Искроэрозионное диспергирование токопроводящих материалов: современное состояние, физические основы и прикладные перспективы (Обзор)

А. П. Малюшевская*, С. В. Петриченко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев, 54003, Украина
**e–mail: ninutsa@ukr.net*

Поступила в редакцию 24.02.2026
После доработки 10.08.2026
Принята к публикации 20.08.2026

Представлен комплексный анализ искроэрозионного диспергирования (ИЭД) – высокоэффективного электрофизического метода получения ультрадисперсных порошков и коллоидных систем из токопроводящих материалов. Рассмотрена эволюция этого направления электроэрозионной обработки, начиная с фундаментальных работ Б.Р. Лазаренко. Особое внимание уделено формированию многоканальных искровых разрядов в слое гранул, нелинейно-стохастическому характеру нагрузки, роли гидродинамических явлений, а также тепловым и термомеханическим эффектам. Обобщены современные математические модели, описывающие переходные процессы в разрядных цепях, и методы управления параметрами импульсов для оптимизации дисперсности и выхода продукта. Показано широкое практическое применение ИЭД не только в материаловедении для получения порошков и функциональных покрытий, но и в экологических технологиях. Выявлены ключевые технологические барьеры, ограничивающие масштабирование метода. Обзор подчеркивает междисциплинарный характер ИЭД, объединяющий электрофизику, гидродинамику и материаловедение, и определяет направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: искроэрозионное диспергирование, электроэрозионная обработка, нанопорошки, разрядно-импульсные технологии, математическое моделирование, очистка воды, переработка материалов

УДК 621.9.048.4
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.4.19

ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) – это высокоточный бесконтактный метод обработки токопроводящих материалов (металлов, сплавов, композитов) путем управляемого эрозионного воздействия серии кратковременных электрических разрядов. Ключевой принцип электроэрозионной обработки – отсутствие механического контакта между инструментом (электродом) и заготовкой, а взаимодействие между этими объектами осуществляется в диэлектрической среде посредством искровых или дуговых разрядов, каждый разряд локально плавит и испаряет микрочастицу материала. Бесконтактность и отсутствие механических усилий позволяет обрабатывать сверхтонкие, хрупкие или закаленные детали без риска деформации, дает возможность изготавливать детали сложнейшей формы, которые невозможно получить фрезеровкой или литьем. Электроэрозионной обработке подлежат любые токопроводящие материалы, независимо от их твердости: закаленная сталь, титаны, жаропрочные сплавы, твердые сплавы (карбид вольфрама) и др.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

В создании основ электроэрозионной обработки фундаментальной является роль Бориса Романовича Лазаренко [1]. Вместе со своей женой Наталией Иоасафовной Лазаренко он не просто открыл новый метод, а создал целую технологическую дисциплину и дал старт новой отрасли промышленности. До появления работ четы Лазаренко явление электрической эрозии (разрушение контактов под действием искр и дуги) рассматривалось в электротехнике исключительно как вредное, с ним боролись для продления срока службы коммутационной аппаратуры. Супруги Лазаренко провели масштабные и методичные эксперименты, которые позволили им перейти от эмпирических наблюдений к пониманию закономерностей процесса и превратить хаотичное эрозионное разрушение в

управляемый процесс съема материала. Академику АН Молдавской ССР Б.Р. Лазаренко и сотрудникам лаборатории электроискровой обработки металлов Института прикладной физики АН Молдавской ССР принадлежит идея и техническое воплощение первой работоспособной релаксационной (RC-) схемы генератора импульсов, которая сделала электроэрозионную обработку возможной на практике. В этой схеме конденсатор заряжался от источника постоянного тока и разряжался на зазор между электродом-инструментом и заготовкой при достижении пробивного напряжения. Такое устройство обеспечило дискретный, импульсный характер обработки, возможность регулировки параметров (емкость, напряжение) для управления размером снятой частицы, относительную стабильность процесса и стало прототипом всего будущего электроэрозионного оборудования. Академик Б.Р. Лазаренко с коллегами сформулировал базовые принципы ЭЭО: необходимость диэлектрической рабочей среды (керосин, масло) для охлаждения и удаления продуктов эрозии, важность малого межэлектродного зазора, влияние полярности на скорость съема материала и износ инструмента. Таким образом, изобретения Б.Р. Лазаренко обусловили концептуальный переворот, направив разрушительную энергию электрической эрозии на созидательные цели, его работы инициировали новое направление в машиностроении – электрофизико-химические методы обработки. Дело академика Б.Р. Лазаренко продолжается в лаборатории электрофизической и электрохимической обработки Института прикладной физики Молдавского государственного университета, среди задач исследователей – размерная электрохимическая микро- и нанообработка для получения наноматериалов (покрытий, нанокомпозитов, нанопроволок) [2]; изучение явлений, сопровождающих электри-ческие разряды в жидкостях и газах [3]; исследования высокоскоростных анодных и катодных процессов, протекающих в стационарных и нестационарных условиях электролиза [4]; исследования электрохимического осаждения износостойких гальванических покрытий (железо, хром, сплавы) [5]; исследование особенностей формирования структур на поверхности, антикоррозионных и физико-механических свойств восстановленных, изготовленных и упрочненных деталей, обработанных электрофизико-химическими методами [6].

Традиционно электроэрозионная обработка (Electro Discharge Machining) ассоциируется с резкой и изготовлением деталей. Однако способность комплекса физико-химических явлений локально и контролируемо удалять материал с поверхности открывает огромные возможности для модификации поверхности, а не только для формообразования. Это особенно актуально для труднообрабатываемых материалов (титаны, жаропрочные сплавы, карбиды). Ключевыми современными направлениями в удалении материала/модификации поверхности с помощью электроэрозии являются следующие практические приложения. Электроэрозионное алмазное шлифование и полирование, когда инструментом служит вращающийся электрод (часто из графита или меди), покрытый абразивными частицами, для получения оптических поверхностей без трещин [7], особенно востребованы при полировании сложнопрофильных поверхностей (лопатки турбин, пресс-формы). Электроэрозионная очистка – удаление поверхностных слоев (окалины, изношенных покрытий, ржавчины) без воздействия на основу [8] особенно важна в ремонте и восстановлении дорогих компонентов, например, лопаток газовых турбин, при очистке сварных швов от окалины в аэрокосмической и атомной отраслях. Несомненным лидером в части практического использования электроэрозии является электроэрозионное легирование и упрочнение поверхности, когда материал электрода, содержащий легирующие элементы (хром, никель, вольфрам, карбиды) переносится на поверхность детали в зоне разрядов, формируя тонкий (до 200 мкм) упрочненный или коррозионностойкий слой [9, 10]. Современное состояние электроэрозионной обработки в сфере удаления металлов с поверхности – это переход от нишевой технологии к стратегическому методу аддитивного и субтрактивного производства и ремонта. Акцент смещается с простого съема материала на целенаправленную модификацию поверхностных свойств (шероховатость, твердость, химический состав). Основными векторами развития являются [11]: экономика замкнутого цикла, так как электроэрозионная обработка становится незаменимым инструментом для восстановления высокоценных компонентов; интеграция в гибридные производственные цепочки; дальнейшая миниатюризация и прецизионность.

В широком спектре практических приложений методов электроэрозионного удаления материалов с поверхности особняком стоит получение порошков – это процесс образования мельчайших частиц токопроводящих материалов, основанный на разрушении материала гранул, находящихся между электродами, под действием импульсных электрических разрядов в жидкой или газовой среде. Искроэрозионное диспергирование (ИЭД) – это

электрофизический метод измельчения материалов, являющийся одним из вариантов электроэрозионной обработки. Этот метод представляет особый интерес благодаря возможности получения высокодисперсных порошков с уникальными свойствами [12]. Кроме этого, метод искроэрозионной дезинтеграции токопроводящих материалов имеет ряд преимуществ: широкий диапазон количества материала, который может быть подвергнут переработке; отсутствие механического контакта, что исключает загрязнение от рабочих тел (в отличие от шарового помола); универсальность, поскольку подходит для широкого ряда металлов и сплавов [13]; экологичность, так как среда, в которой происходит диспергирование (например, жидкость), может быть подвергнута рециркуляции, а использование энергии водорода, образующегося в ходе электроискровой дезинтеграции металлических гранул в водной среде, позволяет вернуть от 25 до 51% затраченной энергии [14]. Как показано выше, появление электроискровых разрядов между электродами в жидкости и газе, механизмы электроэрозионного воздействия на материалы активно изучаются с середины XX в. [15–18] и вплоть до настоящего времени [19–21]. Однако введение в процесс слоя гранул вместо сплошного материала заготовки и электрода меняет физику процесса, порождая уникальные задачи, которые необходимо решать для создания эффективных и надежных технологических установок.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ В НОВОЕ ВРЕМЯ (XXI в.)

Огромный вклад в развитие метода искроэрозионного диспергирования внесли академик НАН Украины А.А. Щерба и сотрудники отдела Электропитания технологических систем Института электродинамики НАН Украины. Исследования академика А.А. Щербы и его коллег стали основой разработки высокопроизводительных электроразрядных установок для объемного электроискрового диспергирования металлов. В публикациях этого научного коллектива подробно анализируются физические процессы, происходящие при ИЭД, особенно в контексте использования электро-разрядных установок с накопительными конденсаторами и стохастически изменяющимися параметрами нагрузки – слоя токопроводящих гранул. Исследования научной группы академика НАН Украины А.А. Щербы доказывают, что для повышения эффективности таких установок необходимо учитывать как параметры электрических цепей, так и динамические, вероятностные и нелинейные характеристики нагрузки. Это позволяет разрабатывать более совершенные системы управления и стабилизации режимов работы, что в конечном итоге ведет к увеличению производительности и улучшению качества получаемых порошков. В результате многолетних исследований физических явлений, которые сопровождают ИЭД, с точки зрения переходных процессов в электрических цепях разработана непротиворечивая интерпретация процессов искроэрозионного диспергирования в слое токопроводящих гранул.

Так, в работах [22, 23] исследуются переходные процессы при разряде накопительных конденсаторов на нагрузку с принудительным ограничением длительности импульсного тока с помощью полностью управляемых полупроводниковых ключей. Авторы показывают, что традиционный подход к уменьшению длительности импульса тока за счет снижения индуктивности контура и увеличения емкости имеет ограничения, поскольку увеличение емкости одновременно ведет к росту длительности импульса. Однако использование управляемых ключей, позволяющих прерывать ток в заданный момент, позволяет увеличивать емкость конденсаторов, тем самым повышая накопленную энергию и импульсную мощность в нагрузке без увеличения длительности тока. Физически это означает, что энергия, запасенная в конденсаторе, может быть эффективно передана в нагрузку за короткое время, что особенно важно для получения наноразмерных частиц материала, когда требуются высокие скорости нарастания тока (до 500 А/мкс) и короткие импульсы.

В работе [24] предлагается усовершенствованная математическая модель сопротивления электроискровой нагрузки, зависящего от тока, скорости его изменения и паузы между импульсами. Модель учитывает U-образный характер изменения сопротивления во времени: сначала сопротивление уменьшается при нарастании тока из-за увеличения количества искровых каналов, затем увеличивается при спадании тока. Также учитывается, что конечное сопротивление может превышать начальное, если пауза между импульсами недостаточна для восстановления контактов между гранулами. Это позволяет более точно рассчитывать динамические параметры разряда: длительность импульса, скорость нарастания тока, энергию и мощность в нагрузке. Показано, что использование модели нелинейного сопротивления позволяет на 13–30% повысить точность

расчетов по сравнению с моделью энергетически эквивалентного линейного сопротивления.

Главным физическим явлением при ИЭД является образование искрового разряда между электродом и гранулами токопроводящего материала, погруженными в диэлектрическую жидкость (например, воду или масло). Современное понимание процесса в целом описано в статье [25], в работе подчеркивается, что при использовании слоя токопроводящих гранул между электродами возникает многоканальный разряд и это значительно увеличивает производительность диспергирования. Показано, что при определенных условиях (короткий межэлектродный промежуток и большое сечение слоя гранул) сопротивление нагрузки в целом оказывается меньше, чем сопротивление отдельных контактов, что и приводит к одновременному возникновению множества искровых каналов. Это связано с тем, что много микроконтактов между гранулами создают условия для одновременного образования нескольких плазменных каналов. В результате в отличие от традиционной электроэрозионной обработки, где разряд обычно одноканальный, в слое токопроводящих гранул возникает множество параллельных разрядов, быстро мигрирующих между гранулами. Эксперименты с двумя параллельными межэлектродными промежутками показали, что токи в них взаимозависимы: уменьшение тока в одном канале компенсируется увеличением в другом. Авторы экспериментально регистрируют взаимозависимые токи в параллельных цепях и демонстрируют, что увеличение напряжения на конденсаторе приводит к переходу от апериодического к колебательному разряду, что связано с уменьшением эффективного сопротивления нагрузки. Физически это объясняется увеличением количества параллельных искровых каналов, которые шунтируют нагрузку, и свидетельствует о динамическом перераспределении энергии между множественными плазменными каналами. Диэлектрическая жидкость, в которую погружены гранулы, не только обеспечивает охлаждение и удаление продуктов эрозии, но и влияет на динамику разряда. В [25] отмечается, что жидкость ограничивает расширение плазменного канала, повышая плотность энергии и усиливая действие локальных ударных волн. Энергия, выделяющаяся в зоне разряда, передается материалу через тепловые потоки и ударные волны, а затем высокая температура в плазменном канале приводит к локальному плавлению и испарению материала заготовки (гранул, металлозагрузки).

В [26] предложена математическая модель, учитывающая зависимость сопротивления нагрузки от величины и скорости изменения тока. Это сопротивление нелинейно уменьшается при росте тока и увеличивается при его снижении, что непосредственно влияет на количество выделяющейся тепловой энергии. Экспериментально доказано, что в момент разряда сопротивление нагрузки падает до минимального значения, а затем возрастает до максимального, что соответствует фазам плавления и последующего быстрого охлаждения материала. Расширение плазменного канала происходит со сверхзвуковой скоростью (сразу после его формирования на коротком интервале времени, а не в течение всей стадии существования разрядного канала), что сопровождается генерацией ударных волн, которые механически воздействуют на материал, способствуя удалению расплавленных частиц. В [26] также подчеркивается, что, с одной стороны, использование диэлектрической жидкости ограничивает расширение плазменного канала, но, с другой стороны, усиливает ударное давление на границе раздела фаз, приводя к выбросу микронных и наноразмерных частиц материала в окружающую жидкость.

Очень важной особенностью ИЭД является стохастическое изменение сопротивления нагрузки пока длится разрядный импульс. Это связывают с нестабильностью плазменного канала, изменением геометрии межэлектродного промежутка и хаотическим характером эрозии. В работах [27, 28] рассматривается задача анализа цепей с активным стохастическим сопротивлением, предложен вероятностный подход к анализу электрических характеристик цепей заряда конденсаторов электроразрядных установок исходя из случайного изменения активного сопротивления. Показано, что математическое ожидание напряжения на конденсаторе не совпадает со значением, рассчитанным для детерминированного сопротивления, это подтверждает необходимость учета стохастичности. Данные выводы важны для точного прогнозирования таких режимов работы электроразрядных установок, когда сопротивление нагрузки может существенно изменяться от импульса к импульсу из-за случайного характера контактов между гранулами. Длительность и форма импульса тока значительно влияют на размеры получаемых частиц и производительность обработки. В статье [29] исследуется влияние индуктивности и активного сопротивления соединительных проводников на скорость нарастания тока. Показано, что использование коаксиальных кабелей позволяет уменьшить

индуктивность и увеличить скорость нарастания тока до 500 А/мкс, что необходимо для получения мелкодисперсных порошков. Авторы замечают, что часть энергии разряда рассеивается в виде тепла в цепи путем излучения и во время механических колебаний. В [29] установлено, что потери энергии можно уменьшить, если при небольшой (до 0,5 мкГн) собственной индуктивности электроразрядных установок для подключения существенно удаленной нагрузки использовать силовые коаксиальные кабели с современной сшитой полимерной электроизоляцией. Физически это объясняется тем, что индуктивность проводников ограничивает скорость изменения тока, а скин-эффект уменьшает эффективное сечение проводника, увеличивая сопротивление. Например, использование скрученной пары длиной 5 м увеличивает длительность нарастания тока в 6,5 раза по сравнению с прямым подключением. Лучшие динамические характеристики показал литцендрат с бифилярной намоткой, но с практической точки зрения коаксиальный кабель надежнее благодаря улучшенной изоляции и высокой механической прочности. Кроме того, в работе еще раз подчеркивается зависимость производительности процесса от соотношения емкостей и начальных напряжений конденсаторов.

В части моделирования процессов, наблюдающихся при искроэрозионной обработке металлических гранул, выделяется работа [30], в которой автором методом конечных элементов проведено компьютерное моделирование электрических, тепловых процессов и термомеханических напряжений, возникающих в материале одной токопроводящей гранулы в зоне контакта с другой гранулой во время одиночного импульса искрового разряда. Моделирование показало, что в процессе нагревания материала гранулы, особенно на границе зоны плавления, возникают критически высокие эквивалентные механические напряжения, которые значительно превышают предел прочности металлов и сплавов. Это должно проявляться в хрупком термомеханическом разрушении гранул. Показано также, что объем расплавленного металла растет во времени быстрее, чем испарившегося, наибольший прирост последнего, по данным [30], прогнозируется в первые 100 мкс воздействия импульса. Моделирование подтвердило также, что джоулевы потери в объеме гранулы дают существенный вклад в общее нагревание, дополнительно увеличивая температуру и объем разрушенного материала. В качестве критерия оптимизации искроэрозионных процессов для производства мелкодисперсного порошка металлов предложено определение оптимальной длительности импульса, при этом наибольший выход продукта (испарившегося материала, формирующего мелкодисперсные частицы) ожидается при длительности импульса, начиная с которой растет объем испарившегося металла. Следует отметить, что верификация математической модели, приведенной в статье [30], автором не обсуждается, а как будет показано далее, выводы, сделанные в этой работе, расходятся с экспериментальными данными других ученых, работающих в этой области. Возможно, это произошло потому, что физические явления, которые сопровождают искроэрозионное диспергирование, включают комплекс процессов: пробой диэлектрика, формирование плазменного канала, тепловое и механическое воздействие на материал, стохастическое изменение параметров нагрузки, генерацию ударных волн и формирование множества каналов разрядов, которые эволюционируют до парогазовых образований. Предложенная модель учитывает не все эти явления.

Работы академика НАН Украины А.А. Щербы и его коллег вносят значительный вклад в понимание процессов, сопровождающих искроэрозионное диспергирование, и позволяют оптимизировать конструкции электроразрядных установок для повышения эффективности и производительности. В одной из последних статей коллектива Отдела электропитания технологических систем Института электродинамики НАН Украины [25] предложена концепция синтеза установок для искроэрозионного диспергирования с учетом нелинейности и стохастичности нагрузки, что позволяет стабилизировать режимы работы и повысить качество получаемых порошков. Использование вероятностных методов анализа, учет нелинейности сопротивления нагрузки и экспериментальное исследование динамических характеристик цепей являются ключевыми направлениями, которые обеспечивают прогресс в области электроэрозионной обработки материалов.

Дело изучения и развития эффективного искроэрозионного диспергирования активно продолжается в Институте электродинамики НАН Украины также другими учеными. Активно включились в работу сотрудники Отдела теоретической электротехники и диагностики электротехнического оборудования С.Н. Захарченко и чл.-кор. НАН Украины Н.А. Шидловская. В течение последних 15 лет научная группа под их руководством рассматривает физические явления, имеющие место при подведении электрической энергии к слою металлических гранул, и отдельно сосредоточи-

вается на протекании тока между гранулами, при этом исходя из совокупности механизмов возникновения плазменных каналов.

В работе [31] предлагаются пять вероятных механизмов возникновения плазменных каналов в слое металлических гранул при подведении к нему электрической энергии:

– если микровыступы соседних гранул находятся в непосредственной близости один от другого, но не соприкасаются, а оксидная пленка на их поверхности очень тонкая или отсутствует, то за счет электролиза рабочей жидкости будет наблюдаться выделение газов на их поверхности. В реальных технологических процессах время, достаточное для образования вокруг микровыступа гранулы пузырька газа толщиной, превосходящей длину свободного пробега электрона в нем в три раза, что необходимо для развития электронной лавины, может составлять менее 0,1 мкс, то есть оно не превышает длительность переднего фронта самых крутых импульсов известных генераторов. Независимо от того как возник газовый пузырек в промежутке между микровыступами, напряженность электрического поля будет сосредоточена в нем, поскольку проводимость газа в пузырьке на несколько порядков ниже проводимости подключенной последовательно с ним рабочей жидкости. В таких условиях в газовом пузырьке может возникнуть и развиться электронная лавина, которая, в свою очередь, может привести к образованию стримера, а при благоприятном стечении обстоятельств – канала проводимости (искры);

– при тех же начальных условиях, но при большой плотности тока в жидкости, например, при высокой электропроводности жидкости в промежутке между микровыступами соседних гранул, возможно ее локальное испарение с образованием пузырька за счет теплового действия тока, далее процессы могут развиваться аналогично описанным выше;

– при сравнительно малой плотности тока, например, в рабочих жидкостях с малой электропроводностью, но одновременно большой напряженности электрического поля между микровыступами без диэлектрических пленок, причем напряженность может быть увеличена за счет уменьшения радиуса кривизны выступов в десятки раз, возможна автоэлектронная эмиссия с катода в жидкость, ведущая впоследствии к ее электрическому пробою;

– если соседние гранулы имеют электрический контакт между микровыступами, то при большой плотности тока, протекающего в нем, возможно нагревание и испарение части металла приконтактных зон (аналог электрического взрыва проводника), что приводит к возникновению плазменных каналов;

– если соседние гранулы имеют поверхностные оксидные или другие пленки с низкой электропроводностью и соприкасаются без прослойки жидкости или газа, то возможен электрический пробой поверхностных пленок, как это происходит в твердом теле. При благоприятных условиях пробой может эволюционировать в тепловой.

Обобщив эти механизмы, описывающие предискровую стадию образования плазменных каналов между металлическими гранулами, погруженными в рабочую жидкость, авторы сводят их к четырем видам: пробой газа, пробой жидкости, электрический взрыв тонких проводников, электрический пробой тонких диэлектрических пленок. Попытка определить условия преобладания того или иного механизма была выполнена в работах [32, 33]. Авторы несколько упрощают и сводят проблему к изучению процесса возникновения, развития и затухания множества плазменных (искровых) каналов в промежутках между соседними металлическими гранулами при подведении к слою гранул импульса электрической энергии. По их мнению, это является основным физическим явлением, лежащим в основе метода искроэрозионного диспергирования. Процесс начинается с пробоя слабопроводящих поверхностных пленок (например, оксидных на алюминии) на микровыступах гранул или непосредственно в жидкости. Это происходит на переднем фронте импульса тока при достижении критической напряженности электрического поля [32]. Данный этап характеризуется очень высоким, но быстро снижающимся электрическим сопротивлением слоя металлических гранул. После пробоя в образовавшихся каналах происходит интенсивная ионизация паров рабочей жидкости и материала гранул, что приводит к формированию высокотемпературной плазмы ($T \sim 10^4$ K). Давление в канале резко возрастает, вызывая его гидродинамическое расширение и ударные волны, которые механически воздействуют на поверхность гранул [33]. Ключевой особенностью является одновременное и последовательное существование большого количества локальных разрядных каналов (от сотен до десятков тысяч в зависимости от размера слоя). Их возникновение, развитие, миграция по поверхности гранул и затухание имеют вероятностный характер. Это главная причина стохастических изменений эквивалентного электрического сопротивления нагрузки как в пределах одного импульса, так и от импульса к импульсу. В своей работе [32] авторский коллектив исходит

из следующих принципов электроэрозии поверхности металлических гранул. В процессе участвуют два механизма – термический и гидродинамический: происходят локальное нагревание микрозон поверхности гранул до температуры кипения и испарения материала под действием плотного потока энергии из плазменного канала и далее выброс расплавленного материала под действием высокого давления плазмы и ударных волн в окружающую жидкость. Выброшенный материал, быстро охлаждающийся в рабочей жидкости, формирует дисперсные частицы (порошок). Размеры частиц и их морфология зависят от параметров импульса (длительности, энергии) и свойств материала. Установлено, что сокращение длительности импульсов с 5 до 0,5 мкс приводит к уменьшению размеров как самих частиц, так и областей когерентного рассеяния (размеров кристаллитов) в них. Для поддержания стабильности процесса необходимо обеспечить вынос продуктов эрозии из межгранульного пространства. На практике это достигается организацией протока рабочей жидкости через слой гранул. Важно, чтобы поток жидкости не вызывал такого значительного гидродинамического давления, которое могло бы дестабилизировать контакты между гранулами и увеличить разброс сопротивления [33]. Кроме того, значительная часть энергии импульса рассеи-вается в виде тепла, нагревая рабочую жидкость и продукты эрозии, и это требует организации охлаждения системы.

В работе [34] описаны механизмы обратной связи, влияющие на стабилизацию сопротивления на стадии развитого искрения между гранулами:

– отрицательная обратная связь по напряжению, когда рост напряжения на слое гранул может приводить к возникновению новых плазменных каналов в местах омических контактов, включенных последовательно. Это равносильно добавлению последовательного сопротивления, противодействующего росту тока и стабилизирующего систему;

– положительная обратная связь по току, когда увеличение тока способствует ионизации существующих каналов, увеличению их сечения и возникновению новых параллельных путей протекания тока, что снижает общее сопротивление слоя.

Современные публикации уделяют большое внимание электрофизическим свойствам задействованных в процессе обработки слоя гранул цепей и подчеркивают их нелинейно-стохастический характер. Очевидно, что эквивалентная электрическая схема слоя металлических гранул является сложной и обнаруживает нелинейные, параметрические и стохастические свойства. Мгновенное значение эквивалентного электрического сопротивления слоя металлических гранул нелинейно зависит от мгновенного значения протекающего тока. Автор [34] показал, что лучшей аппроксимацией этой зависимости является гиперболическая функция, что физически интерпретируется как последовательное соединение активного сопротивления и источника противо-ЭДС. При этом экспериментальная зависимость мгновенных значений сопротивления слоя металлических гранул от тока, протекающего в нем, содержит три характерных участка, которые описывают стадии развития искр: стадия возникновения сквозных каналов протекания тока, стадия развитых каналов, стадия деградации искрений. Каждому из участков соответствует преобладание определенных физических процессов. Естественно, схема замещения нагрузки в виде слоя металлических гранул включает не только нелинейное активное сопротивление, но также реактивную индуктивность (обусловленную по меньшей мере самими токопроводящими гранулами и плазменными каналами) и емкость (обусловленную объемами жидкости и плазмы между гранулами) [33]. Как также показано в работе [33], для каждого фиксированного мгновенного значения тока распределение значений эквивалентного электрического сопротивления слоя металлических гранул подчиняется модифицированному нормальному закону (Гаусса). Это означает, что полное описание нагрузки требует задания не одной детерминированной функции, а трех, зависимых от математического ожидания тока и дисперсии сопротивления и функции коэффициента коррекции диапазона этого распределения. Детерминированные нелинейные модели являются отдельным случаем таких нелинейно-вероятностных моделей, вырождающихся в детерминированные при больших токах, когда разброс значений сопротивления становится малым. В [33] авторы описывают также гистерезис зависимости сопротивления от тока: его значения при одинаковых величинах силы тока различаются на восходящем и нисходящем фронтах импульса. Это объясняется разными условиями существования плазмы: на переднем фронте импульса преобладают процессы образования и развития каналов, а на заднем – процессы их стагнации и затухания вследствие эрозии поверхности и снижения подводимой энергии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЭД

Огромное внимание разные научные коллективы исследователей Института электро-

динамики уделяют математическому моделированию переходных процессов в сложных электротехнических объектах. В недавно опубликованной работе [35] описана модель разрядно-импульсной системы второго порядка с нелинейным описанием эквивалентного электрического сопротивления искроэрозионной нагрузки. В условиях принудительного ограничения длительности разрядных импульсов для ряда значений индуктивности и емкости разрядного контура и начальных их параметров рассчитаны переходные электромагнитные процессы в системе. В группах режимов с фиксированными значениями начального напряжения на рабочем конденсаторе и в группах режимов с фиксированными значениями амплитуды напряжения свободных разрядов на нагрузке построены и проанализированы зависимости энергии разрядных импульсов от их длительности, импульсной мощности в нагрузке и скорости ее изменения. Показано, что в группах режимов с фиксированными значениями амплитуды напряжения свободных разрядов на нагрузке существуют такие значения индуктивности разрядного контура, которые обеспечивают наибольшие величины энергии и импульсной мощности в нагрузке. Для трех значений индуктивности разрядного контура графически решены задачи повышения указанных выше параметров импульсов. Таким образом, показано, что для каждой совокупности емкость–начальное напряжение–длительность импульса существует оптимальное значение индуктивности, которое максимизирует скорость нарастания мощности – ключевой параметр для управления дисперсностью частиц материала гранул.

Учет индуктивности и емкости схемы замещения нагрузки (то есть собственных динамических свойств плазменной среды и гранул) особенно важен для режимов с относительно высоким напряжением (>300 В) и малой длительностью импульсов. В этих режимах проявляются параметрические свойства нагрузки и упрощенные модели дают значительную погрешность на фронтах импульсов. Наибольшую точность, как и в более ранней работе [36], обеспечила модель, учитывающая все реактивные элементы. В этой работе была приведена оценка адекватности предложенной модели при сравнении результатов расчета временных зависимостей напряжения и тока разрядных импульсов, а также сопротивления нагрузки с данными, полученными в результате прямых экспериментов. Наименьшую относительную погрешность амплитуды напряжения и тока разрядных импульсов показали такие зависимости, которые были рассчитаны с учетом реактивных элементов схемы замещения нагрузки.

В статье [37] исследованы зависимости сопротивления гранулированной металлической нагрузки от времени в ходе электроискрового диспергирования. В результате их анализа обосновано ранее не обсуждаемое физическое явление: повторное образование стримерных и лидерных плазменных каналов после затухания подавляющего большинства первичных локальных плазменных каналов. Модель строится на разделении первой моды зависимости сопротивления от времени на пять характерных участков вместо трех, как в предыдущих вариантах моделирования тех же авторов: участок I – от 0 до 10 мкс – формирование проводящих каналов; участок II – от 10 до 90 мкс – развитие плазменных каналов; участок III – от 90 до 190 мкс – деградация каналов, рост сопротив-ления; участок IV – от 190 до 250 мкс – повторное образование каналов; участок V – от 250 до 300 мкс – рекомбинация подавляющего большинства носителей заряда в плазменных каналах, исчезновение вновь образованных каналов, резкий рост сопротивления. Уточненная математическая модель включает три экспоненциальные компоненты, каждая описывает определенные физические процессы: первая – генерацию носителей заряда (участки I и II), вторая – стабилизацию и начало рекомбинации носителей заряда (участки III и IV), третья (участок V) – преобладающую рекомбинацию носителей заряда. Параметры аппроксимирующей функции зависят от амплитуды импульса напряжения. Это отражает влияние энергии разряда на скорость генерации и рекомбинации носителей заряда, количество и стабильность плазменных каналов, длительность фаз развития и затухания. С учетом двух ранее не идентифицированных характерных участков зависимости сопротивления гранулированной металлической нагрузки от времени построена уточненная параметрическая модель. Представлена оценка адекватности моделирования переходных процессов в сравнении с реальными процессами, выявлено, что предложенная модель позволяет проводить расчеты переходных процессов в разрядном контуре генератора импульсов с гранулированной нагрузкой, а именно динамических и энергетических параметров переходных процессов с уже достаточной для инженерных расчетов точностью.

Слой металлических гранул является ярким примером параметрической нагрузки в электрических цепях. Изучение переходных процессов в

RLC-цепях с такой нагрузкой является самостоятельной задачей теоретической электротехники и одновременно позволяет достоверно описывать реальные процессы искроэрозионной обработки. Например, в работе [38] авторы развивают свои исследования [39] и рассматривают уравнение RLC-цепи, которое учитывает изменение сопротивления во времени и является дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. Физически это уравнение учитывает процесс формирования импульса тока, диссипацию энергии в виде тепла, изменения импеданса среды в ходе разрушения гранул, изменение концентрации ионов в рабочей жидкости. Авторы показали принципиальную возможность получения точного решения такого уравнения при определенных соотношениях между значениями его коэффициентов.

Отдельное внимание уделяется процессам управления в электрических цепях с параметрической нагрузкой. В статье [40] предложены алгоритмы управления предельной величиной зарядного тока, обеспечивающие высокую точность регулирования напряжения емкостных накопителей при высокой скорости их заряда. Показано, что использование режимов, в которых частота следования импульсов заряда емкостных накопителей на порядки выше, чем частота следования разрядных импульсов, позволяет уменьшить погрешность регулирования напряжения на них до ±(1÷3)% и ниже. Такие результаты дают возможность повышать стабильность параметров разрядного импульса (амплитуда, длительность) и обеспечивать воспроизводимость эрозионного эффекта, потому что стабильность импульса обусловливает однородность разрядного канала, контролируемую глубину и площадь эрозии, предсказуемость размера и морфологии частиц эродирующего материала.

Попытки систематизации математических моделей, описывающих процессы в слое металлических гранул при эрозионной обработке, были предприняты в [41], в основе принципов систематизации заложены физические явления, наблюдаемые при этом. Подчеркивается стохастический и нестационарный характер процессов из-за множественности разрядных каналов, их миграции и, собственно, эрозии материала нагрузки. Сравнение позволяет утверждать, что нелинейная модель [42] является удобной, независимой от параметров цепи, но плохо верифицируется, потому что не учитывает ни временной динамики, ни гистерезиса сопротивления. Простая параметрическая модель учитывает несимметричность фронтов нарастания–спадания импульса тока, но не описывает повторный пробой разрядных промежутков; в уточненной параметрической модели учтены пять характерных участков первой моды зависимости сопротивления от времени, которые соответствуют более подробному описанию процессов в среде; наиболее точной на сегодня является стохастически-параметрическая модель, которая дополнительно учитывает флуктуации разрядных каналов, однако громоздка для вычислений. Авторы вводят понятие «необходимой фильтрации сигналов» перед построением моделей. В зависимости от вида математической модели сопротивления эрозионной нагрузки глубина фильтрации осциллограмм напряжения и тока в них должна быть разной. Наименьшая глубина фильтрации применяется при построении стохастических моделей, средняя – параметрических и наибольшая – нелинейных.

Таким образом, в математическом моделировании физических процессов в гранулированной токопроводящей среде силами ученых Института электродинамики НАН Украины осуществлены значительные методологические сдвиги:

– учет случайности возникновения и эволюции каналов стимулировали переход от детерминированных к стохастическим моделям;

– учет группового поведения каналов обусловил движение от одномодальных к многомодальным моделям;

– переход к описанию динамики развития процессов позволил перейти к комплексной зависимости сопротивления от времени.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ИЭД

Что касается актуального состояния дел на ниве аппаратного обеспечения процессов искроэрозионного диспергирования, то важные данные обобщены в статье [43], где авторы прослеживают развитие полупроводниковых разрядно-импульсных систем для обработки гранулированных токопроводящих сред. С одной стороны, тиристорные генераторы позволили впервые достигнуть мощностей до 50 кВт на один рабочий реактор. Это дало возможность реализовать полупромышленное производство гидроксида и оксида алюминия, порошков дисперсно-упрочненных жаропрочных сплавов, а также процессы очистки промышленных стоков от ионов тяжелых металлов и др. С другой стороны, все известные меры по уменьшению длительности разрядных импульсов тиристорных генераторов позволили получить наименьшую длительность разрядных импульсов на уровне приблизительно 20 мкс при условиях сохранения достаточной производительности

процесса. Однако такой длительности импульсов оказалось недостаточно для получения значительной доли востребованных наноразмерных эрозионных частиц. Использование транзисторных генераторов разрядных импульсов позволило впервые сократить длительность импульсов до единиц микросекунд и менее без критической потери производительности процесса получения субмикронных и нанодисперсных эрозионных частиц. Также применение транзисторов как полностью управляемых высокочастотных ключей дает возможность управлять начальными условиями на рабочем конденсаторе независимо от стохастического изменения эквивалентного электрического сопротивления нагрузки в широких пределах с погрешностью менее 3%, а длительностью разрядных импульсов – с погрешностью менее 2%.

В последнее время научная группа под руководством Захарченко и Шидловской сосредоточена на получении наноколлоидных систем вода/эрозионные частицы металла для реализации высокопроизводительных процессов водоочистки на уровне потребностей технологического оборудования тепловой и атомной энергетики. Развивается теория управления электрофизическими процессами в гетерогенных токопроводящих средах для повышения эффективности метода искроэрозионного диспергирования. В работе [44] физическое моделирование токопроводящей гранулированной среды для изучения явления электрической эрозии было проведено с учетом особенностей формирования локальных электрических искровых контактов и по эквивалентной схеме замещения проводящего слоя гранул. Предложена общая диаграмма преобразования накопленной энергии в тепловую энергию, энергию излучения и механическую энергию расширения плазменного канала. Диаграмма учитывает: W_C – энергию, накопленную емкостным элементом, W_i – энергию ионизации межэлектродного промежутка, W_r – омические потери в разрядном контуре, W_R – омический нагрев контактов, Q_g – теплоту объемного нагревания контактов, Q_t – теплоту нагревания рабочего тела, W_k – энергию, вводимую в плазменный канал разряда, W_{el} – энергию, затраченную на электролиз; W_j – энергию, затраченную на излучение канала; W_E – энергию, затраченную на эрозию электрода; Q_L – теплоту плавления поверхности гранул; Q_v – теплоту испарения гранул жидкого металла; W_e – энергию, затрачиваемую на расширение канала; W_w – энергию, затрачиваемую на генерацию ударной волны. В работе подчеркивается, что, кроме основных параметров разрядного контура, особенно стохастически изменяющегося сопротивления слоя гранул, важное значение имеет геометрия и состояние поверхности гранул, теплофизические характеристики металла гранул.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки новых методов мониторинга параметров разрядных импульсов и оценивания свойств полученных эрозией частиц развиваются и средства верификации теории разрядно-импульсных систем искроэрозионной обработки гранулированных проводящих сред. Разработан оптико-метрический метод определения объемов гало и ядер плазменных каналов, предложен упрощенный спектральный метод определения химического состава эрозионных частиц на основе оттенка результирующего излучения [45]. Изучены характерные составляющие плазменных каналов, возникающих в результате протекания разрядных токов в слое металлических гранул, установлены законы распределения их объемов. Представлены результаты корреляционного анализа распределения размеров полученных эрозией частиц и углублений на поверхности гранул металла относительно распределений объемов гало и ядер плазменных каналов [46].

Тем не менее в ходе работы над важными проблемами развития электроэрозионной обработки вообще и искроэрозионного диспергирования в слое гранул в частности недостаточное внимание уделяется проблеме гидродинамических явлений, сопровождающих электрические разряды, и их влияния на эффективность диспергирования. Учитывая то, что еще в работе [31] показано, что два из пяти вероятных механизмов пробоя промежутка между гранулами связаны с генезисом парогазовых образований в жидкости и в определенной степени относятся к пробою по пузырьковому механизму, задача учета гидродинамики электроискровых разрядов является важной. Автор статьи [30], изучая процессы, имеющие место при искроэрозионной обработке, на упрощенной модели двух металли-ческих гранул анализирует связанные между собой электрические, тепловые процессы и термомеханические напряжения, но исключает из рассмотрения образование парогазовых полостей и их влияние на образование частицы металла.

Работа [44] посвящена физическому моделированию системы проводящего слоя для изучения явления электрической эрозии электродов по схеме формирования локальных электрических искровых контактов и эквива-

лентной схеме замещения проводящего слоя гранул, которые учитывают сопротивление металлических гранул, сопротивление искровых каналов и их емкость, но никак не отражают генезис искровых каналов до стадии парогазовых образований и тем более до стадии пузырьков, коллапсирующих в межэлектродном пространстве. Однако, безусловно, искровой разряд в жидкости между гранулами приводит к интенсивным гидродинамическим процессам. Быстрое выделение энергии вызывает испарение материала гранул и рабочей жидкости, что приводит к образованию плазменного канала, окруженного парогазовой полостью. Эта полость, состоящая преимущественно из паров металла и разложившейся жидкости (например, водорода и кислорода), является важным элементом процесса, влияющим на его эффективность, стабильность и производительность.

В статье [47], например, содержится исследование целенаправленного использования газовых пузырьков в процессах искроэрозионного диспергирования: в межэлектродный промежуток вблизи контакта гранул вводили искусственные воздушные пузырьки диаметром от 0,5 до 5 мм. Показано, если пузырьки не перекрывают полностью контактный промежуток, они мало влияют на процесс формирования и зажигания искрового канала, напряжение пробоя определяется главным образом состоянием поверхностей гранул. При введении большого пузырька (диаметром 5 мм) плазменный канал расширяется в его область, что приводит к увеличению эффективного объема разрядной плазмы на 30%. Увеличенный объем плазмы способствует ее быстрому охлаждению, это, в свою очередь, способствует ускоренному удалению и охлаждению эрозионных частиц из разрядной зоны, уменьшая их повторное осаждение и агломерацию. В статье обсуждается идея использования контролируемого введения газовых пузырьков как независимого канала управления искроэрозионным технологическим процессом для регулирования эффективного объема плазмы и, следовательно, производительностью и дисперсностью получаемого порошка. Таким образом, введение газовой фазы в реактор как фактор управления процессом преобразования энергии актуально, поскольку изменяет характер электротепловых, газо- и гидродинамических процессов в разрядной зоне.

В работе [48] акцент сделан на гидродинамических эффектах, сопровождающих разряд. Быстрое расширение плазменного канала генерирует ударные волны и гидродинамические возмущения в жидкости. Экспериментально была определена скорость их распространения (от 270 до 310 м/с). Сформулировано условие гидродинамического взаимодействия соседних активированных контактов. Если расстояние между контактами мало, возмущения от одного разряда успевают просуществовать вплоть до начала следующего разряда и повлиять на него. Это способствует усилению миграции искрения, интенсификации удаления продуктов эрозии из разрядных зон. В статье подчеркивается, что на этапе спада мощности происходит инерционное расширение парогазовых полостей со скоростью 30 м/с, что является частью кавитационного процесса, сформулированы условия гидродинамического взаимодействия активированных контактов, которые позволяют интенсифицировать подвижность электроискрений и удаление продуктов эрозии в течение разрядного импульса.

В работе [49] подчеркивается, что одним из факторов, ограничивающих минимальный временной промежуток от одного импульса до следующего, является наличие времени на релаксацию среды, включая рассеивание кавитационных пузырьков и парогазовых полостей от предыдущего разряда. В работах [50] и [51] отмечается, что наличие продуктов эрозии (порошка) в жидкости изменяет условия генезиса электрического разряда, это опосредованно связано с тем, что частицы порошка могут быть зародышами кавитации или влиять на динамику пузырьков. Таким образом, переход части рабочей среды в газо- и парообразное состояние – неотъемлемая часть процесса электроискрового диспергирования и является прежде всего следствием быстрого тепловыделения. В процессах ИЭД образующаяся парообразная фаза играет двойственную роль. С одной стороны, пузырьки и кавитация способствуют миграции разрядов, удалению продуктов эрозии из зоны синтеза и предотвращению агломерации. Целенаправленное введение пузырьков позволяет управлять объемом плазмы и, как следствие, производительностью. Работы [47–51] показывают, что понимание и использование этих явлений (путем подбора геометрии реактора и целенаправленное введение газа) позволяют повысить производительность на 30–60% и стабилизировать режимы работы разрядных установок, но это возможно в условиях, когда пузырьки не перекрывают контакт и не мешают зажиганию разряда. Однако, с другой стороны, их неконтролируемое и хаотическое образование может вносить нестабильность искрообразования, если не управлять процессом. В случае образования между гранулами металла послеразрядных полостей с характерным радиусом до 3–4 мм (что вполне вероятно при энергиях в

импульсе от 8 до 10 Дж) и длительностью релаксации среды от единиц до десятков миллисекунд, такие размеры и длительности возмущений в жидкой среде нарушают контролируемые условия образования качественного порошкового продукта и налагают ограничения на частотные характеристики разрядного генератора. Таким образом, парогазовые полости и кавитация – это не побочные эффекты, а активные и потенциально управляемые компоненты технологии объемного электроискрового диспергирования, которые существенно влияют на его эффективность.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИЭД НА ПРИМЕРЕ ВОДООЧИСТКИ

Процессы электроискрового диспергирования находят свое практическое применение как в технологиях получения порошков [52, 53] и покрытий [54, 55], так и в процессах водоочистки от солей тяжелых металлов [56–65] и органических веществ [66, 67].

Суть искроэрозионного способа водоочистки заключается в использовании энергии импульсных электроискровых разрядов для генерации из материала электрода высокоактивных коагулирующих и сорбционных частиц, которые мгновенно связывают ионы-загрязнители. Здесь искроэрозионный метод представляет собой часть гибридной электротехнологии, сочетающей элементы электрокоагуляции, электрофлокуляции и электрохимического восстановления. В ходе искроэрозионного диспергирования материал металлозагрузки переходит в водный раствор в виде микро- и наночастиц металла или его оксидов/гидроксидов (например, Fe^{2+}/Fe^{3+}, Al^{3+}). Во время электрических разрядов между гранулами в растворе появляются также активные радикалы (OH•, H• и др.) за счет разложения молекул воды. Одновременно протекает несколько процессов: электрохимическое осаждение, так как часть ионов металлов (например, Cu^{2+}) может напрямую восстанавливаться на катоде; коагуляция/флокуляция, так как частицы оксидов/гидроксидов железа или алюминия, образовавшиеся из материала металлозагрузки, действуют как высокоактивный коагулянт, адсорбируют ионы тяжелых металлов из раствора, образуя хлопья; сорбция на диспергированных частицах, так как образуются частицы металла, имеющие огромную удельную поверхность; соосаждение и соокисление – под действием активных радикалов ионы-загрязнители могут переходить в менее растворимые формы (например, окисляться) и соосаждаться с основным осадком. Сочетание нескольких механизмов (коагуляция, сорбция, восстановление) обеспечивает высокую степень очистки. Технологически очень удачным является то, что образовавшиеся крупные хлопьевидные агрегаты (шлам), содержащие, например, тяжелые металлы, легко отделяются от очищенной воды в отстойнике или с помощью фильтрации, а очищенную воду относительно просто вывести из системы. Именно поэтому авторы практико-ориентированных работ [62, 67] проводят свои исследования в проточном реакторе, что критически важно для потенциального промышленного применения.

Несомненным экологическим преимуществом водоочистки с использованием искроэрозионного действия является отсутствие внешних химических коагулянтов или восстановителей, так как коагулянт генерируется in situ из диспергируемого материала, такой водоочистке присуща универсальность – одновременное удаление различных ионов (Cu, Zn, Ni) на одной стадии. На сегодня потенциальную сложность представляют следующие проблемы: необходима система удаления и утилизации загрязненного шлама, расход материала металлозагрузки – прекурсора коагулянтов неравномерный, для повышения эффективности водоочистки нужна дифференциация электротехнических параметров обработки в зависимости от состава загрязнителей (частота, напряжение, материал диспергируемых гранул). Тем не менее работы по водоочистке выводят искроэрозионный метод за пределы машиностроения и показывают эффективность применения искрового эрозионного диспергирования в химико-технологических процессах.

Первичной задачей эффективной водоочистки является достижение классической цели диспергирования, получение дисперсной фазы – продуктов эрозии (например, частиц Fe, Fe_2O_3, ионов Fe^{2+}/Fe^{3+}) в жидкости. Все вышеперечисленные работы по водоочистке [56–67] включают ключевые элементы электроэрозионной обработки в классическом, изначальном понимании: электроды – гранулы металла, диэлектрическая среда – водный раствор, источник импульсов – RLC-контур. Продуктами процесса искроэрозионного диспергирования в терминологии авторов здесь становятся с оглядкой на практическую цель наноколлоидные системы, активные продукты эрозии металла, суспензии. Исследователи переходят к определению синергидного эффекта суммы физических и химических явлений, сопровождающих искроэрозионное диспергирование, и переводят

результаты в практическую плоскость водоочистки.

Авторы [67], например, установили, что оптимальное время обработки (фактически длительность воздействия искр) составляет ~ 10 секунд для достижения нужной концентрации ионов, и исследовали, как объем обрабатываемой жидкости меняет pH, концентрацию и эффективность процесса нейтрализации гуминовых веществ. Статья детально анализирует, что происходит с продуктами эрозии после разряда. Железо окисляется ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$), взаимодействует с компонентами раствора (гуматами), образуя нерастворимые комплексы. Отдельно изучена активность полученной суспензии после воздействия импульсов, обнаружено, что продукты искровой эрозии остаются химически активными до 1 часа.

Таким образом, искроэрозионное диспергирование создает не просто порошок, а высокоактивные, с развитой поверхностью частицы, что крайне важно для применения в химико-технологических процессах, аддитивных технологиях или при получении композитов.

НОВЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Однако до сих пор масштабному внедрению метода мешает, в частности, недостаточная эффективность систем управления электроэрозионными установками. В некоторых работах последнего времени предметом исследований стали алгоритмы управления и контрольно-измерительные приборы автоматизированной системы управления в части процесса образования продуктов электрической эрозии. В [68] разработана математическая модель, описывающая случайный характер распределения электрических разрядов между металлическими гранулами в водном растворе, показано, что такое моделирование – ключевой этап для дальнейшей оптимизации энергопотребления искроэрозионного процесса в целом. Так как траектории разрядов носят стохастический характер, авторы используют метод вероятностных клеточных автоматов. Модель учитывает случайное расположение гранул, толщину водной пленки между ними и напряженность электрического поля. Разработанная модель позволяет рассчитывать количество и длину разрядных искр, проведена верификация модели на экспериментальных данных для двух межэлектродных расстояний (100 и 180 мм), расхождение составило около от 3 до 5%, что подтверждает адекватность модели. Показано, что с увеличением расстояния между электродами напряженность поля падает и разрядные каналы могут не достигать противоположного электрода, что снижает эффективность искровой эрозии. В [69] описывается адаптивно-прогнозная комплексная математическая модель процесса очистки воды искроэрозионным методом (включая термофизику эрозии и кинетику химических реакций), показано, как использовать созданную модель для оптимизации управления с целью снижения энергозатрат. Моделирование объединяет термофизическую модель (расчет массы эрозионных продуктов, образующихся на поверхности гранул при разряде, на основе параметров импульса: ток, напряжение, длительность) и кинетическую модель, которая описывает систему химических реакций окисления металла. Для поиска оптимальной длительности импульса, обеспечивающей максимальное количество высокодисперсных и реакционных частиц, использован экстремальный регулятор. Модель показывает расхождение с экспериментальными данными около 5%, использование экстремального регулятора позволило автоматически находить оптимальный режим работы, что дает возможность снизить энергопотребление на 18,6%.

Существует также подход к оптимизации процессов искроэрозионного диспергирования, основанный на технологической части электроразрядной установки. Авторы работы [70] провели эксперименты на реакторах разной геометрии с регистрацией электрических параметров, фотофиксацией разрядов и анализом полученных порошков. Установили, что выше определенной критической высоты слоя металлических гранул наблюдается резкое прекращение искрения, а слой металлозагрузки превращается в проводник короткого замыкания. Критическая высота увеличивается по мере роста частоты повторения импульсов в результате взаимного отталкивания гранул; на временную эволюцию энергии искрового разряда влияют накопление продуктов эрозии, вибрация, уплотняющая гранулированный слой и эрозионный износ металлических сфер-гранул. Влияние последнего фактора связано с минимальным уровнем условного начального напряжения (около 20 В) на контакте между частицами в кратчайшей цепочке таких контактов от одного электрода до другого. Вследствие эрозии размер частиц уменьшается, увеличивается расстояние между частицами и поддержание устойчивого продуктивного процесса электроискровой дезинтеграции требует либо повышения рабочего

напряжения разрядного генератора (что не является допустимым при применении полупроводниковой коммутирующей аппаратуры для обеспечения приемлемых по производительности частот следования разрядных импульсов), либо адаптивного уменьшения геометрических размеров реактора.

Статья [71] посвящена анализу энергетических характеристик транзисторного генератора импульсов в процессе искроэрозионного диспергирования токопроводящих гранулированных сред. Автор исследует энергоэффективность процесса в схеме, предусматривающей питание от транзисторного генератора импульсов. Вместо традиционной плоской используется цилиндрическая камера с соответствующей коаксиальной системой электродов, что позволяет уменьшить межэлектродные расстояния (20–35 мм) и улучшить распределение плазменных каналов, также в камере применяется механический перемешиватель для разрушения проводящих мостиков и активации поверхности гранул. Статья демонстрирует, что применение двухконтурного транзисторного генератора импульсов в сочетании с цилиндрической электродной системой позволяет повысить энергоэффективность процесса электроискрового диспергирования, особенно для материалов с различным межконтактным сопротивлением (Al, Ti).

Интересной с точки зрения применения в установках для искроэрозионного диспергирования является работа [72]. В статье подробно рассматриваются схемы генерации и управления высоковольтными импульсами, которые являются основой для питания электроэрозионных установок, анализируются различные типы преобразователей (инверторы, мостовые, полумостовые схемы), требования к ним (КПД, массогабаритные показатели, надежность) и способы регулирования процесса импульсной обработки сред. Сжато и полно освещены фундаментальные и прикладные аспекты создания системы генерации импульсов – ключевого узла любой электроэрозионной установки, включая установку для диспергирования.

Таким образом, развитие теории электрофизических процессов в гетерогенных токопроводящих средах для повышения эффективности искроэрозионного диспергирования происходит в направлении от игнорирования к изучению и учету вторичных процессов – газовых включений, кавитации, динамического изменения условий развития разрядных каналов между гранулами металла и т.д.

На основе приведенных в [73–76] идей предложены пути электроразрядной переработки псевдосплавов для получения из них порошков, исключающие сложные и дорогие химические и металлургические процессы. Изучено комплексное использование двух (электрогидравлического и электроискрового) механизмов действия на структурно неоднородное сырье, которым является материал псевдосплавов. Комплексное электроискровое и электрогидравлическое воздействие позволяет использовать ряд эффектов, связанных с отличием механических, теплофизических и электро-физических характеристик компонентов псевдосплава и взаимной интенсификацией низковольтных электроискровых и высоковольтных электрогидравлических процессов. Это позволяет улучшить гранулометрический и элементный состав диспергированного материала, уменьшить удельные энергозатраты, повысить производительность переработки. Определены зависимости импульсных и энергетических параметров искровых и высоковольтных разрядов от условий их реализации, в том числе для искровых – в виде формализации новых эмпирических зависимостей [73, 64], для электрогидравлических – известных полуэмпирических [76]. Для энергоэффективных режимов электроискровой дезинтеграции формализованы зависимости мгновенной электрической мощности и закономерность энерговведения в нагрузку. Это позволяет путем комбинирования напряжения, емкости и индуктивности регулировать гранулометрический состав порошкового продукта и увеличивать содержание фракций целевой размерности. Показано, что реализация электрогидравлического режима разрядов обусловлена комбинацией напряжения, емкости, межэлектродного расстояния и производной от них энергии в импульсе. Обоснованы целесообразные функциональные назначения комплексной электроразрядной обработки и режимов разрядов (измельчение фрагментов изделия из псевдосплава на частицы, прямая дезинтеграция на порошковые микрокомпо-ненты, разрыхление слоя частиц, разрушение и измельчение агломератов частиц, дезинтеграция электроэродированных микронеоднородностей на поверхностях частиц). Наиболее результативной по энергоэффективности, производительности и гранулометрическому составу порошкового продукта экспериментально определена совмещенная схема комплексирования электрогидравлической и электроискровой обработки псевдосплава вольфрам–никель–железо в одном реакторе. Определены пределы существования режимов, условия реализации и их взаимосвязь с импульсными и энергетическими параметрами обоих видов разряда соответственно функцио-

нальным назначениям в комплексных схемах дезинтеграции, обоснованы принципы построения соответствующих электротехнологических систем, включая реакторную часть и выбор рабочей жидкости. Аппаратная реали-зация метода комплексной электроразрядной дезинтеграции позволяет осуществлять последовательную, циклическую и совмещенную электроискровую и электрогидравлическую обработку токопроводящих материалов при широком варьировании электротехнических и энергетических параметров (искроэрозионная обработка – до 500 В, 7 Дж, 200 Гц, электрогидравлическая обработка – до 50 кВ, 2,5 кДж, 2 Гц). Совокупные для комплексного действия энергозатраты при получении смеси частиц порошка псевдосплава вольфрам–никель–железо с характерными размерами до 50 мкм составляют от 11,6 кВт·ч/кг, до 100 мкм – от 9 кВт·ч/кг, а прогнозируемая производительность на 1 $дм^3$ рабочего пространства реактора достигает 0,2 кг/ч.

Но для дальнейшего повышения энергоэффективности метода необходимо, учитывая взаимообусловленные физические процессы в рабочей среде, опираясь на амплитудное и частотное регулирование электродинамических параметров обработки, обеспечить углубление степени переработки материала и уменьшение количества гранул, которые в ходе электроискровой обработки эродировали до таких размеров, которые не позволяют продолжать их переработку. По итогам решения этой задачи необходимо осуществить структурный и параметрический синтез адаптивной системы управления процессом электроискрового диспергирования.

Таким образом, анализ современных исследований показывает, что проблема эффективного электроискрового диспергирования токопроводящих материалов как для получения порошковых материалов, так и для получения устойчивых коллоидных систем еще далека от окончательного решения как в теоретическом, так и практическом отношении. При этом необходимо опираться на результаты изучения комплекса междисциплинарных физических явлений, сопровождающих электроискровое диспергирование и сочетающих электрофизику, гидродинамику и материаловедение. Неочевидным, но существенным недостатком искроэрозионного диспергирования на данном этапе развития является технологический барьер – минимальный размер частиц-гранул, ниже которого реально проводить либо электроискровую дезинтеграцию с высоким качеством порошкового продукта, но очень низкой производительностью, либо с приемлемой производительностью и гранулометрически некондиционным порошковым продуктом. Таким образом, увеличение глубины переработки материала гранул металлозагрузки следует понимать как определение условий реализации, электродинамических параметров единичного электроискрового разряда, режимов и параметров непрерывной обработки, обеспечивающих уменьшение среднего характерного размера частиц-гранул, из которых можно сформировать металлозагрузку и осуществлять искроэрозионное диспергирование с приемлемыми производительностью, энергозатратами и высоким качеством порошкового продукта. На данный момент накопленных в этой области знаний недостаточно. В соответствии с результатами проведенного выше анализа наработок в области искроэрозионного диспергирования возможной видится реализация таких условий, при которых одновременно будет обеспечена высокая скорость нарастания электрической мощности и ограничена длительность разрядного импульса, что в комплексе способствует уменьшению масштабов гидродинамических возмущений в жидкой среде по отношению к межконтактному расстоянию для частиц-гранул данного размера. Реализация таких условий дезинтеграции позволит проводить обработку с высокими частотами следования разрядных импульсов и, соответственно, высокой производительностью, а также приведет к возникновению ряда благоприятных эффектов, например, к образованию псевдоразреженного, или псевдоожиженного слоя частиц. Но развитию метода в таком позитивном направлении мешает другой комплекс взаимосвязей: объем металлозагрузки–средний характерный размер частиц-гранул–условное минимальное напряжение на один контакт в межэлектродной линии частиц-гранул для активации электроискровых процессов в слое сталкивается с практическими ограничениями по классу полупроводниковых коммутаторов по напряжению. Самым слабым в этой цепи является третье звено (минимальное напряжение на один контакт), что обусловлено механизмами формирования искры и соответствующими процессами, которые были всесторонне рассмотрены и тщательно классифицированы автором работы [31]. Однако вопрос взаимной корреляции всех трех звеньев в масштабе слоя гранул для уменьшения условного минимального напряжения на один контакт остается открытым. Такая корреляция, очевидно, возможна путем создания благоприятных статических/начальных условий и организацией благоприятных динамических воздействий – внешних независимых и тех,

которые сопровождают сам разряд и связаны с такими его электродинамическими параметрами, как скорость нарастания мгновенной мощности разряда, скорость введения энергии в межэлектродный промежуток и момент прерывания этого процесса на участке роста электрической мощности.

ВЫВОДЫ

Развитие электроэрозионной обработки, начатое Б.Р. Лазаренко, заложило основы для создания целой технологической дисциплины и открыло новые перспективы в машиностроении и материаловедении.

Искроэрозионное диспергирование представляет собой перспективное направление электроэрозионной технологии, позволяющее получать высокодисперсные порошки и наноколлоидные системы с уникальными свойствами. Метод отличается универсальностью, экологичностью и возможностью переработки широкого спектра материалов, включая труднообрабатываемые сплавы и отходы производств.

К настоящему времени разработаны усовершенствованные математические модели, учитывающие нелинейность, стохастичность и параметрический характер нагрузки, что позволило оптимизировать конструкции разрядно-импульсных установок и повысить эффективность процесса.

Ключевыми факторами, влияющими на качество и производительность ИЭД, являются: динамические параметры разрядных импульсов (длительность, скорость нарастания тока, энергия); учет гидродинамических явлений (образование парогазовых полостей, кавитация, ударные волны), которые могут как интенсифицировать процесс, так и вносить нестабильность; геометрия и состояние поверхности отдельных гранул и металлозагрузки в целом; свойства рабочей жидкости; возможность управления электротехническими комплексами для искроэрозионного диспергирования согласно адаптивно-прогнозным моделям работы оборудования.

Практическая значимость ИЭД выходит далеко за рамки традиционного машиностроения. Метод успешно применяется для получения нанопорошков и функциональных покрытий с заданными свойствами, очистки воды от тяжелых металлов и органических загрязнений, что особенно актуально для энергетики и экологии, переработки вторичного сырья в ценные дисперсные продукты с высокой энергоэффективностью.

Несмотря на значительные достижения, остаются нерешенные задачи, сдерживающие широкое внедрение метода: технологический барьер, связанный с минимальным размером обрабатываемых гранул, при котором сохраняется высокое качество продукта и приемлемая производительность; необходимость дальнейшего повышения энергоэффективности и стабильности процесса за счет углубленного учета взаимосвязи электрических, тепловых, гидродинамических и химических явлений; создание адаптивных систем управления, способных компенсировать стохастический характер процесса и оптимизировать режимы в реальном времени.

Искроэрозионное диспергирование является важным и востребованным методом на стыке электрофизики, гидродинамики и материаловедения. Оно открывает уникальные возможности для создания новых материалов, решения экологических задач и реализации принципов циркулярной экономики. Дальнейшее развитие технологии требует комплексного междисциплинарного подхода, направленного на преодоление существующих ограничений и создание высокоэффективных, управляемых и масштабируемых промышленных установок.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б.Н., Об открытии и развитии электроэрозионной обработки материалов. К 60–летию открытия способа, *Электронная обработка материалов*, 2003, № 3, с. 4.
2. Benkovsky, I., Tsyntsaru, N., Silkin, S., Petrenko, V., et al., Wear and Corrosion of Novel Electrospark and Electrospark–Electrochemical Hybrid Coatings Based on Carbon Steels, *Lubricants*, 2023, № 11, p. 205–1. doi: 10.3390/lubricants11050205
3. Auchynnikau, Y.V., Mihailov, V.V., Chekan, N.M., Eisymont, Y.I., et al., The use of powder materials of highly hard compounds fortheformation of electric spark coatings for various functional purposes, *Vestnik of Brest State Technical University*, 2024, vol. 135, № 3, p. 74. doi: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-74-80.
4. Belevskii, S.S., Gotelyak, A.V., Ivashku, S.Kh., Kovalenko, K.V., et al., Anodic Dissolution of Surface Layers as a Means of Increasing the Microhardness of Alloy Coatings of Iron Group Metals with Tungsten Prepared by Induced Codeposition, *Surf Eng Appl Elect.*, 2023, vol. 59, № 5, p. 549. doi:10.3103/S1068375523050034.
5. Dikusar, A.I., and Belevskii, S.S., Macroscopic Size Effect in the Composition and Properties of Alloys of Iron Group Metals with Tungsten Prepared by

Induced Codeposition: Alloy Deposition Mechanism and Its Implications, *Surf Eng Appl Elect.*, 2023, vol. 59, № 6, p. 699. doi: 10.3103/S106837552306008X

6. Jonkus, G., Levinas, R., Tsyntsaru, N., and Cesiulis, H., Insights into the Electrochemical Synthesis and Supercapacitive Behaviour of 3D Copper Oxide-Based Nanostructures, *Solids*, 2025, vol. 6, № 2, p. 15–1. doi: 10.3390/solids6020015
7. Ribalko, A.V., Sahin, O., and Korkmaz, K., A modified electrospark alloying method for low surface roughness, *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, № 23, p. 3509. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.05.00
8. Gritsyuk, V., Smolentsev, E., Krokhin, D., and Pechagin, A., Non-abrasive finishing of mating surfaces of machine parts, *Materials Today: Proceedings*, 2021, v. 38, № 4, p. 1936. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.081.
9. Ujah, Ch.O., Von Kallon, D.V., and Aigbodion, V.S., High entropy alloys prepared by spark plasma sintering: Mechanical and thermal properties, *Materials Today Sustainability*, vol. 25, 2024, art. ID 100639. doi:10.1016/j.mtsust.2023.100639
10. Ming, W., Zhang, Sh., Zhang, G., Du, J., et al., Progress in modeling of electrical discharge machining process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 187, art. ID 122563. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.12256311
11. Nivin, V., and Franklin, R.J., A review of experimental investigations to attain productive and sustainable micro-electrical discharge machining process on metals and superalloys, *World Journal of Engineering*, 2023, vol. 22, №1, p. 1. doi: 10.1108/WJE–09–2023–0340.
12. Асанов, У.А., Цой, А.Д., Щерба, А.А., Казекин, В.И., *Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов*. Фрунзе: Илим, 1990. 256 с.
13. Захарченко, С.М., Шидловська, Н.А., Перекос, А.О., Захарченко, М.Ф., Енергоефективність електрофізичних методів диспергування та електрохімічного розчинення деяких металів, *Metallophysics and Advanced Technologies*, 2021, № 4, p. 465. doi: 10.15407/mfint.43.04.0465
14. Шидловська, Н.А., Захарченко, С.М., Зайцев, Є.О., Захарченко, М.Ф., Куліда, М.А., Потенціал використання технологічних викидів водню в енергетиці та хімічній промисловості, *Відновлювана енергетика*, 2025, № 3, с. 206. doi:10.36296/1819-8058.2025.3(82).204-217
15. Золотых, Б., Гноев, К., Тарасова, Е., О механизме электрической эрозии металлов в жидкой диэлектрической среде, *Проблемы электрической обработки металлов*, 1960, № 1, с. 58.
16. Лазаренко, Б., Лазаренко, Н., Современный уровень развития электроискровой обработки металлов и некоторые научные проблемы этой области, *Электронная обработка материалов*, 1957, № 1, с. 9.
17. Левченко, В., Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов, *Проблемы машиностроения*, 1992, № 38, с. 78.
18. Шидловский, А.К., Щерба, А.А., Муратов, В.А., Карвовский, В.Б., Повышение качественных показателей и стабилизация электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата, *Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий*, Комсомольск–на–Амуре: КнАПИ, 1986, с. 98.
19. Ho, K.H., and Newman, S.T., State of the art electrical discharge machining (EDM), *International journal of machine tools and manufacture*, 2003, vol. 13, № 43, p. 1287. doi: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7
20. Banu, A., and Ali, M.Y., Electrical discharge machining (EDM): a review. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2016, № 1, p. 3. doi: 10.26776/ijemm.01.01.2016.02
21. Kumar, S., and Gupta, T., A review of electrical discharge machining (EDM) and its optimization techniques, *Materials Today*, 2023, № 1, p. 3. doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.186.
22. Щерба, А., Супруновская, Н., Синицин, В., Иващенко, Д., Апериодические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке, *Технічна електродинаміка*, 2012, № 3, с. 009.
23. Щерба, А., Супруновская, Н., Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений, *Технічна електродинаміка*, 2012, № 5, с. 3.
24. Щерба, А., Супруновская, Н., Циклические переходные процессы в цепях электроразрядных установок с учетом влияния скорости нарастания разрядных токов и паузы между ними на сопротивление загрузки, *Технічна електродинаміка*, 2018, № 2, с. 003. doi: 10.15407/techned2018.02.003
25. Shcherba, A., Suprunovska, N., and Shcherba, M., Features of the formation of multi–channel pulse currents and fast–migrating electric sparks in the layer of current–conducting granules of electric–discharge installations, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 2, с. 003. doi:10.15407/techned2022.02.003
26. Щерба, А., Супруновская, Н., Иващенко, Д., Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения

при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке, *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, с. 023.

27. Щерба, А., Супруновская, Н., Иващенко, Д., Определение вероятностных свойств электрических характеристик цепей электроразрядных установок с учетом стохастически изменяющихся их параметров, *Технічна електродинаміка*, 2019, № 4, с. 003. doi: 10.15407/techned2019.04.003
28. Shcherba, A., Suprunovska, N., and Ivashchenko, D., Імовірнісні властивості електричних характеристик зарядного кола конденсатора із стохастичним активним опором, *Технічна електродинаміка*, 2018, № 6, с. 014. doi: 10.15407/techned2018.06.014
29. Suprunovska, N., Shcherba, M., Roziskulov, S., and Synytsyn, V., Підвищення динамічних характеристик електророзрядних установок, значно віддалених від іскроерозійного навантаження, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 3, с. 016. doi: 10.15407/techned2022.03.016.
30. Кучерявая, И., Мультифизические процессы при электроискровой обработке токопроводящих гранул, *Технічна електродинаміка*, 2017, № 5, с. 032. doi: 10.15407/techned2017.05.032.
31. Захарченко, С., Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозионным диспергированием их гранул в жидкости, *Технічна електродинаміка*, 2012, № 1, с. 016.
32. Захарченко, С.Н., Кондратенко, И.П., Перекос, А.Е., Залуцкий, В.П., Козырский, В.В., и др., Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2012, т. 60, № 5, с. 66.
33. Шидловська, Н., Захарченко, С., Дискретна нелінійно–імовірнісна модель еквівалентного електричного опору шару металевих гранул, *Технічна електродинаміка*, 2021, № 2, с. 003. doi: 10.15407/techned2021.02.003
34. Захарченко, С., Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока, *Технічна електродинаміка*, 2012, № 5, с. 017.
35. Шидловська, Н., Захарченко, С., Черкаський, О., Особливості перехідних процесів у колах другого порядку з нелінійною моделлю іскроерозійного навантаження в умовах примусового обмеження їхньої тривалості, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 6, с. 003. doi: 10.15407/techned2022.06.003
36. Шидловская, Н., Захарченко, С., Черкасский, А., Модель выходной цепи генератора разрядных импульсов с плазмоэрозионной нагрузкой, адекватная в широких диапазонах изменений их параметров, *Технічна електродинаміка*, 2015, № 6, с. 069.
37. Шидловська, Н., Захарченко, С., Черкаський, О., Моделювання перехідних процесів у розрядно–імпульсній системі оброблення гранульованих струмопровідних середовищ з використанням уточненої залежності їхнього опору від часу, *Технічна електродинаміка*, 2019, № 3, с. 003. doi: 10.15407/techned2019.03.003
38. Шидловская, Н., Захарченко, С., Переходные процессы в RLC-цепях с параметрической нагрузкой, *Технічна електродинаміка*, 2014, № 2, с. 003.
39. Захарченко, С.Н., Шидловская, Н.А., Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями, *Электронное моделирование*, 2012, № 5, с. 91.
40. Захарченко, С., Руденко, Ю., Черкасский, А., Повышение точности регулирования напряжения на емкостных накопителях энергии систем импульсной плазмоэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред, *Технічна електродинаміка*, 2016, № 6, с. 030. doi: 10.15407/techned2016.06.030
41. Шидловська, Н., Захарченко, С., Черкаський, О., Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень, *Технічна електродинаміка*, 2017, № 2, с. 005. doi: 10.15407/techned2017.02.005
42. Захарченко, С., Физическая модель гранулированной токопроводящей среды, *Технічна електродинаміка*, 2012, № 6, с. 019.
43. Шидловська, Н., Захарченко, С., Розвиток напівпровідникових розрядно-імпульсних систем обробки гранульованих струмопровідних середовищ. *Технічна електродинаміка*, 2020, № 3, с. 069. doi: 10.15407/techned2020.03.069
44. Lopatko, K., Zakharchenko, S., Zazymko, O., Nazarenko, V., and Vynarchuk, K., Using Electrospark Erosion Method to Obtain Metal Nanoparticles, *Proceedings of 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology Conference: October 07–11, 2024, Kharkiv, Ukraine*, 2024, p. 1. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878087
45. Shydlovska, N.A, Zakharchenko, S.M., Zakharchenko, M.F., Kulida, M.A., and Zakusilo, S.A., Spectral and optic–metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, № 6, p. 72. doi: 10.20998/2074–272X.2024.6.10

46. Shydlovska, N.A., Zakharchenko, S.M., Zakharchenko, M.F., Kulida, M.A., et al., Distribution of volumes of plasma channels components between metal granules in working liquids, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, № 1, p. 73. doi: 10.20998/2074–272X.2025.1.10

47. Petrichenko, S.V., Control of discharge plasma effective volume at the contact electrospark process in liquid, *Surf Eng Appl Elect.*, 2008, № 3, p. 169. doi: 10.3103/S1068375508030010

48. Петриченко, С.В., Підвищення продуктивності і стабілізація режимів об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині, *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*, 2010, № 18, с. 139.

49. Листовский, Д.И., Петриченко, С.В., Оптимизация режимов электроискрового диспергирования металлических гранул в жидкости по распределению энергии, выделившейся в элементах разрядной цепи, *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*, 2016, № 36, с. 58.

50. Petrichenko, S.V., Listovskii, D.I., and Kuskova, N.I., Stabilization of discharge pulses and peculiarities of spark load matching at electroerosive dispersion of metal and graphite granules in liquid, *Surf Eng Appl Elect.*, 2016, № 2, p. 134. doi: 10.3103/S1068375516020101

51. Petrichenko, S.V., Kuskova, N.I., and Listovskii, D.I., Comparison of the electrical characteristics of spark discharges in a layer of metal and graphite granules immersed in liquid, *Surf Eng Appl Elect.*, 2015, № 3, p. 240. doi: 10.3103/S1068375515030138

52. Ageeva, E.V., Ageev, E.V., and Karpenko, N.N., Structure and Properties of Titanium Powder Obtained by Electrodispersion of VT20 Alloy Waste in Alcohol, *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2025, vol. 54, p. 435. doi: 10.1134/S105261882570027X

53. Ageeva, E.V., Ageeva, A.E., and Bakhmudkadiev, N.D., Structure and Properties of a Titanium Powder Prepared by the Electrodispersion of VT20 Alloy Wastes in Distilled Water, *Russ. Metall.*, 2025, vol. 2025, p. 1521. doi: 10.1134/S0036029525702581

54. Kolbasov, G.Ya., Ustinov, A.I., Shcherba, A.A., Perekos, A.Ye, et al., Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti–Zr–Ni hydrogen storage alloys, *Journal of Power Sources*, 2005, vol. 150, p. 276. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.02.025

55. Rud, A., Schmidt, U., Kolbasov, G., Shcherba, A., et al., Atomic structure and hydrogen-storage properties of Ti-Zr-Ni compounds in various nanostructured states, *Metallofizika i noveĭshie tekhnologii*, 2005, vol. 027, p. 753.

56. Шидловский, А.К., Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей, *Энергетика и электрификация*, 2002, № 12, с. 34.

57. Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Лопатько, К.Г., Разрядно-импульсные системы производства наноколлоидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2010, т. 26, с.152.

58. Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Лопатько, К.Г., Афтандилянц, Е.Г., Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2009, т. 22, с. 74.

59. Шидловский, А.К., Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Жуйков, В.Я., Сосюрко, Ю.Н., Метод комплексной обработки воды объемным электроискровым диспергированием в ней коагулянтобразующих металлов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, 2000, т. 2, с. 68.

60. Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Савлук, О.С., Потапченко, Н.Г., Технологическая система объемного электроискрового обеззараживания воды: влияние параметров разрядов на антимикробный эффект, *Технічна електродинаміка*, 1998, № 2, с. 41.

61. Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Супруновская, Н.И., Янкович, В.М., Яцюк, С.А., Метод объемной электроимпульсной искрокоагуляционной обработки воды: достоинства, управление режимами и перспектива. *Технічна електродинаміка, Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, 2006, т. 2, с. 90.

62. Petrov, O., Petrichenko, S., Yushchishina, A., and Mitryasova, O., Electrospark method in galvanic wastewater treatment for heavy metal removal, *Applied Sciences*, 2020, № 10, p. 5148. doi: 10.3390/app10155148

63. Malyushevskaya, A., Petrichenko, S., Przystupa, K., Ivanov, A., et al., Influence of the Discharge Circuit Inductance on the Process of Galvanic Wastes Electrospark Purification, *Przeglad Elektrotechniczny*, 2024, № 10, p. 132−135. doi: 10.15199/48.2024.10.24

64. Malyushevskaya, A., Petrichenko, S., Ivanov, A., Mitryasova, O., and Salamon I., Improving the Efficiency of Water Purification from Heavy Metals by the Electric Spark Method, *Journal of Ecological Engineering*, 2024, № 25(8), p. 1. doi: 10.12911/22998993/189230

65. Шидловська, Н., Захарченко, С., Захарченко, М., Мазуренко, І., Куліда М., Фізичні і техніко-економічні аспекти сучасних методів підготовки

води для теплової та атомної енергетики, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 4, с. 069.
doi: 10.15407/techned2022.04.069

66. Щерба, А.А., Захарченко, С.Н., Супруновская, Н.И., Шевченко, Н.И., и др., Повышение энерго-эффективности электрофизических методов очистки сточных вод от органических загрязнений, *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, 2007, т. 5, с. 75.
67. Войно, Д.А., Лобанова, Г.Л., Юрмазова, Т.А., Шиян, Л.Н., Мачехина, К.И., Электроимпульсная обработка водных растворов гуминовых веществ в слое железных гранул. *Известия Томского политехнического университета, Инжиниринг георесурсов*, 2015, т. 326, № 10, с. 72.
68. Nadezhdin, I.S., Papasidero, D., Goryunov, A.G., and Manenti, F., Optimization of EDM process for water purification, *Chemical Engineering Transactions*, 2016, № 52, p. 325.
doi: 10.3303/CET1652055
69. Nadezhdin, I.S., Goryunov, A.G., and Manenti, F., Modeling distribution of electric discharge between metal balls in the aqueous solution, *Chemical Engineering Transactions*, 2017, № 61, p. 535.
doi: 10.3303/CET1761087
70. Kornev, Ya., Saprykin, F., Lobanova, G., Ushakov, V., and Preis, S., Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency, *Journal of Electrostatics*, 2018, № 96, p. 111.
doi: 10.1016/j.elstat.2018.10.008
71. Khrysto O.I., Analysis of energy characteristics of a transistor pulse generator in the process of electric spark dispersion of current–conductive granular media, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, № 5, p. 70.
doi: 10.20998/2074-272X.2025.5.10
72. Болотовский, Ю., Таназлы, Г., Вашкевич, Е., Никитин, А., Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии, *Силовая электроника*, 2008, № 4, с. 49.
73. Петриченко, С.В., Назарова Н.С., *Спосіб комбінованого електророзрядного диспергування металів і сплавів*, Україна пат. 158141, 2025. Бюл. № 1. 9 с.
74. Петриченко, С.В., Назарова Н.С., *Спосіб розрядно-імпульсної очистки стічних вод*, Україна пат. 155315, 2024. Бюл. № 7. 8 с.
75. Петриченко, С.В., Цолин П.Л., Ющишина А.Н., Электроискровая очистка гальваностоков от ионов тяжелых металлов в проточном реакторе, *Электронная обработка материалов*, 2020, т. 56, № 5, с. 109.
76. Malyushevskaya, A., Petrychenko, S., Przystupa, K., Mitryasova, et al., Optimizing energy efficiency of materials' electrodischarge dispersion as one sustainable development green trend, *Energies*, 2023, № 16 (20), p. 7098.
doi: 10.3390/en16207098.

Summary

A comprehensive analysis of electrospark dispersion (ESD) is presented – a highly efficient electrophysical method for producing ultrafine powders and colloidal systems from electrically conductive materials. The evolution of this branch of electroerosive machining is examined, starting from the fundamental works of B.R. Lazarenko. Particular attention is paid to the formation of multi-channel spark discharges in a layer of granules, the nonlinear stochastic nature of the load, the role of hydrodynamic phenomena, as well as thermal and thermomechanical effects. Current mathematical models describing transient processes in discharge circuits and methods for controlling pulse parameters to optimize particle size and product yield are summarized. A wide practical application of ESD is demonstrated not only in materials science for producing powders and functional coatings, but also in environmental technologies. Key technological barriers limiting the scaling-up of the method are identified. The review highlights the interdisciplinary nature of ESD, combining electrophysics, hydrodynamics, and materials science, and outlines directions for further research.

Keywords: electric spark erosion dispersion, electroerosion machining, nanopowders, pulse discharge technologies, mathematical modeling, water purification, materials recycling