

7. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ

УДК 621.313: 621.355: 537.528: 621.3.014.14: 621.3.011.72: 621.373.54

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СТАЛИ И ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ

И.В. Божко, канд. техн. наук, **С.Н. Захарченко**, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук, **Н.И. Фальковский**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Представлены основные научные результаты исследований отдела электромагнитных систем. Изложена суть исследований и приведены основные научные результаты, полученные в 2012 году. Библ. 29, рис. 9, табл. 2.

Ключевые слова: импульсный коронный разряд, электроэрозионная обработка, очистка воды, гидрозоли.

В 2012 году отдел электромагнитных систем проводил научные исследования в соответствии с рабочими планами по темам «Стример», «Объект» и «Сигма-ШЗ», охватывающие основные направления научной деятельности отдела:

- исследование закономерностей протекания электротермических и силовых процессов при комплексном взаимодействии электромагнитных и тепловых полей в средах с различными физическими свойствами;
- разработка и совершенствование математических моделей электротехнических устройств и методик расчета их электрических параметров и энергетических показателей;
- теоретическое и экспериментальное обоснование создания объемного импульсного электрического разряда атмосферного давления и подводного электроэрозионного разряда;
- разработка плазмохимических реакторов для генерации химически активных веществ в воздухе атмосферного давления и гидрозолей металлов в воде.

Кроме основных тем фундаментальных и прикладных исследований в отделе проводились работы по комплексным программам научных исследований НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)» и «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій».

В статье выполнен краткий обзор основных научных результатов, полученных за отчетный период.

Высоковольтные импульсные разряды на поверхность электропроводящей жидкости и их использование для очистки воды. Очистку воды электрическим разрядом можно вести различными способами. Но в общем, для того чтобы избежать больших омических потерь в воде и её электролиза, для обработки желательнее использовать короткие импульсы тока. Среди разрядов, контактирующих с водой, существует большое многообразие. Для сравнения и выбора того или иного вида разряда для очистки воды одним из общих и важнейших критериев служат удельные энергозатраты. Эта величина существенно зависит от вида загрязняющих примесей и разрядных условий, при которых осуществляется их разложение. Приводимые в литературе данные по электроразрядной очистке воды, как правило, получены при существенно отличающихся экспериментальных условиях. Поэтому сделать корректные выводы о целесообразности использования того или иного вида разряда весьма затруднительно.

Целью проводимых исследований было сравнение эффективностей надводных импульсных коронного и барьерного разрядов по очистке воды от устойчивых органических примесей с эффективностями в подобных условиях подводных разрядов и озонирования.

Экспериментальная установка. В состав экспериментальной установки входили две разрядные камеры, источник высоковольтных импульсов напряжения, комплекс для диагностики параметров разрядных импульсов и концентраций примесей в воде, а также устройства для озонирования воды, прокачки воздуха и воды через разрядные камеры и др.

Для обработки воды импульсным коронным разрядом (ИКР) использовалась разрядная камера РК1. В этой камере ИКР осуществлялся между плоским анодом, на котором размещены 230 коронирующих игл диаметром 0,2 мм, и слоем обрабатываемой жидкости (катодом). Расстояние между концами игл и поверхностью жидкости составляло 4 мм. Для увеличения площади контакта разрядной плазмы с поверхностью обрабатываемой жидкости и лучшего ее перемешивания на дне РК1 под водой располагался распылитель, который при прокачке через него воздуха с расходом ~ 1 л/мин обеспечивал прохождение через слой воды пузырьков газа диаметром $\sim 0,5$ мм и создавал на ее поверхности «псевдокипящий» слой.

Эффективность очистки воды импульсным барьерным разрядом (ИБР) изучалась в вертикально установленной разрядной камере РК2 с электродной геометрией «цилиндр – цилиндр». В камеру обрабатываемая жидкость поступала из резервуара, расположенного сверху над ней. ИБР осуществлялся в воздушном промежутке $\delta = 2,35$ мм между диэлектрическим барьером (стеклянной трубкой) и текущим тонким ($\sim 0,1$ мм) слоем воды на внутреннем цилиндрическом электроде.

Источник высоковольтных импульсов построен на принципе емкостного накопителя энергии с последующим его разрядом с помощью коммутирующего разрядника на разрядную камеру. Для записи разрядных токов $I(t)$ и напряжений $U(t)$ использовались приборы фирмы Tektronix: цифровой двуканальный осциллограф, индуктивный датчик тока Р6021 и резистивно-емкостный делитель напряжения Р6015.

В качестве модельных примесей к воде были выбраны существенно отличающиеся по своему строению органические красители: метиленовая синь $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (МС) и метилоранж $C_{14}H_{14}N_3O_3SNa$ (МО), относящиеся к группе ароматических соединений. Такие соединения – термодинамически устойчивые системы, слабо поддающиеся обычным видам очистки (биохимическому воздействию бактерий, микроорганизмов и др.).

Определение степени разложения примесей в изучаемых растворах производилось по абсорбции света на длинах волн $\lambda = 665$ нм (для МС) и $\lambda = 505$ нм (для МО). Для получения соответствующих коэффициентов поглощения света снимались абсорбционные спектры для заранее известных концентраций МС и МО.

Для сравнения эффективностей очистки воды исследуемыми импульсными разрядами с эффективностью традиционного озонирования также производилась обработка озонном модельного раствора с МС.

Результаты и анализ исследований. Для расчета энергетических эффективностей ИКР и ИБР следует знать величины энергий импульсов $W_{и}$ единичных разрядов. Величина $W_{и}$ определялась численным интегрированием

$$W_{и} = \int_0^{\tau_{и}} u(t) \cdot i_p(t) dt, \quad (1)$$

где $i_{p(t)}$ – разрядный ток в газовом промежутке; $\tau_{и}$ – длительность импульса тока. Значение разрядного тока вычислялось по выражению

$$i_p(t) = i(t) - i_c(t), \quad (2)$$

в котором $i_c(t)$ – емкостный ток через разрядный промежуток. Его величина для начального этапа времени разряда (до начала ионизации газа) оценивалась по выражению

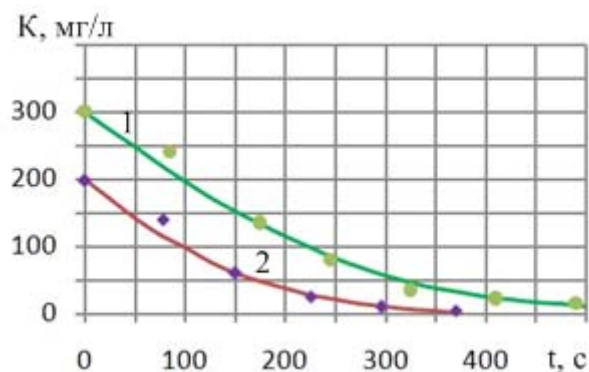


Рис. 1

$$i_c(t) = C_s du/dt, \quad (3)$$

где C_s – межэлектродная емкость разрядного промежутка (для камер РК1 и РК2 соответственно $C_{s1} = 10$ пФ и $C_{s2} = 65$ пФ). Вычисления показали, что $W_{и} = 0,1$ Дж для ИКР и $W_{и} = 0,12$ Дж для ИБР.

Изменение концентраций МС (кривая 1) и МО (кривая 2) в процессе обработки ИБР при частоте следования импульсов $f_{и} = 22$ Гц и объемах обрабатываемых растворов $V_p = 40$ мл показаны на рис. 1. Из него видно, что содержание примесей при больших их начальных концентрациях K вначале сравнительно быстро, а затем медленнее уменьшается почти до нуля за время обработки $t_{обр} \sim 500$ и 370 с (соответственно для МС и МО при их начальных концентрациях $K_0 = 300$ и 200 мг/л). При одинаковых исходных концентрациях $K_0 = 200$ мг/л: $t_{обр} \sim 400$ и 370 с, соответственно для МС и МО, что свидетельствует о примерно одинаковых скоростях очистки обоих растворов.

Показателем эффективности электроразрядной очистки воды является удельный энергетический выход Y (количество разложенного вещества на 1 кВт·ч энергии). Для условий данной работы эта величина равна

$$Y = \Delta M (f_{и} W_{и} t_{обр})^{-1}. \quad (4)$$

В уравнении (4) $\Delta M = (K_1 - K_2) V_p$ – количество разложенной примеси; $f_{и} W_{и} t_{обр}$ – затраченная на обработку энергия.

Исследования показали, что энергетический выход существенно зависит от удельного энерговклада W в обрабатываемую жидкость и концентрации примеси. Значения W_1 для ИБР рассчитывались по выражению

$$W_1 = f_{и} W_{и} Q^{-1}, \quad (5)$$

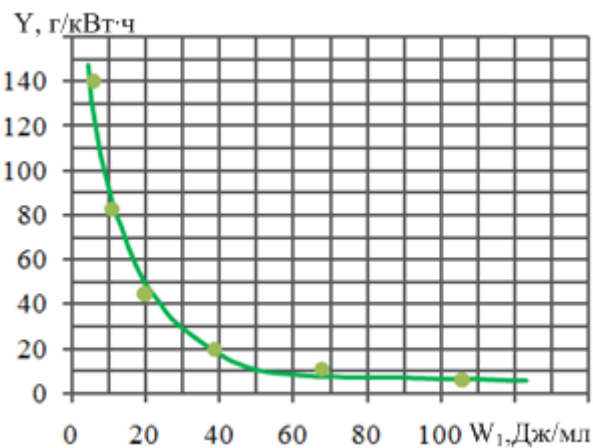
а при обработке ИКР удельный энерговклад W_2 находился по уравнению

$$W_2 = f_{и} W_{и} t_{обр} V_p^{-1}. \quad (6)$$

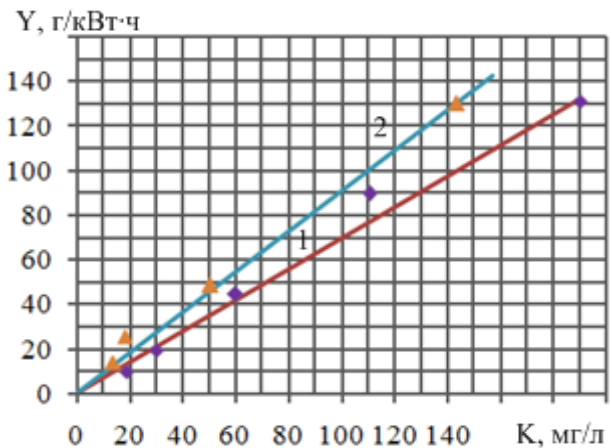
Примеры изменения Y для ИБР с изменением W_1 и K показаны на рис. 2 а, б. Зависимость $Y(W_1)$, показанная на рис. 2 а, получена при однократном прохождении жидкости с начальной концентрацией МС $K_1 = 300$ мг/л ($V_p = 40$ мл) через разрядную камеру при величинах $f_{и} = 20 \dots 250$ Гц и $Q = 0,2 \dots 0,7$ мл/с. После каждой такой обработки определялась концентрация примеси в обработанном растворе K_2 и соответственно по выражениям (4), (5) вычислялись значения Y и W_1 .

Из рисунка видно, что вначале с ростом W_1 от 5 до 50 Дж/мл значения Y резко уменьшаются со 140 до 10 г/кВт·ч, т.е. более чем на порядок. При дальнейшем увеличении W_1 с 50 до ≈ 110 Дж/мл значения Y снижаются лишь на 30 % (до ≈ 7 г/кВт·ч). Таким образом, из характера зависимости $Y(W_1)$ следует, что очистку воды целесообразно вести при возможно меньших удельных энерговкладах (~ 10 Дж/мл).

Зависимости $Y(K)$ также, как и зависимость $Y(W_1)$, были получены при однократном прохождении растворов. Однако в этом случае неизменным оставался удельный энерговклад $W_1 = 4$ Дж/мл, а начальные концентрации примесей изменялись в пределах $10 \dots 190$ мг/л через



а



б

Рис. 2

разрядную камеру. С увеличением начальной концентрации примеси величина Y линейно нарастает (рис. 2 б), причем для МО (прямая 2) круче, чем для МС (прямая 1), что свидетельствует о том, что при одинаковых условиях эффективность ИБР при разложении МО выше, чем при разложении МС. Это подтверждают также и расчеты по выражению (4), которые показывают, что средние значения Y для 90 % очистки воды (путем многократного ее пропускания через разрядную камеру) от примесей МС и МО при их начальных концентрациях 200 мг/л соответственно составляют 45 и 64 г/кВт·ч.

Сравнение энергетических выходов Y и степени очистки воды R , полученных при различных способах ее обработки, можно сделать на основании данных, приведенных в табл. 1. Значения R определялись по выражению $R = [(K_1 - K_2)/K_1] \cdot 100$ %. Из таблицы видно, что при одинаковых условиях ($K = 10$ мг/л, $W_1 = 7$ Дж/мл) как для МС, так и для МО величины Y для ИБР и ИКР примерно одинаковы. Однако при больших концентрациях примеси и удельных энергозатратах (МС, $K = 50$ мг/л, $W \geq 50$ Дж/мл) энергетический выход ИБР становится более чем в 4 раза выше, чем для ИКР.

По сравнению с подводными ИКР энергетические выходы ИБР и ИКР на поверхность воды на порядок выше. Низкие значения Y для подводных разрядов в основном связаны с большим удельным энергозатратом ($W \geq 100$ Дж/мл), который необходим для начала формирования ИКР в жидкости.

Таблица 1

Примесь	K , мг/л	Способ обработки	W , Дж/мл	R , %	Y , г/кВт·ч	Ссылка	Примечания (условия разряда и др.)
МС	10	ИБР	7	94	4,8	Исследов. авторов	На поверхн. воды
	10	ИКР	7	90	4,6	Другие работы	На поверхн. воды
	13	ИКР	-	94	0,68	Другие работы	В воде с катализатором
	50	ИКР	51	20	0,7	Исследов. авторов	На поверхн. воды
		ИБР	57	92	2,9		На поверхн. воды
		ИБР	4	78	35		На поверхн. воды
		озонир.	-	71	30		При 12 кВт·ч/кг O_3
МО	10	ИБР	7	98	5	Исследов. авторов	На поверхн. воды
	40	ИБР	7	98	20		"_"
	10	ИКР	7	90	4,6	Исследов. авторов	"_"
	40	ИКР	190	93	0,7	Исследов. авторов	В воде с продувкой O_2
	10	ИКР	120	99	0,3	Исследов. авторов	В воде

Эффективность электроразрядных технологий обычно принято сравнивать с эффективностью обработки воды озоном. Проведенные исследования показали, что при умеренных удельных энергозатратах и достаточно больших начальных концентрациях примесей (МС, МО) ИБР по энергетическим затратам может быть экономичнее озонирования. Это отражено в табл. 1, из которой видно, что при $W = 4$ Дж/мл, $K = 50$ мг/л величина Y для ИБР (35 г/кВт·ч) выше, чем при очистке озоном (30 г/кВт·ч). Энергетический выход при озонировании определялся по выражению

$$Y_{O_3} = \Delta M[(C_1 - C_2)q t_{обp} W_{уд}]^{-1}, \quad (7)$$

где C_1, C_2 – концентрация озона в воздухе соответственно на входе и выходе из сосуда Дрекселя; q – расход воздуха; $W_{уд}$ – удельные энергозатраты на генерацию озона. При вычислении по выражению (7) принималось значение $W_{уд} = 12$ кВт·ч/кг O_3 , которое является минимально возможным при генерации озона из воздуха в промышленном озонаторе. Следует отметить, что при выполняемом здесь сравнении величин Y для ИБР и озонирования не учитывались дополнительные при озонировании затраты энергии на барботирование озона в воде (для его растворения) и подготовку воздуха (осушку).

Выводы. Исследования по прямой очистке воды от устойчивых органических красителей импульсными электрическими разрядами на ее поверхность в сопоставимых условиях показали, что наибольшей эффективностью обладает барьерный разряд. Его энергетический

выход в несколько раз выше, чем у импульсного коронного разряда и на порядок выше, чем у подводного коронного разряда. Удельные выходы импульсного барьерного разряда при 90 % очистке воды от примесей метиленовой сини и метилоранжа с начальными концентрациями 200 мг/л составляют соответственно 45 и 64 г/кВт·ч. Для наиболее эффективного использования энергии обработку воды с такими примесями целесообразно вести при частотах следования разрядных импульсов 20...30 Гц. При удельных энергозатратах в обрабатываемую жидкость менее ≈ 4 Дж/мл энергетический выход импульсного барьерного разряда при очистке воды с примесью метиленовой сини становится выше, чем при ее очистке озонированием.

Особенности электромагнитных процессов импульсной электроэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред. Электромагнитные процессы, происходящие при протекании в гетерогенных токопроводящих средах импульсных токов, инициируемых специальными генераторами, являются основой ряда технологий. Одни из них – комплексная очистка и обеззараживание водных потоков, а также производство устойчивых к седиментации биологически активных ультрадисперсных золь металлов. Динамика данных процессов во многом определяет характер происходящих при этом физических и электрохимических явлений, а следовательно, свойства их продуктов. Повышение энергетической эффективности и стабильности указанных технологий и, как следствие, улучшение качества получаемой продукции, затруднительно без всестороннего изучения электрических характеристик гетерогенных токопроводящих сред и происходящих в них электрофизических явлений.

С этой целью в отделе развернуты работы по дальнейшему развитию теории электроимпульсных процессов в гетерогенных токопроводящих средах и получению коллоидных растворов химически активных металлов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана физическая модель минимального структурного элемента слоя металлических гранул в жидкости и определены зависимости ее эквивалентных электрических параметров от размеров характерных зон при различных частотах протекающего тока;
- на основе аппроксимаций экспериментальных зависимостей электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока разработаны их математические модели и эквивалентные электрические схемы замещения;
- экспериментально определены зависимости удельного электрического сопротивления вод различной степени очистки, а также гидрозольей *Cu*, *Al*, *Ag* как компонент гетерогенных токопроводящих сред от их температуры и напряженности приложенного электрического поля;
- исследовано влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц;
- на основе анализа переходных электромагнитных процессов в гетерогенных токопроводящих средах разработаны практические рекомендации, позволяющие повысить энерго- и ресурсоэффективность очистки водных потоков электроэрозионной коагуляцией.

Физическая модель гетерогенной токопроводящей среды детально описана в работе [6]. Гранулированные токопроводящие среды представляют собой упорядоченные и периодически повторяющиеся в пространстве структуры. Центральное сечение минимального элемента такой структуры, в полной мере сохраняющего ее электрофизические свойства, показано на рис. 3.

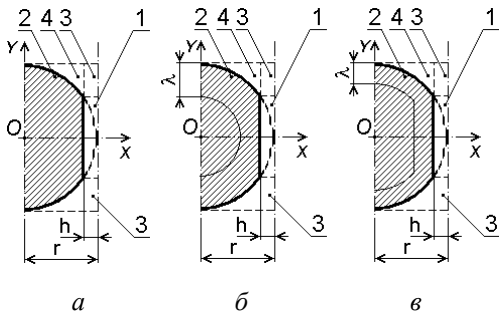


Рис. 3

Данный элемент включает в себя половину симметричной металлической гранулы (поз. 2, рис. 3) с прилегающими к ней областями искрового канала (поз. 1), которых в общем случае одновременно может существовать несколько, и рабочей жидкости (поз. 3 и 4). В рамках принятых в работе [6] допущений зависимость сопротивления металлической усеченной полусферы R_{MS} с удельным электрическим сопротивлением ρ_M (поз. 2) от ее геометрических размеров для случая, когда глубина скин-слоя λ превышает ее радиус r (рис. 3 а), имеет вид

$$R_{MS1} = \rho_M \int_0^{r-h} \frac{dx}{\pi(r^2 - x^2)} = \frac{\rho_M}{2\pi r} \ln \left| \frac{r+x}{r-x} \right|_0^{r-h} = \frac{\rho_M}{2\pi r} \ln \left| \frac{2r-h}{h} \right|. \quad (8)$$

В случае, когда глубина скин-слоя λ меньше, чем радиус сферы r , но больше, чем высота шарового сегмента h (рис. 3 б), формула (8) примет вид

$$R_{MS2} = \rho_M \left[\int_0^{r-\lambda} \frac{dx}{\pi\lambda(2r-\lambda)} + \int_{r-\lambda}^{r-h} \frac{dx}{\pi(r^2 - x^2)} \right] = \frac{\rho_M}{\pi} \left[\frac{r-\lambda}{\lambda(2r-\lambda)} + \frac{1}{2r} \ln \left| \frac{\lambda(2r-h)}{h(2r-\lambda)} \right| \right]. \quad (9)$$

Для случая, когда глубина скин-слоя λ меньше, чем радиус сферы r , и соизмерима с высотой шарового сегмента h , (рис. 3 в), формула (8) будет иметь вид

$$R_{MS3} = \rho_M \left[\int_0^{r-\lambda-h} \frac{dx}{\pi\lambda(2r-\lambda)} + \int_{r-\lambda-h}^{r-h} \frac{dx}{\pi(r^2 - x^2)} \right] = \frac{\rho_M}{\pi} \left[\frac{r-\lambda-h}{\lambda(2r-\lambda)} + \frac{1}{2r} \ln \left| \frac{(\lambda+h)(2r-h)}{h(2r-\lambda-h)} \right| \right]. \quad (10)$$

При этом если $\lambda \gg h$, то справедливо $\lambda + h \approx \lambda - h \approx \lambda$ и из выражения (10) следует (9), а если $\lambda = r$, то из (9) следует (8). Иными словами, формула (10) является наиболее общим случаем (9) и (8). В рамках допущений [6] проводимость жидкости зон 3 и 4 с удельной электропроводностью ρ_F рассчитывается как

$$\frac{1}{R_{FS}} = \frac{2\pi}{\rho_F} \int_{\sqrt{h(2r-h)}}^r \frac{ydy}{r - \sqrt{r^2 - y^2}} = \frac{2\pi r}{\rho_F} \left[\ln \left| r - \sqrt{r^2 - y^2} \right| + \frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \right]_{\sqrt{h(2r-h)}}^r = \frac{2\pi r}{\rho_F} \left[\ln \left| \frac{r}{h} \right| + \frac{h}{r} - 1 \right]. \quad (11)$$

Емкость зон 3 и 4 на рис. 3, заполненных жидкостью с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , рассчитывается как

$$C_{S34} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \int_{\sqrt{h(2r-h)}}^r \frac{ydy}{r - \sqrt{r^2 - y^2}} = 2\pi r \epsilon\epsilon_0 \left[\ln \left| \frac{r}{h} \right| + \frac{h}{r} - 1 \right]. \quad (12)$$

При определенных допущениях в работе [6] приведены формулы для оценки максимальных значений индуктивностей элементов физической модели рис. 1 для случаев ферромагнитных и неферромагнитных гранул. Зависимости от h и r электрического сопротивления R_{MS} полусфер Al и Fe , найденные по (9) и (10), а также общей индуктивности модели L_S при эквивалентной частоте основной гармоники импульсов $f=15$ кГц представлены на рис. 4. Сплошные линии соответствуют параметру $r=1$ мм, штриховые – $r=2$ мм, а обозначенные точками – $r=3$ мм.

Из рис. 4 следует, что при $h \rightarrow 0$ зависимости $R_{MS}(h)$ и $L_S(h)$ чрезвычайно чувствительны к изменению аргумента. Это определяется быстрым уменьшением площадей, перпендикулярных основному направлению тока сечений приконтактных зон полусфер и плазменного канала, что особенно заметно при больших значениях радиуса полусфер r . При низкой объемной плотности мощности импульса в единичном искрящем контакте, когда радиус основания искрового канала мал, сопротивление контакта велико, но стремительно падает при увеличении h . Рост h , как правило, происходит вследствие возрастания объемной плот-

ности мощности в контакте при увеличении тока через него. Для обеспечения стабильного режима работы таких нагрузок с круто падающей вольт-амперной характеристикой источник тока предпочтительнее, чем источник ЭДС. При малых h значения R_{MS} ферромагнитных металлов значительно превосходят аналогичные значения для неферромагнитных, что обусловлено, в первую очередь, различной глубиной скин-слоя в них.

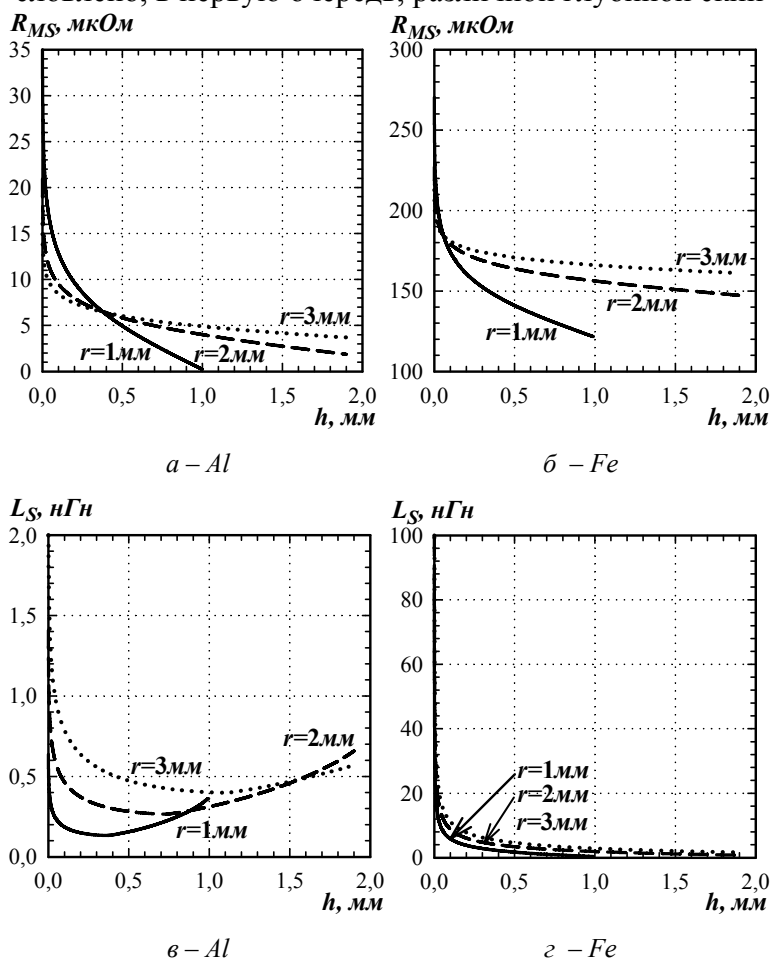


Рис. 4

мегагерц, для ферромагнитных – до десяти килогерц, а в режиме короткого замыкания – до сотен герц и единиц герц соответственно.

Зависимости от h и r электрического сопротивления R_{FS} водопроводной воды ($\rho_{H_2O}=24\text{ Ом}\cdot\text{м}$), используемой в опытах, найденные по (11), и емкости системы C_S ($\epsilon=81$), найденные по (12), представлены на рис. 5.

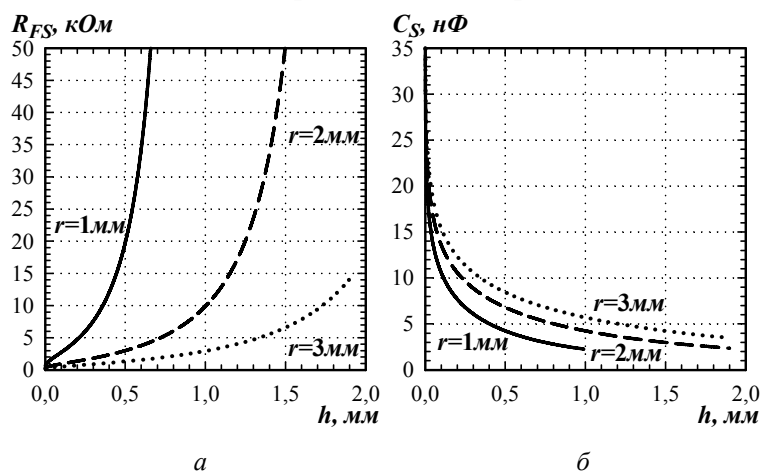


Рис. 5

Зависимости $L_S(h)$ для неферромагнитных материалов гранул (рис. 4 в) имеют минимумы при $h/r \approx 0,4$. При значениях $h < 0,4r$ основной вклад в суммарную индуктивность системы вносит индуктивность металлических полусфер, а при $h > 0,4r$ – индуктивность искрового канала, которая увеличивается с ростом его длины. В случае ферромагнитных материалов (рис. 4 г), индуктивность гранул на два порядка превосходит индуктивность искрового канала, поэтому увеличение последней с ростом h не влияет на монотонность убывания функции $L_S(h)$. Во всех рассмотренных случаях с увеличением r при тех же отношениях h/r суммарная индуктивность системы L_S растет. Это также объясняется наличием скин-эффекта и увеличением длины путей протекания тока с ростом r . Как показывают результаты расчетов [6], для неферромагнитных гранул в номинальном режиме индуктивность системы можно не учитывать в частотном диапазоне вплоть до единиц

При малых h активное сопротивление жидкости R_{FS} (рис. 5 а) относительно мало и стремительно возрастает с увеличением h . Увеличение радиуса металлических полусфер r при одних и тех же значениях h существенно снижает сопротивление жидкости в рассматриваемых зонах. Для минимизации электрохимического действия тока желательно работать с гранулами малого радиуса r при больших значениях h .

Зависимость емкости рассматриваемой системы C_S от h (рис. 5 б) стремительно убывает с ростом аргумента, что обусловлено увеличением расстояния между металлическими полусферами и уменьшением их эффективной площади. Увеличение радиуса металлических полусфер при одних и тех же значениях h приводит к незначительному росту емкости C_S , обусловленному увеличением эффективной площади обкладок эквивалентного конденсатора.

Эквивалентная электрическая схема замещения рассматриваемой системы в общем случае с учетом сказанного представлена на рис. 6. Источники противоЭДС E_S моделируют сумму соответствующих параметров $R-E$ – схем замещения искрового канала [4, 6] и сопротивления оксидных пленок на поверхности контактирующих гранул. Заметим, что в некоторых частных случаях как искровой канал, так и оксидные пленки могут отсутствовать. Идеальные диоды $VD1$ и $VD2$ отражают индифферентность параметров схемы замещения E_S к направлению протекания тока. Активное сопротивление R_S является суммой активных сопротивлений рассмотренных зон гранул R_{MS} и активных сопротивлений эквивалентных $R-E$ – схем замещения искрового канала и поверхностных оксидных пленок.

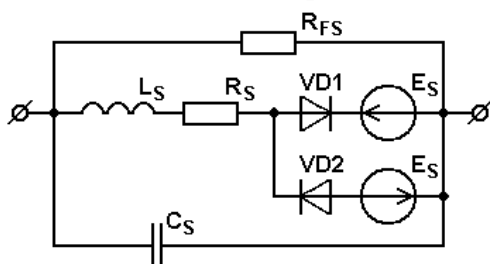


Рис. 6

Реальный объект моделирования обладает распределенными параметрами, поэтому при переходе к сосредоточенным параметрам на этапе построения схемы замещения учитывалось проверенное расчетами соотношение модулей сопротивлений элементов цепи: $X_{CS} > R_{FS} > R_S > X_{LS}$, что обусловило соединение элементов, представленное на рис. 6.

Предложенная эквивалентная электрическая схема замещения рассмотренной системы может быть использована также для идеального слоя, состоящего из n гранул вдоль направления протекания тока и m – поперек. При этом вместо R_{FS} необходимо подставить $R_{FL} = 2nR_{FS}/m$, вместо C_S – $C_{SL} = mC_S/2n$. Остальные параметры элементов схемы замещения могут быть вычислены аналогично с учетом вероятностного характера образования каналов протекания тока и искровых каналов в каждой из рассмотренных систем (рис. 3) слоя.

Математическая модель зависимости сопротивления гетерогенных токопроводящих сред R от протекающего в них импульсного тока i детально описана в работе [4]. При моделировании использовался следующий подход. По 30 усредненным парам синхронных осциллограмм напряжения на нагрузке и тока в ней, снятым в одном режиме, строилась экспериментальная зависимость сопротивления среды от протекающего в ней тока. Исходя из формы полученного графика, выбирались следующие классы аппроксимирующих функций: алгебраические полиномы, гиперболические полиномы, функции на основе экспоненциальных и функции на основе логарифмических, всего 15 функций. При определении оптимальных значений их коэффициентов использовались критерии минимума корня среднеквадратичного отклонения экспериментального и приближенного значений σ , минимума наименьшей средней суммы относительных погрешностей δ_{cp} , минимума средней суммы модулей относительных погрешностей $|\delta|_{cp}$ и интегральный критерий минимума средневзвешенной суммы трех первых критериев:

$$\beta = \frac{100\%}{3} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} + \frac{\delta_{cp}}{\delta_{\max}} + \frac{|\delta|_{cp}}{|\delta|_{\max}} \right), \quad (13)$$

где σ_{\max} – максимальное значение корня среднеквадратичного отклонения экспериментального и приближенного значений среди всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшего σ ; δ_{\max} – максимальное значение средней суммы относительных погрешностей экспериментального и приближенного значений среди всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшей δ_{cp} ; $|\delta|_{\max}$ – максимальное значение средней суммы модулей относительных погрешностей экспериментального и приближенного значений среди

всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшей $|\delta|_{\text{ср}}$.

Введение интегрального критерия β позволило минимизировать недостатки, присущие в отдельности каждому из трех первых критериев. Так, первый критерий обеспечивает малую среднюю абсолютную разницу значений эксперимента и аппроксимирующей функции, но допускает их большие расхождения на участках с малыми значениями функции. Второй критерий позволяет избежать таких ситуаций, однако допускает взаимную компенсацию погрешностей с разными знаками, что ухудшает качество аппроксимации. Третий критерий позволяет устранить данный недостаток, но также как и второй, может приводить к плохим совпадениям на участках с большими значениями функции.

Затем предложенные функции анализировались с точки зрения качества аппроксимации по всем четырем критериям, наличия особых точек в рассматриваемом диапазоне, удобства интегрирования и дифференцирования, а также физического смысла их коэффициентов. Наилучшей из рассмотренных аппроксимирующих функций оказалась функция на основе гиперболического полинома первой степени:

$$R = \frac{R_{FS}(R_S + E_S|i|^{-1})}{R_S + E_S|i|^{-1} + R_{FS}}. \quad (14)$$

Функция (14) полностью описывает зависимость эквивалентного электрического сопротивления цепи (рис. 6) от протекающего в ней тока для случаев постоянного тока, а также токов низких и средних частот. На рис. 7 полными треугольниками показаны экспериментальные точки зависимости $R(i)$, сплошной линией – функция (14), точками – гиперболический полином степени 0,5, штриховыми – степени 1,5. Коэффициенты всех функций подбирались по критерию минимума β (13). Из рис. 7 видно, что увеличение степени гиперболической функции сдвигает ее график ближе к центру координат и осей от экспериментальных значений, ухудшая показатели качества аппроксимации. Уменьшение ее степени приводит к обратному эффекту. Из рассмотренных в работе [2] степеней гиперболических функций 0,5, 1, 1,5 и 2 оптимальной степенью для приближения данной зависимости является первая степень.

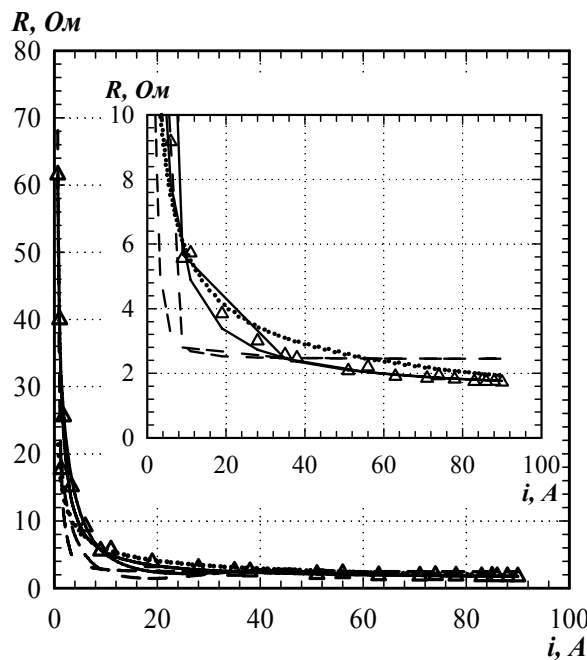


Рис. 7

Учет сопротивления рабочей жидкости с помощью параметра R_{FS} (14) позволил не только повысить точность аппроксимации, но и избежать особой точки гиперболических полиномов при $i=0$. В уравнении (14) сопротивление жидкости представлено постоянной величиной. Однако на практике оно зависит от целого ряда параметров: состава и концентрации примесей, температуры жидкости, характера процессов на электродах, напряженности электрического поля и других.

При расчете энергетических параметров импульсов тока в большинстве случаев проводимостью рабочей жидкости можно пренебречь ввиду относительно малой ее величины. Однако в технологических процессах получения устойчивых к седиментации золь металлов она влияет на перераспределение токов между плазменными каналами и жидкостью. Наличие токов в жидкости обуславливает протекание электрохимических процессов, способных существенно ухудшить качество получаемых золь.

Влияние напряженности внешнего электрического поля и температуры на удельное электрическое сопротивление электроэрозионных гидрозоль металлов исследова-

лось в работе [3] в однородных электрических полях. На рис. 8 представлены зависимости удельного сопротивления вод различной степени очистки и золой на их основе от напряженности постоянного электрического поля. Индекс *c* соответствует водопроводной воде, *d* – дистилляту, *b* – бидистилляту, *p* – золям *Cu*, *Al*, и *Ag*, полученным электроэрозионным диспергированием их гранул, *i* – электрохимическим растворением, цифра 0 – свежеполученным, цифра 7 – семидневым.

Из рис. 8 видно, что удельное электрическое сопротивление всех исследуемых объектов имеет тенденцию уменьшения с ростом напряженности внешнего электрического поля. Это проявляется особенно ярко при низких значениях его напряженности (до 4 кВ/м, что соответствует напряжениям до 208 В на электродах измерительной ячейки). Причем чем более чистая вода, тем плавнее спад её удельного электрического сопротивления с ростом напряженности внешнего электрического поля (рис. 8).

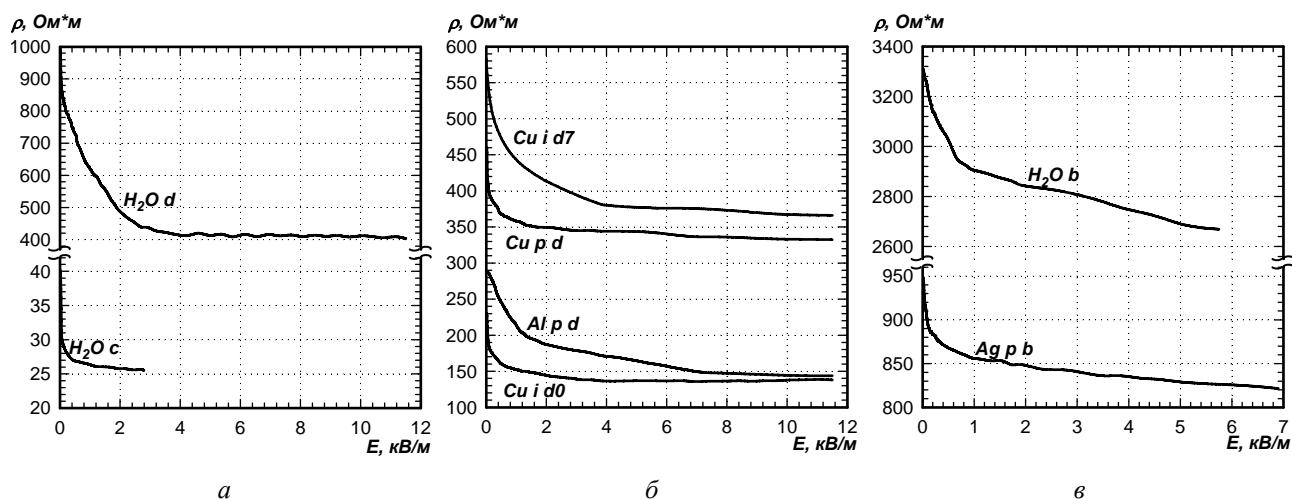


Рис. 8

Снижение удельного электрического сопротивления рассматриваемых объектов, наблюдаемое с ростом напряженности внешнего электрического поля, можно объяснить следующими причинами. Во-первых, наличием электродных потенциалов, влияние которых особенно заметно при малых напряжениях. Во-вторых, возможным уменьшением степени гидратации ионов в сильных электрических полях, приводящей к увеличению их подвижности. В-третьих, возможным увеличением степени диссоциации рассматриваемых электролитов в сильных полях, из чего следует увеличение концентрации свободных носителей заряда. Для существенного уменьшения влияния электрохимических процессов и повышения качества электроэрозионных гидрозолей металлов необходимо выбирать режимы с напряжениями до 100 В и использовать переменный ток. При этом использовать дистиллят двойной перегонки и ограничивать концентрацию эрозионных частиц.

С ростом температуры удельное электрическое сопротивление чистого дистиллята (рис. 9 а), свежего насыщенного раствора ионов *Cu* (рис. 9 б) и семидневого раствора ионов *Cu* (рис. 9 в), полученных электрохимическим растворением анода в дистилляте, уменьшается. Это вызвано увеличением с ростом температуры воды ее константы диссоциации и растворимости большинства примесей, следовательно, концентрации ионов, а также уменьшением вязкости, а значит, увеличением подвижности ионов. Полученные зависимости в исследованном диапазоне напряжений *U* могут быть описаны выражением

$$\rho_T = \rho_{T_0} / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (15)$$

где ρ_T – удельное электрическое сопротивление раствора при температуре T , Ом·м; ρ_{T_0} – удельное электрическое сопротивление раствора при температуре $T_0 = 25^\circ\text{C}$, Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$.

В используемой ячейке напряжению $U=100$ В соответствует напряженность поля $E=1923$ В/м. Значение температурного коэффициента сопротивления для аппроксимирующей

функции (15) для чистого дистиллята составило $0,024 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, для свежего раствора ионов Cu в дистилляте – $0,0096 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, для семидневного раствора Cu – $0,015 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, а для электроэрозионного золя Cu – $0,022 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для улучшения качества получаемых гидрозолей необходимо ограничивать температуру их получения до $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

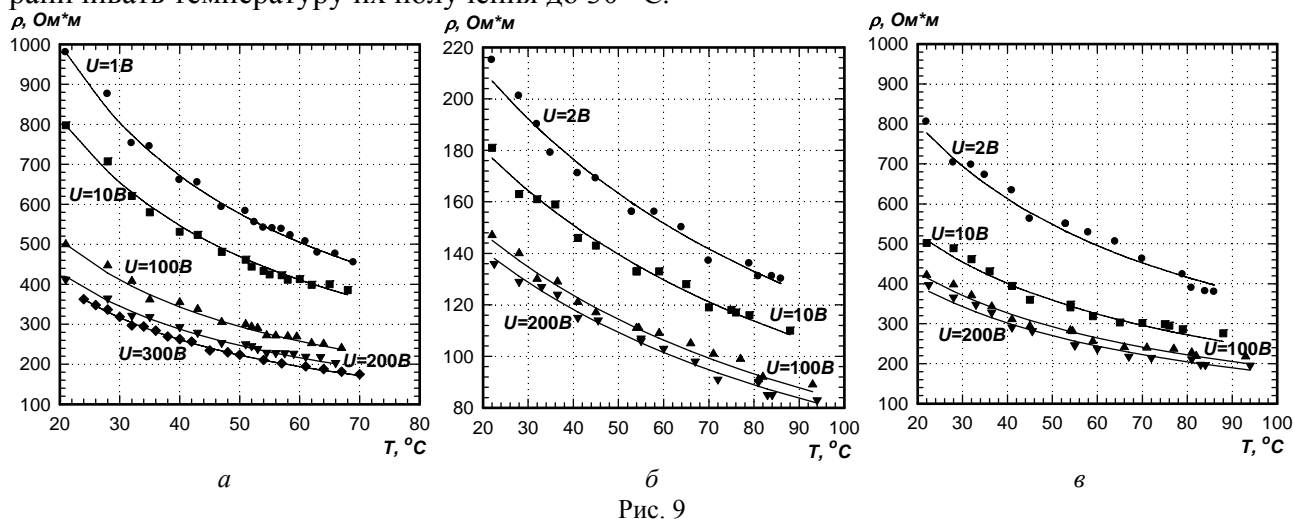


Рис. 9

Повышению устойчивости золей к седиментации способствует снижение размеров их дисперсной фазы. Одним из параметров, влияющих на размер электроэрозионных частиц, является длительность импульсов тока. В работе [7] совместно с сотрудниками Института металлофизики НАН Украины рассмотрено влияние длительности разрядных импульсов квазитрапецеидальной формы в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц. В табл. 2 приведены параметры разрядных импульсов, при которых получены образцы (длительность импульсов τ_p , амплитуда напряжения U_m , амплитуда тока I_m , энергия одного импульса E_p и средняя за время протекания тока в нагрузке мощность P_p), их химический состав и размеры областей когерентного рассеяния D_{OKP} различных фаз.

Таблица 2

№ образца	Параметры импульсов					Химические элементы, вес. %						D_{OKP} , нм	
	τ_p , мкс	U_m , В	I_m , А	P_p , кВт	E_p , мДж	C	O	Si	Ca	Cr	Fe	$\alpha\text{-Fe}$	Fe_3O_4
1	0,5	280	37	10,4	5,2	1,93	4,69	0,46	0,3	1	91,62	33	48
2	1	270	43	11,6	11,6	1,67	3,54	0,33	0,27	0,85	93,34	54	59
3	5	265	45	11,9	59,6	0,63	0,96	0,33	–	0,91	97,16	54	120

Сокращение длительности разрядных импульсов с 5 до 0,5 мкс приводит к уменьшению размеров областей когерентного рассеяния как металлического ядра (с 54 до 33 нм), так и окисной оболочки (со 120 до 48 нм) электроэрозионных частиц железа. В то же время доля оксидов в них возрастает с 15 до 78 %. При рассмотренных импульсах образуются полидисперсные частицы железа с размерами до 3 мкм, водные дисперсии которых не обладают агрегативной и седиментационной устойчивостью [7].

Дальнейшее снижение размеров электроэрозионных частиц обеспечивает применение принудительной механической активации слоя исходных гранул в процессе их диспергирования [5, 27–29]. Данный подход позволяет расширить область устойчивой работы оборудования в сторону низких напряжений, увеличить эквивалентное сопротивление слоя вследствие увеличения среднего расстояния между соседними вибрирующими гранулами, осуществить высокочастотную модуляцию импульса тока и повысить скорость миграции плазменных каналов по поверхности гранул. Применение данного подхода позволяет снизить долю развитых искровых каналов и как следствие уменьшить размеры крупной фракции частиц Al

в процессах электроэрозионной коагуляционной очистки воды до 2,4 раза, а их массовую долю до 1,3 раза [5]. При получении биологически активных водных суспензий *Ag* и *Cu* данный подход позволяет снизить размеры дисперсной фазы до 10 – 200 нм, получить устойчивые к агрегации и седиментации коллоидные растворы для дальнейшего использования в растениеводстве, животноводстве [27–29].

Выполненные работы по изучению электроэрозионного разряда позволили сделать следующие выводы:

1. В результате моделирования показано, что омическое сопротивление металлических гранул не является основной компонентой активного сопротивления всего их слоя в случае возникновения в нем искровых каналов. Установлено, что уменьшение их размера способствует снижению электрохимического действия тока в рассматриваемой среде. С учетом электрофизических и геометрических параметров элементов физической модели определены частотные диапазоны, в которых необходимо учитывать либо можно пренебречь реактивными элементами эквивалентной схемы замещения.

2. Предложен интегральный критерий поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующих, применение которого позволило повысить качество аппроксимации во всем диапазоне изменения аргумента функции. Показано, что наилучшими функциями, аппроксимирующими зависимость мгновенных значений сопротивления слоя металлических гранул от протекающего в нем тока, являются функции на основе гипербол первой степени.

3. Удельное электрическое сопротивление рассмотренных вод, золь и растворов в описанных условиях существенно (до 50 %) снижается с ростом приложенного напряжения в диапазоне от 1 до 200 В. Поэтому для эффективного снижения токов утечки через жидкость, которые способствуют электрохимическому растворению анода и гранул, а также снижению скорости нарастания токов в искровых каналах между гранулами, рекомендуется работать в режимах пониженных (до 100 В) напряжений электрических импульсов.

4. Температурная зависимость удельной электропроводности исследуемых объектов в рассмотренных условиях с достаточной точностью описывается линейной функцией. Снижение удельного электрического сопротивления чистого дистиллята, вызванное повышением температуры в диапазоне от 20 до 70 °С, может составлять более 50 %. Для улучшения качества получаемого продукта необходимо ограничивать температуру золь в технологическом аппарате величиной 30 °С.

5. Степень очистки исходной воды во многом определяет удельное электрическое сопротивление получаемых на ее основе золь. Для получения качественных продуктов необходимо использовать дистиллят как минимум двойной перегонки и не допускать высокой концентрации в нем продуктов эрозии, например, ограничив время искроэрозионного процесса либо применяя режимы с протоком рабочей жидкости.

6. Для устранения электрохимического растворения анода и металла гранул необходимо вместо униполярных импульсов тока использовать импульсы без постоянной составляющей, а площадь электродов в идеальном случае не должна превышать площади контактирующей с ними поверхности слоя гранул.

7. Сокращение длительности разрядных импульсов до субмикросекундного диапазона способствует уменьшению максимальных размеров электроэрозионных частиц железа до 3 мкм, но не является достаточным условием для получения устойчивых к седиментации их водных дисперсий.

8. Применение принудительной механической активации слоя исходных гранул в процессе их диспергирования позволяет расширить область устойчивой работы оборудования в сторону низких напряжений, увеличить эквивалентное сопротивление слоя, осуществить высокочастотную модуляцию импульса тока и повысить скорость миграции плазменных каналов по поверхности гранул. Это позволяет снизить долю развитых искровых каналов, уменьшить размеры эрозионных частиц, повысить энерго- и ресурсоэффективность электроэрозионной коагуляции, а также получить устойчивые к седиментации биологически

активные водные суспензии *Ag* и *Cu* для дальнейшего использования в растениеводстве и животноводстве.

Результаты выполненных научных исследований по фундаментальным и прикладным темам использованы для создания новой электрофизической аппаратуры, внедренной в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Результаты теоретических исследований легли в основу сформулированных технических предложений ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод» по созданию электротехнического оборудования металлургического назначения, а также запросов на открытие финансирования по целевым комплексным программам НАН Украины.

За отчетный период опубликованы 24 статьи и тезисы докладов на конференциях, а также получены пять патентов на изобретения и полезные модели.

1. Божко И.В., Жильцов А.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Фальковский Н.И. Электромагнитные системы в технологии непрерывного литья стали и электроразрядные системы для обеззараживания и очистки воды // Пр. Ин-ту электродинамики НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 32. – С. 67–76.
2. Волканин Е.Е., Кондратенко И.П., Некрасов А.В. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 28–41.
3. Захарченко С.Н. Влияние напряженности внешнего электрического поля и температуры на сопротивление искроэрозионных гидрозолей металлов // Пр. Ин-ту электродинамики НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 33. – С. 113–120.
4. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 17–27.
5. Захарченко С.Н. Особенности электромагнитных процессов в установках искроэрозионной коагуляции для систем водоподготовки тепловых сетей и агрегатов // Новини енергетики. – 2012. – № 6. – С. 41–48.
6. Захарченко С.Н. Физическая модель гранулированной токопроводящей среды // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 19–26.
7. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекоп А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6, №5(60). – С. 66–72.
8. Кириленко А.В., Чехун В.Ф., Кондратенко И.П., Подольцев О.Д., Кучерявая И.М., Бондар В.В. Движение магнитных наночастиц в потоке жидкости при наложении постоянного магнитного поля // Доп. НАН України. – 2012. – № 2. – С. 186–196.
9. Кондратенко И.П., Березюк А.О. Визначення геометричних параметрів розрахункової моделі циліндричного індуктора для нагріву феромагнітних труб // Наук. вісн. НУБіП України. Серія: «Техніка та енергетика АПК» – 2012. – № 174, Ч. 1. – С. 125–130.
10. Кондратенко И.П., Березюк А.О. Застосування електричних теплогенераторів індукційного типу в замкнених системах опалювання // Наук. вісн. НУБіП України. Серія: «Техніка та енергетика АПК» – 2012. – № 174, Ч. 2. – С. 229–234.
11. Кондратенко И.П., Березюк А.О., Комарчук Д.С., Лисенко В.П. Індукційна установка для термообробки зерна ріпаку // Вісн. аграрної науки. – 2012. – Вип. 12. – С. 55–58.
12. Кондратенко И.П., Божко І.В., Жильцов А.В., Васюк В.В. Моделювання електрофізичних процесів в електродній системі неруйнівного визначення залишкових напружень // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. статей за результатами, отриманими 2010-2012 р. Наук. керівник академік Б.Е. Патон. – К.: ІЕЗ ім Е.О. Патона НАН України. – 2012. – № 2. – С. 420–425.
13. Кондратенко И.П., Жильцов А.В., Васюк В.В. Математичне моделювання електрофізичних процесів в системах оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 21–22.
14. Кондратенко И.П., Мазманян Р.О. Пространственные спектральные характеристики планарных систем с постоянными магнитами // Електромеханічні і енергетичні системи. – 2012. – № 1(17). – С. 119–124.
15. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Ващишин Д.Д. Динамічна модель лінійного генератора з постійними магнітами для перетворення енергії хвиль // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 113–114.
16. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Ващишин Д.Д. Електромеханічне перетворення енергії в плоскому лінійному генераторі з постійними магнітами // Пр. Ин-ту электродинамики НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 33. – С. 39–45.

17. Лобанов Л.М., Кондратенко И.П., Пащин Н.А., Черкашин А.В., Миходуй О.Л. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений // Автоматичне зварювання. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
18. Фальковський М.І, Божко І.В. Засоби вимірювання імпульсних струмів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 33. – С. 100–105.
19. Чехун В.Ф., Кириленко А.В., Бондар В.В., Лукьянова Н.Ю., Тодор І.Н., Кондратенко І.П., Кучерявая І.Н., Подольцев А.Д. Нанокompозиты как средство решения современных проблем в онкологии // III Междунар. науч. конф. «Наноструктурные материалы. – 2012: Россия – Украина – Беларусь», 19–22 ноября 2012 г., Санкт-Петербург.
20. Чехун В.Ф., Кириленко А.В., Бондар В.В., Лукьянова Н.Ю., Тодор І.Н., Кондратенко І.П., Кучерявая І.Н., Подольцев А.Д. Моделирование движения магнитных наночастиц в потоке жидкости при воздействии внешнего магнитного поля // III Междунар. науч. конф. «Наноструктурные материалы. – 2012: Россия – Украина – Беларусь», 19–22 ноября 2012 г., Санкт-Петербург.
21. Пат. України на корисну модель 65562. Пристрій для обробки біологічних об'єктів у змінному електромагнітному полі / І.П. Кондратенко, А.В. Петренко, Р.С. Кришук; Опубл. 12.12.2011; Бюл. № 23.
22. Пат. України на корисну модель 67861. Пристрій для створення високоградієнтного магнітного поля в лунках біологічного планшету / О.В. Кириленко, В.Ф. Чехун, І.П. Кондратенко, О.Д. Подольцев, І.М. Кучерява, В.В. Бондар, Н.Ю. Лук'янова, Д.В. Демаш, І.К. Хаєцький; Опубл. 12.03.2012; Бюл. № 5.
23. Пат. України на корисну модель 72029. Пристрій для вимірювання магнітної сприйнятливості магнітних рідин / О.В. Кириленко, В.Ф. Чехун, І.П. Кондратенко, О.Д. Подольцев, І.М. Кучерява, В.В. Бондар, Н.Ю. Лук'янова, І.М. Тодор; Опубл. 10.08.2012; Бюл. №15.
24. Пат. України на корисну модель 72030. Спосіб вимірювання магнітної сприйнятливості магнітної рідини / О.В. Кириленко, В.Ф. Чехун, І.П. Кондратенко, О.Д. Подольцев, І.М. Кучерява, В.В. Бондар, Н.Ю. Лук'янова, І.М. Тодор; Опубл. 10.08.2012; Бюл. № 15.
25. Пат. України на корисну модель 96809. Установка для обробки насіння сільськогосподарських культур в електричному полі високої напруги / О.М. Берека, Л.С. Червінський, Г.Б. Іноземцев, І.П. Кондратенко, І.В. Божко, С.М. Усенко; Опубл. 12.12.2011; Бюл. № 23.
26. Bondarevskiy C.L., Kondratenko I.P., Tolmachev S.T. Considering the problem of Modeling Magnetic Particles motion Process in Nonuniform Magnetic Field // Вісн. Криворізького нац. ун-ту: Наук. зб. – 2012. – Вип. 32. – С. 224–228.
27. Lopatko K.G., Melnichuk M.D., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.N. Metallic Nanoparticles in Plasma-erosion Electrical Discharges in Liquid Mediums. I. Optical Emission Spectroscopy // Proc. of the VIII International Conference “Electronics and Applied Physics”, Kyiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kiev, Faculty of RadioPhysics, October 24–27, 2012. – P. 166–167.
28. Lopatko K.G., Melnichuk M.D., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.N. Metallic Nanoparticles in Plasma-erosion Electrical Discharges in Liquid Mediums. II. Energy Relaxations // Proc. of the VIII International Conference “Electronics and Applied Physics”, Kyiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kiev, Faculty of RadioPhysics, October 24–27, 2012. – P. 168–170.
29. Veklich A.N., Lopatko K.G., Aftandilyants Y.G., Zakharchenko S.N., Boretskij V.F. Nanoparticle generation by plasma-erosion discharge in liquid environment // Proc. of the VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Minsk, Belarus, September 17–21, 2012, Vol. 2. – P. 495–498.

УДК 621.313: 621.355: 537.528: 621.3.014.14: 621.3.011.72: 621.373.54

І.В. Божко, канд. техн. наук, **С.М. Захарченко**, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкін**, докт. техн. наук, **М.І. Фальковський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Електромагнітні системи у технології безперервного лиття сталі та електророзрядні системи для знезараження та очищення води

Представлено основні наукові результати досліджень відділу електромагнітних систем. Викладено сутність досліджень та наведено основні наукові результати, отримані в 2012 році. Бібл. 29, рис. 9, табл. 2.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, електроерозійна обробка, очищення води, гідрозолі.

I.V. Bozhko, S.N. Zaharchenko, I.P. Kondratenko, A.P. Raschepkin, N.I. Falkovsky

The Institute of Electrodynamics National Academy of Science, Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

Electromagnetic systems in technology for continuous casting of steel and electric discharge system for disinfection and treatment of water

Presents the main results of research of department of electromagnetic systems. Set out the essence of research and the basic scientific results obtained in 2012. References 29, figures 9, tables 2.

Key words: pulse corona discharge, spark erosion processing, water purification, hydrosols.

Надійшла 24.04.2013
Received 24.04.2013