3$  Гц; 4 – после ВЭР-обработки ( $f = 1,3$  Гц)

Для исследования дисперсности порошка применялся ситовый анализ с наименьшим размером ячейки 50 мкм. При ВЭР-обработке было важно не переизмельчить порошок, поэтому удельная энергия воздействия была выбрана согласно работе [8] и составила 15 МДж/кг при напряжении 50 кВ. Частота при этом варьировалась за счет скорости зарядки накопителя и составила 0,07; 0,3 и 1,3 Гц. После ВЭР-обработки полученный порошок высушивался и проводился повторный ситовый анализ.

Обработка с частотой  $f = 0,3$  Гц привела к измельчению порошка: содержание частиц начального размера (от 100 до 160 мкм) не превысило 5 %. При этом количество мелкой фракции (<50 мкм) было наибольшим для всех обработок – 25 %. Соответственно, содержание средней по размеру фракции (50–100 мкм), составило 70 % (рис. 5, столб. 3). Таким образом, обработка с частотой  $f = 0,3$  Гц позволила измельчить практически весь порошок титана до меньшего, чем начальный, размера. Повышение же частоты обработки до  $f = 1,3$  Гц также привело к измельчению порошка, однако в результате воздействия осталось значительное количество частиц начальных размеров – до 12,5 %. Содержание же порошка среднего и мелкого размеров составляло 73,5 и 14 % соответственно (рис. 5, столб. 2). При понижении же частоты до  $f = 0,07$  Гц количество частиц начального размера составило ~30 %. При этом мелкая фракция порошка, как и в случае с обработкой при повышенной частоте ( $f = 1,3$  Гц), составила ~14 %, тогда как средняя по размерам фракция – соответственно, 56 % (рис. 5, столб. 4).

### Выводы

Установлено, что в ходе ВЭР-обработки порошка Ti, вследствие циклического гидродинамического воздействия на среду, образуется взвесь твердой фазы в керосине. Концентрация твердой фазы в разрядном промежутке качественно меняет картину распределения плазменных образований в объеме реактора. Уменьшение же ее концентрации в межэлектродном промежутке ведет к усилению гидродинамического воздействия, но при этом побочным эффектом являются ослабление эрозионного измельчения частиц и чрезмерная интенсификация процессов синтеза нанокремнезема.

На основе теоретического анализа процессов седиментации порошков установлены закономерности пространственного распределения дисперсных частиц в рабочей жидкости в зависимости от материала порошка и его дисперсности.

Установлено, что добавление в керосин порошка Ti ( $d_{cp} = 100$  мкм) с массовым соотношением Т/Ж = 1/9 приводит к снижению амплитуды давления на ВДД в ~3 раза, а при Т/Ж = 1/18 в ~1,5 раза (по сравнению с ВЭР-обработкой сугубо в керосине) – что является результатом диссипации энергии волны давления на взвешенных в дисперсионной среде частицах порошка.

Также установлено, что корреляция с временем оседания частиц частоты следования разрядов при ВЭР-обработке обеспечивает условия для максимального воздействия волн сжатия на порошок и позволяет управлять эффективностью, с точки зрения изменения их дисперсности, воздействия на частицы исследуемых порошков.

*Методами фізичного моделювання та теоретичного аналізу досліджено фактори дії високовольтного електричного розряду (ВЕР) у дисперсній системі «порошок–газ» та їх вплив на дисперсність порошку Ti після обробки. Експериментально показано ефективність керування дисперсністю порошків при ВЕР-впливі за рахунок частоти посилаючих розрядів.*

*Ключові слова: високовольтний електричний розряд, порошок, седиментація, амплітуда хвилі тиску, плазма.*

*Factors of impact of high voltage electric discharge (HVED) in disperse system «powder–kerosene» and their influence on Ti-powder dispersion after treatment have been researched by methods of physical modelling and theoretical analysis. Efficiency of powder dispersion control under HVED-impact on account of discharges passing frequency has been experimentally shown.*

*Keywords: high voltage electric discharge, powder, sedimentation, pressure wave amplitude, plasma.*

1. *Sizonenko O. N. High Voltage Electric Discharge in Liquid as a Method of Preparation of Blend for Carbide Steels / O. N. Sizonenko, E. G. Grigoriev, A. D. Zaichenko et al. // International Virtual Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry «Machines, Technologies, Materials». – 2013. – Y. VII, Iss. 10. – P. 19–22.*
2. *Намитоків К. К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.*
3. *Галанов А. И. Получение наноразмерных композиционных порошков методом эрозии металлических гранул импульсным электрическим разрядом в жидких средах / А. И. Галанов, Я. И. Корнеев, Н. А. Яворский и др. // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. – V Ставеровские чтения: труды научно-технической конференции с международным участием (Красноярск, 15–16 октября 2009 г.). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 70–72.*
4. *Кускова Н. И. Получение углеродных наноматериалов в процессе электроразрядной обработки органических жидкостей / Н. И. Кускова, А. Н. Ющишина, А. П. Малюшевская и др. // Электронная обработка материалов. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 72–76.*
5. *Фигуровский Н. А. Седиментометрический анализ / под ред. П. А. Ребиндера. – М.–Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1948. – 332 с.*
6. *Ходаков Г. С. Основные методы дисперсионного анализа порошков. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1968. – 200 с.*
7. *Sizonenko O. N. Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Iss. 5/6. – P. 247–253.*
8. *Пат. 98520 Україна, МПК (2006) B02C 19/18, B22F 9/14. Спосіб одержання тонкодисперсних металевих порошків / О. М. Сизоненко, Е. І. Тафтаї, О. І. Райченко та ін.; заявник і патентовласник – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № a201008652; заявл. 12.07.2010; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.*