

## № 7. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ

УДК 537.523.3:621.3.011.72

### ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ

**І.В. Божко**, канд. техн. наук, **С.М. Захарченко**, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко**, чл.-кор. НАН України, **М.І. Фальковський**, канд. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
 e-mail: dep7ied@ukr.net

*Наведено нові результати, отримані у відділі електромагнітних систем ІЕД НАН України в 2014 році при виконанні електрофізичних досліджень електророзрядних процесів у воді. Запропоновано методику розрахунку опору розрядного проміжку з водяними шарами та встановлено адекватність нелінійної моделі еквівалентного опору гранульованих струмопровідних середовищ. Досліджено енергетичну ефективність імпульсного бар'єрного розряду при обробці води в крапельному стані, що містить органічні домішки. Визначено, що одними з найбільш суттєвих чинників, які впливають на енергетичний вихід розряду, є розмір крапель та коефіцієнт заповнення ними розрядного проміжку. Виявлено особливості діафрагмового розряду у формуванні плазмових факельних утворень. Встановлено їх відмінність від розрядних каналів лінійного і коронного розрядів у воді. Бібл. 18, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** нелінійний опір, гранульовані струмопровідні середовища, імпульсний бар'єрний розряд, обробка води, краплі, енергетичний вихід, діафрагмовий розряд, феноменологічні особливості.

**Нелінійні моделі електричного опору гранульованих струмопровідних середовищ.** Виникнення плазмових каналів у гранульованих струмопровідних середовищах (ГСПС) внаслідок підведення енергії від генератора імпульсів є фізичною основою технологічних процесів одержання дисперсних порошків металів і сплавів, гідрозолей біологічно активних металів, а також знезараження та очищення природних і стічних вод [2, 6, 16, 17]. Параметри перехідних електромагнітних процесів у ГСПС багато в чому визначають параметри продукції, яку отримують, тому важливим завданням залишається розробка їх адекватних моделей [5, 11]. У рамках розробки нелінійної моделі опору ГСПС без урахування його стохастичних [3] і параметричних [8] змін у роботі [5] було показано, що одним з найкращих наближень залежності їх опору від струму є функція на основі гіперболи першого ступеня. Пошук оптимальних значень її коефіцієнтів в [5] проведено для аперіодичного розряду конденсатора на таке навантаження при амплітуді напруги на ньому  $U_m=155$  В. Цей режим був наближений до оптимального для очищення стічних вод методом плазмоерозійної коагуляції за допомогою  $Al(OH)_3$  [2, 5, 6, 12].

**Методика визначення оптимальних значень коефіцієнтів функції, яка апроксимує залежність електричного опору ГСПС від протікаючого у ньому струму.** Відповідно до методики, описаної в [5, 11, 12], були зняті 11 типових синхронних осцилограм напруги на шарі занурених у водопровідну воду гранул алюмінію, а також струму в ньому при розряді конденсатора  $C$  ємністю 50 мкФ для різних значень початкової напруги. Амплітуда напруги на навантаженні  $U_m$  регулювалася в діапазоні від 36 до 390 В, а індуктивність розрядного контура  $L$  становила 1,8 мкГн. Алюмінієві гранули мали квазісферичну форму радіусом  $r = 0,002$  м. Їх шар мав форму прямокутного паралелепіпеда довжиною  $l_L=0,056$  м, шириною  $b_L=0,022$  м і висотою  $h_L=0,05$  м.

Для апроксимації залежності еквівалентного електричного опору ГСПС від протікання в них струму використовувалася запропонована в [5] функція на основі гіперболи першого ступеня:

$$R(i) = R_F \left( R_1 + E_1 |i|^{-1} \right) / \left( R_1 + E_1 |i|^{-1} + R_F \right), \quad (1)$$

де  $E_1$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що має фізичний зміст напруги джерела проти-ЕРС в еквівалентній електричній  $E$ - $R$ -схемі заміщення шару металічних гранул з плазмовими

каналами між ними [5], В;  $R_1$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що має фізичний зміст лінійної складової опору шару гранул, включеної послідовно з джерелом  $E_1$  в еквівалентній  $E$ - $R$ -схемі заміщення, Ом;  $R_F$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що має фізичний зміст опору технологічної рідини, яка оточує гранули, як складової опору ГСПС, яке з'єднане паралельно з віткою  $E1$ - $R1$  в еквівалентній схемі заміщення, Ом.

Для пошуку оптимальних значень коефіцієнтів апроксимуючих функцій використовувалися такі критерії:

1) мінімального значення відносного стандартного відхилення оцінки експериментальних  $x_j$  та наближених  $x_{A_j}$  значень в масиві з  $N$  елементів [11]:

$$\min[\nu[x, x_A]] = \min \left[ \sqrt{N \cdot \sum_{j=1}^N (x_j - x_{A_j})^2} / \sum_{j=1}^N x_j \right] = \min[\sigma[x, x_A] / M[x]]; \quad (2)$$

2) мінімального значення середньої в розглянутому масиві суми модулів відносних похибок експериментального і наближеного значень величини  $x$ :

$$\min[\delta[x, x_A]] = \min \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |(x_j - x_{A_j}) / x_j| \right]; \quad (3)$$

3) мінімального значення інтегрального критерію якості апроксимації [11]:

$$\min[\beta_2[x, x_A]] = \min[(\nu[x, x_A] + \delta[x, x_A]) / 2]. \quad (4)$$

Використання кожного з перерахованих критеріїв пошуку оптимальних значень коефіцієнтів апроксимуючих функцій (2)...(4) має як переваги, так і недоліки, детально описані в [5, 11]. Для знаходження оптимальних значень коефіцієнтів апроксимуючих функцій по кожному з критеріїв (2)...(4) використовувався модуль *Solver* програмного пакета *Excel*. При цьому кількість експериментальних точок, що визначає кількість рівнянь системи для пошуку значень коефіцієнтів апроксимуючої функції, становила кілька десятків, що значно перевищує кількість коефіцієнтів апроксимуючих функцій. У такому випадку складно аналізувати поведінку коефіцієнтів апроксимуючої функції при зміні аргументу в широких межах.

Для виходу з такої ситуації використовувався наступний підхід [11]. По-перше, були знайдені нульові наближення значень коефіцієнтів функції в результаті розв'язання системи рівнянь, складених для характерних точок залежностей, які досліджуються (межі діапазону, локальні екстремуми та інфімуми), число яких дорівнювало числу коефіцієнтів функції (1). По-друге, відповідно до фізичного змісту коефіцієнтів функції (1) були накладені обмеження на діапазон зміни їх значень, а значення деяких з них були розраховані на підставі даних, отриманих експериментально, та аналізу літературних джерел.

Підбір оптимальних значень коефіцієнта  $E_1$  формули (1) обмежувався діапазоном від мінімального теоретично можливого значення напруги виникнення плазмового каналу в системі алюмінієвий анод - вода - бульбашка водню - катод  $E_{1\min} = 15,24$ , що визначається як сума потенціалу іонізації атома водню 13,54 В і електродного потенціалу  $\text{Al}|\text{Al}^{3+}$ , рівного 1,7 В [10], до округленого в менший бік цілого значення відношення амплітуди напруги імпульсу до мінімальної напруги виникнення плазмового каналу  $\text{Int}[U_m / E_{1\min}]$ . При цьому верхня межа  $E_1$  змінювалася східчато на 15,24 В при кожному наступному збільшенні амплітуди напруги, якщо воно складало більше 15,24 В. Додатково накладалася умова, що значення  $E_1$  для більш високої амплітуди напруги імпульсів не може бути менше, ніж значення  $E_1$  для більш низької амплітуди. Значення коефіцієнта  $R_1$  формули (1), виходячи з аналізу даних [12], обмежувалися в діапазоні від 0,1 до 45 Ом, а опір води, яка оточувала гранули,  $R_F$  розраховувався виходячи з залежності її питомого опору  $\rho_F$  від миттєвих значень напруги на електродах  $u$  [4] і конфігурації заповненого нею простору [5]. Для апроксимації залежності  $\rho_F(u)$  на підставі даних [4] у роботі [11] була запропонована функція

$$\rho_F(u) = \rho_{F0} + \rho_{F1} / u^{a_F}, \quad (5)$$

де  $\rho_{F0}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що має фізичний зміст питомого опору при ве-

ликих значеннях прикладеної напруги, які не призводять до пробою або випаровування рідини, Ом·м;  $\rho_{F1}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що має фізичний зміст приросту питомого електричного опору при нарузі 1 В у порівнянні з його значенням при високих напругах, Ом·м· $\sqrt[{\alpha_F}]{B}$ ;  $\alpha_F$  – коефіцієнт апроксимуючої функції. Значення коефіцієнтів функції (5), знайдені за критерієм (4), склали:  $\rho_{F0}=25,32$  Ом·м;  $\rho_{F1}=14,79$  Ом·м· $\sqrt[{\alpha_F}]{B}$ ;  $\alpha_F=0,7189$ . При цьому середня сума модулів відносних похибок експериментального і наближеного значень (3) не перевищила 1,1 %.

Для визначення опору води увесь займаний нею простір було розділено на дві зони. Перша зона простору між електродами поверх шару гранул являла собою прямокутний паралелепіпед, і опір його обчислювався як

$$R_{FL1}(u) = \rho_F(u) \cdot l_E / b_E \cdot (h_E - h_L), \quad (6)$$

де  $l_E$  – відстань між плоскими електродами, рівна довжині шару гранул  $l_L = 0,056$  м;  $b_E$  – ширина електродів, рівна ширині шару гранул  $b_L = 0,022$  м;  $h_E$  – висота електродів, рівна 0,078 м.

Друга зона простору складалася з  $m_S = \text{Int}[l_L/r]$  з'єднаних послідовно вздовж напрямку струму та  $n_P = \text{Int}[b_L/2r] \cdot \text{Int}[h_L/2r]$  з'єднаних паралельно елементарних об'ємів води, оточуючих півсферу металевої гранули, кожен з яких, згідно з допущенням, прийнятим в [7], був обмежений бічними поверхнями коаксіальних циліндрів, з одного торця – поверхнею півсфери з відсутнім ерозійним сегментом з радіусом  $r_1$  і висотою  $h$ , а з іншого – площиною [7]. Радіус зовнішнього циліндра дорівнює радіусу гранули  $r$ , а радіус внутрішнього – радіусу ерозійного сегмента  $r_1$ . Опір елементарного об'єму рідини такої форми, згідно з [7], може бути розраховано за формулою

$$R_{FL2S} = \rho_F(u) / 2\pi r \left[ \ln \left| \frac{r}{h} \right| + \frac{h}{r} - 1 \right]. \quad (7)$$

Виходячи зі спрощеної форми ерозійного сегмента [7], знайдемо його висоту через його радіус і радіус гранули:

$$h = r - \sqrt{r^2 - r_1^2}. \quad (8)$$

Для кожного з дев'яти досліджених режимів плазмоерозійної обробки поверхні алюмінієвих гранул, які відрізнялися амплітудою напруги імпульсів, в описаних вище умовах [5, 12] під оптичним мікроскопом були визначені діаметри п'яти ерозійних лунок. У першому наближенні залежність цих діаметрів від амплітуди напруги імпульсів в описаних умовах була апроксимована функцією  $r_1 \approx k_r \cdot U_m$ . Значення емпіричного коефіцієнта  $k_r$ , знайдене за критерієм  $\min[\beta_2[r_1, r_{1A}]]$  (4), у даному конкретному випадку склало  $2,051 \cdot 10^{-6}$  м/В [11].

З урахуванням виразів (5), (7), (8) і викладеного вище опір води, що знаходиться в просторі між гранулами  $R_{FL2}$ , визначається за формулою

$$R_{FL2}(u, U_m) = \frac{-\text{Int}[l_L/r] \cdot (\rho_{F0} + \rho_{F1}/u^{\alpha_F})}{\text{Int}[b_L/2r] \cdot \text{Int}[h_L/2r] \cdot 2\pi r \left[ \ln \left( 1 - \sqrt{1 - (k_r U_m / r)^2} \right) + \sqrt{1 - (k_r U_m / r)^2} \right]}. \quad (9)$$

Ця залежність при наведених значеннях параметрів представлена на рис. 1 точками, штриховою лінією представлена залежність від миттєвого значення напруги опору води, що знаходиться над шаром гранул  $R_{FL1}$ , яка розрахована за формулою (6) з урахуванням (5), а суцільною лінією – залежність від прикладеної напруги еквівалентного опору обох з'єднаних паралельно зон простору, заповненого водою:  $R_{FF4}(u) = R_{FL1}(u) \cdot R_{FL2}(u) / (R_{FL1}(u) + R_{FL2}(u))$ . Зауважимо, що цей вираз є справедливим для імпульсів з амплітудою напруги від 40 В, при яких виникають наскрізні канали провідності між гранулами від електрода до електрода. У протилежному випадку загальний опір всієї рідини визначається з виразу (6). Як видно з рис. 1, опір  $R_{FL2}$  збільшується зі зростанням напруги, крім того, він на порядок менший, ніж  $R_{FL1}$ , тому є визначальним при їх паралельному з'єднанні. Ось чому опір всього шару води збільшується зі зростанням напруги, тоді як її питомий опір падає.

На рис. 2 штрих-пунктирною лінією показана залежність від амплітуди напруги значень середніх для кожного імпульсу сум модулів відносних похибок експериментального і наближеного за формулою (1) значень миттєвого опору ГСПС, знайдених за критерієм (3), для випадку, коли коефіцієнти (1) не підбиралися окремо для кожного імпульсу, а були оптимальними для імпульсу з амплітудою напруги 155 В [5, 11]. Очевидно, що мінімальне значення середньої суми модулів відносних похибок експериментального і наближеного значень опору ГСПС цієї залежності спостерігається при значенні амплітуди напруги 155 В, для якого і були розраховані оптимальні значення коефіцієнтів (1). Зі збільшенням відхилення амплітуди напруги від значення 155 В як у бік збільшення, так і у бік зменшення, така похибка зростає, що особливо помітно при напругах, менших 100 В (65 % від 155 В) і більших 320 В (206 % від 155 В), де вона перевищує допустиме для оціночних розрахунків значення. Цей факт обумовлює необхідність дослідження залежності оптимальних значень коефіцієнтів апроксимуючої функції (1) від амплітуди напруги імпульсів, що істотно підвищує адекватність нелінійної моделі опору таких середовищ [11].

Суцільною лінією на рис. 2 показана залежність від амплітуди напруги середніх для кожного імпульсу сум модулів відносних похибок експериментального і наближеного (1) значень опору ГСПС  $\delta[R, R_A]$ , знайдених згідно з (3). У цьому випадку для кожного з досліджених  $n = 11$  імпульсів були знайдені свої оптимальні значення коефіцієнтів апроксимуючої функції (1) за критерієм (3). Точками на рис. 2 показана залежність від амплітуди напруги для кожного імпульсу параметра нев'язки  $\beta_2[R, R_A]$  (4) апроксимацій функцією (1) значень миттєвого опору ГСПС. У даному випадку для кожного з досліджених  $n = 11$  імпульсів були знайдені свої оптимальні значення коефіцієнтів апроксимуючої функції (1) за критерієм (4).

**Обробка імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані.** Серед нових методів очищення води, які зараз розробляються, одним з перспективних напрямків є використання так званих *advanced oxidation processes* – *AOP's* (передових окислювальних процесів) [14]. Основною ідеєю *AOP's* є введення енергії (наприклад, хімічної, електричної, радіації) безпосередньо в зону реакції, для того щоб генерувати високоактивні частинки. Інтерес до використання електророзрядних технологій, як одних з технологій *AOP's* для очищення води від органічних забруднювачів, значно зріс, оскільки було доведено, що вони мають високу ефективність та не шкодять навколишньому середовищу. При електричному розряді виникають різні фізичні та хімічні ефекти, серед яких найбільш вагомими є генерація окислюючих частинок (радикали Н, О, ОН, молекули  $H_2O_2$ ,  $O_3$  тощо). Особливе значення для обробки води має утворення гідроксильного радикалу ОН, який має окислювальний потенціал 2,7 В, котрий значно вищий, ніж у такого сильного окислювача, як озон (2,1 В). Серед електричних розрядів найбільш енергетично вигідними є імпульсні коронний та бар'єрний розряди в газі, коли одним з електродів є поверхня води, що обробляється [1, 9, 14, 18], або у водоповітряній суміші [9, 13]. У вологому повітрі концентрація ОН у стримерах може досягати значних величин ( $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) і навіть перевищувати концентрацію озону  $O_3$ , але час життя цих радикалів дуже обмежений. Через  $\approx 10$  мкс після закінчення розрядного імпульсу концентрація ОН починає стрімко знижуватися і за кілька сотень мікросекунд зменшується на два порядки. Якщо радикали ОН утворюються безпосередньо поблизу поверхні води, цього часу може бути достатньо для їх переходу з газової фази у воду з наступним окисленням розчинених у ній забруднень. Враховуючи дуже короткий час життя радикалів ОН, товщина шару

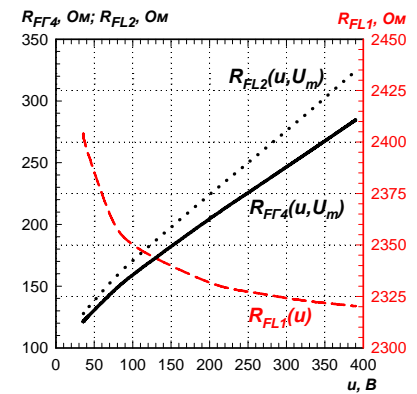


Рис. 1

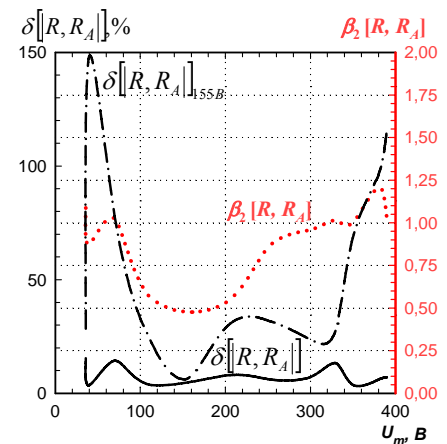


Рис. 2

води, в якому проходить її обробка, буде надто малою. Тому для ефективного використання в процесі обробки води генерованих у розряді радикалів ОН бажано мати якомога більший фактор  $\alpha$ , який характеризує співвідношення площі поверхні оброблюваної води  $S$  до її об'єму  $V$ :  $\alpha = S/V$ . На практиці для отримання великих значень  $\alpha$  найбільш прийнятною є обробка води при її стіканні тонким шаром товщиною  $\delta$  по вертикальній стінці [1, 18], або у вигляді крапель малого діаметру  $d_k$  [9, 13, 15]. Для першого варіанту  $\alpha_n = 1/\delta$  і при мінімальному значенні  $\delta \approx 0,15$  мм, яке було досягнуто в експериментах,  $\alpha_n = 6,67$  мм<sup>-1</sup>. Для другого варіанту  $\alpha_k = 6/d_k$  і при характерному розмірі крапель води  $d_k = 5,5 \cdot 10^{-2}$  мм, які були отримані за допомогою ежектора [13], фактор  $\alpha_k = 109$  мм<sup>-1</sup>, тобто  $\alpha_k \gg \alpha_n$ .

Таким чином, слід було б очікувати, що обробка імпульсним розрядом води в крапельному стані може бути більш ефективною, ніж обробка плівки води. Але результати досліджень [13] показали, що енергетичні затрати на очищення води від фенолу ІКР в аерозольному і «плівковому» реакторах (для яких фактори  $\alpha$  відрізняються на два порядки), майже однакові.

Робіт, в яких дослідження обробки води в крапельному стані проводилися б при застосуванні імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) [9, 15], небагато. Проте цей розряд вигідно відрізняється від ІКР тим, що він відбувається при більш однорідному та суттєво вищому середньому електричному полі в розрядному проміжку, що забезпечує більш ефективне використання енергії, яка вкладається в розряд [11]. Але для того щоб запобігти при практичному використанні занадто високим напругам (>30 кВ), ширина розрядного проміжку при ІБР не повинна перевищувати кількох міліметрів ( $\approx 5$  мм). Це створює певні труднощі, бо при обробці весь потік крапель має проходити через відносно вузький розрядний проміжок. У той же час при ІБР та таких величинах розрядних проміжків збільшення діаметра крапель води понад  $\approx 0,5$  мм починає суттєво впливати на підсилення електричного поля в розрядному проміжку [9], викликаючи тим самим інтенсифікацію утворення хімічно активних частинок. Тобто, з іншого боку, також є сенс робити краплі субміліметрового розміру. Але для того, щоб запобігти перемиканню розрядного проміжку електропровідними водяними містками, які суттєво збільшують непродуктивні втрати енергії, як це було в [9], діаметр  $d_k$  не має бути занадто великим. Таким чином, виходить, що при обробці води в крапельному стані ІБР треба, з одного боку, зменшувати розмір  $d_k$ , щоб збільшити фактор  $\alpha$ , з другого, навпаки, треба робити його приблизно 1 мм, щоб було підсилення електричного поля біля крапель. Вірогідним є й те, що крім розміру крапель ефективність обробки води також залежить від показника наповненості ними міжелектродного проміжку під час дії розряду, хоча роль цього показника раніше не досліджувалася. Тому метою цієї роботи було визначення впливу розміру крапель та заповненості ними розрядного проміжку на ефективність обробки води ІБР за умови відсутності шунтування розрядного проміжку водяними містками.

**Експериментальна установка.** До її складу входили розрядна камера (РК), джерело високовольтних імпульсів напруги, комплекс засобів для діагностики параметрів ІБР, концентрацій органічних домішок у воді, а також пристрої для подачі води в РК, вимірювання її витрат, розміру крапель, їх швидкості та частоти крапання.

Принцип роботи РК та її конструкція схематично показані на рис. 3. Вода під тиском  $P$  з колектора надходила в десять трубок 1 з нержавіючої сталі, які були розміщені в один ряд на відстані  $b_1 = 3$  мм одна від одної. Довжина трубок становила 30 мм, їх зовнішній та внутрішній діаметри відповідно – 0,6 та 0,4 мм. Суцільна цівка 2, що витікала з трубки, мала довжину  $l$ , яка залежала від тиску  $P$ . На своєму кінці цівка дрібнілася на краплі 3, які при падінні вниз пролітали через електродну систему з ІБР. Вона була утворена вертикально розміщеною пластиною з нер-

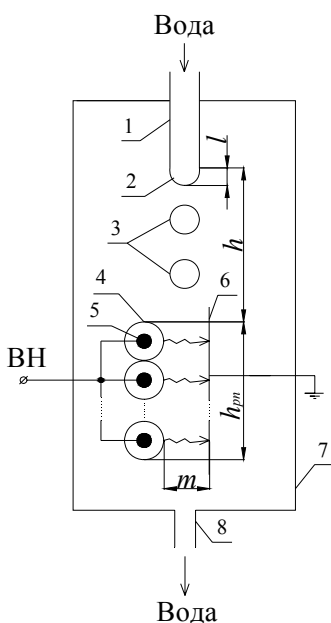


Рис. 3

жавіючої сталі 6 розмірами  $25 \times 40 \times 0,5$  мм<sup>3</sup> та сімома електродами 5 довжиною  $l_{e1} = 35$  мм. На електроди діаметром 1,5 мм були надіті алундові трубки 4 діаметром 3 мм, котрі виконували роль діелектричного бар'єра. Ширина розрядного проміжку  $m$  становила 3 мм. Майже всі краплі пролітали через розрядний проміжок, не торкаючись електродів. На електроди 5 подавалась позитивна імпульсна висока напруга. Пластина 6 була заземлена. Відстань від кінця трубок 1 до верхнього краю електродної системи становила  $h_1 = 25$  мм, її висота –  $h_{pn1} = 21$  мм. Вона була розміщена в плексигласовому корпусі 7, на дні якого був штуцер 8, через котрий оброблена вода витікала в мензурку.

Утворення крапель, їх рух та розмір вивчалися на основі фотографій, зроблених цифровою фотокамерою Canon A630. Спочатку дослідження обробки води ІБР виконувались при двох гідродинамічних режимах руху рідини, які характеризувалися такими усередненими параметрами: режим А –  $P_1 = 4 \cdot 10^3$  Па; довжина цівки  $l_1 = 10$  мм;  $d_{k1} = 2,5$  мм; частота крапання  $f_{k1} = 10$  Гц; швидкість руху крапель при входженні в розрядний проміжок  $v_{k1} = 0,4$  м/с; загальні витрати води (для всіх трубок)  $Q_{k1} = 0,62$  мл/с; режим В –  $P_2 = 7 \cdot 10^3$  Па,  $l_2 = 0$ ,  $d_{k2} = 1$  мм,  $f_{k2} = 330$  Гц,  $v_{k2} = 0,75$  м/с,  $Q_{k2} = 1,25$  мл/с.

Домішкою до води була метиленова синь  $C_{16}H_{18}ClN_3S$  (МС), яка є стійкою органічною сполукою. Початкова концентрація МС у дистильованій воді становила  $K_0 = 50$  мг/л, об'єм розчину, який оброблявся, – 200 мл.

Джерело високовольтних імпульсів побудовано за принципом відносно повільного накопичування енергії ємністю, що потім швидко комутується через розрядник на РК. Для запису розрядних струмів та напруг використовувалися прилади фірми Tektronix: цифровий двоканальний осцилограф TDS 1012, індуктивний датчик струму P6021 та активно-ємнісний подільник напруги P6015.

Визначення ступеня розкладання МС проводилося відповідно до закону Ламберта-Бера за поглинанням світла.

**Результати та аналіз досліджень.** Вид та параметри осцилограм напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  ІБР між електродами в РК не залежали від режимів руху крапель і практично були ті ж самі, що й за їх відсутності. З них слідує, що довжина імпульсу струму  $\tau_i$  складає близько 40 нс, а його амплітуда – 100 А. Амплітуда імпульсу напруги досягає  $\approx 24$  кВ. Енергія імпульсу  $W_i$ , яку потрібно знати для обчислення енергетичної ефективності ІБР при обробці води, визначалась інтегруванням за виразом

$$W_i = \int_0^{\tau_i} i(t)u(t)dt. \quad (10)$$

Оскільки час перебування кожної краплі в розрядному проміжку дуже обмежений, частота повторення розрядних імпульсів  $f$  має бути не менше деякої мінімальної величини  $f_{\min}$ . Цю величину можна визначити з таких міркувань. Час знаходження краплі, що має швидкість  $v_k$ , у розрядному проміжку становить

$$\tau_{pn} = h_{pn}/v_k, \quad (11)$$

де  $h_{pn}$  – висота розрядного проміжку. При  $h_{pn1} = 21$  мм,  $v_{k2} = 0,75$  м/с час  $\tau_{pn2} = 2,8 \cdot 10^{-3}$  с. За цей час має статися хоча б один ІБР, який мав би пряму дію на краплю. Тому пауза між двома ІБР не повинна перевищувати  $\tau_{pn2}$ . Звідси величина  $f_{\min} = \tau_{pn2}^{-1} = 36$  Гц. З другого боку, збільшувати  $f$  понад 100...200 Гц недоцільно, бо при цьому знижується енергетична ефективність ІБР [1, 9]. Тому дослідження по обробці води в режимах А та В виконано при частоті  $f_1 = 100$  Гц.

Після закінчення обробки всього об'єму води відбиралась проба (5 мл) для аналізу, а потім цей цикл повторювався знову. Для кожного гідродинамічного режиму рух рідини було десять таких циклів обробки. Для визначення ефективності обробки води ІБР порівнювалися зміни  $K$  залежно від питомого енерговкладу  $W_n$ , який дорівнює кількості енергії, витраченої на обробку одиниці об'єму води:

$$W_n = NfW_iQ_k^{-1}. \quad (12)$$

З рис. 4 видно, що ця залежність для обох режимів руху крапель одна й та ж. З цього

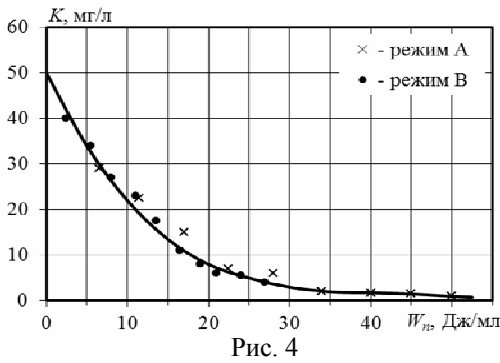


Рис. 4

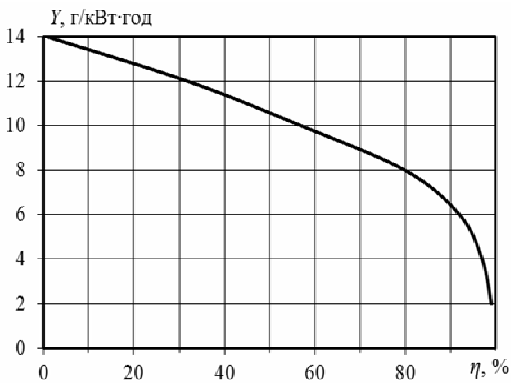


Рис. 5

виходить, що збільшення  $d_k$  від 1 до 2,5 мм не впливає на ефективність розкладання МС у воді ІБР, хоча фактор  $\alpha$  зменшується в 2,5 рази.

Найбільш універсальним, прийнятним в літературі, показником ефективності електророзрядної технології обробки води є енергетичний вихід  $Y$ , який дорівнює відношенню кількості розкладеної при розряді речовини до кількості вкладеної в цей розряд енергії. Оскільки, як загальновідомо, цей показник суттєво залежить від концентрації домішки  $K$  у кожний момент обробки, більш точним буде його обчислення не як усереднене значення  $Y$  після  $N$  циклів обробки води, а як

$$Y = dK/dW_n \approx \Delta K/\Delta W_n, \quad (13)$$

де  $\Delta K = K_1 - K_2$  – зменшення концентрації МС поблизу значення  $K_1$  при збільшенні  $W_n$  на  $\Delta W_n$ . Залежність  $Y$  від ступеня розкладання МС  $\eta = 100(K_0 - K)/K_0$ , % показана на рис. 5. Вона отримана на основі кривої рис. 4 з використанням (13) при  $\Delta W_n = 1$  Дж/мл і зміні  $W_n$  в діапазоні 0...50 Дж/мл. З залежності  $Y(\eta)$  видно, що ІБР має найбільший енергетичний вихід  $Y = 14$  г/кВт-год при  $\eta \approx 0$  %, тобто коли концентрація МС

найбільша ( $K \approx K_0$ ). При зростанні  $\eta$  до 80 % величина  $Y$  майже лінійно зменшується до 8 г/кВт-год. У подальшому вона починає стрімко падати і стає рівною 2 г/кВт-год при  $\eta = 98$  %. Такий характер залежності  $Y(\eta)$  є типовим при обробці води імпульсними розрядами. Але самі величини  $Y$  у 2...3 рази менші, ніж ті, що були отримані в аналогічних умовах ( $K_0$ ,  $W_n$ ) при розкладанні МС під дією ІБР на тонку плівку води ( $\delta \approx 0,15$  мм,  $\alpha_n = 6,67$  мм<sup>-1</sup>) [1, 18], хоча для режиму В фактор  $\alpha_{k2} = 6$  мм<sup>-1</sup>, тобто близький до  $\alpha_n$ . Таким чином, виконані експериментальні дослідження з діаметрами крапель 1 та 2,5 мм не показали впливу їх розмірів на ефективність обробки води ІБР. Тому було вирішено провести дослідження з  $d_k$ , меншим ніж 1 мм. Для отримання крапель такого розміру використано ефект їх електростатичного розпилення під дією коронного розряду, який виникає на краплях, котрі утворюються на кінцях трубок, через які подається в розрядну камеру вода. Складність застосування електростатичного розпилення (ЕР) для обробки води ІБР полягає в тому, що факел з крапель є полідисперсним, має нестійкий характер, суттєво залежить від напруги на трубці, витрат через неї води, відстані між сусідніми трубками та інших параметрів. Через ці обставини виникла непроста задача створення стабільного крапельного потоку, в якому б переважна частина крапель на відміну від умов роботи [9] пролітала через вузький міжелектродний проміжок ( $m = 3$  мм), не потрапляючи на електроди та не утворюючи суцільних перемикаючих їх водяних містків. Після проведення циклу досліджень з ЕР були встановлені такі прийнятні для подальшої обробки води ІБР параметри (режим С):  $b_2 = 6$  мм,  $h_2 = 25$  мм,  $P_3 = 8 \cdot 10^2$  Па,  $Q_3 = 0,1$  мл/с. Величина постійної позитивної напруги (по відношенню до заземленої пластини 6, рис. 3), що подавалась на всі трубки,  $U_{кр} = 10,6$  кВ. При цій нарузі струм коронного розряду з трубок становив  $I_{кр} = 30$  мкА. Число трубок, через які надходила вода в РК, становило 11, кількість високовольтних електродів – 3,  $l_{e2} = 64$  мм,  $h_{pn2} = 9$  мм. За цих умов приблизно 95 % крапель, що утворювались на кінцях трубок, проходили через розрядний проміжок, не торкаючись електродів. Факел з крапель, який був полідисперсним ( $d_k = 0,06...0,5$  мм), мав такі усереднені значення параметрів: діаметр – 0,4 мм, швидкість на вході в розрядну камеру – 2,4 м/с, частота повторення – 250 Гц. Для виконання умови  $f > f_{min}$  обробка води в цьому режимі здійснювалась при ІБР з  $f_2 = 400$  Гц.

Результати обробки ІБР води в крапельному стані при різних режимах наведено в таблиці. Для їх порівняння та аналізу до неї також занесені дані, отримані в інших дослідженнях

при схожих умовах. З таблиці видно, що в діапазоні  $d_k = 1 \dots 2,5$  мм (режими *A*, *B*) розмір крапель не впливає на енергетичну ефективність ІБР. Однак зменшення  $d_k$  (режим *C*) призводить до зростання з 40 до 68 % ступеня розкладання МС  $\eta$  за один цикл обробки. Але при цьому на порядок падає енергетичний вихід  $Y$ . У той же час при обробці води, забрудненої фенолом, зменшення  $d_k$  з  $1 \dots 5$  мм до 0,055 мм призводить до збільшення вдвічі величин  $\eta$  та  $Y$ . Порівняння енергетичних виходів при обробці ІБР води в режимі *B* та при ІБР на плівку води [1, 18], для яких фактори  $\alpha$  приблизно однакові ( $\alpha = 6 \dots 7$ ), показує, що при плівковому русі рідини величина  $Y$  значно вища.

Режим	$d_k$ , мм	$\alpha$ , мм <sup>-1</sup>	Домішка	$K_0$ , мг/л	$W_n$ , Дж/мл	$N$ , циклів	$\eta$ , %	$\beta$ , %	$Y$ , г/(кВт·год)	Посилання
<i>A</i>	2,5	2,4	МС	50	5,6	1	40	8	11,3	Дослідження авторів
<i>B</i>	1	6	МС	50	5,6	2	40	11,5	11,3	
<i>C</i>	0,4	12	МС	50	108	1	68	0,2	1,2	
Краплі	1...5	6...1,2	Фенол	71,3	5	-	30	-	15,8	[9]
Краплі	0,055	109	Фенол	94	6,5	-	66	-	33	[13]

Наведені факти дають підставу стверджувати, що крім розміру крапель на енергетичну ефективність імпульсних розрядів при обробці води впливають й інші фактори. Одним з них є коефіцієнт заповнення розрядного проміжку краплями води  $\beta$ , який характеризує відношення загальної площі  $S_\Sigma$  крапель під час дії ІБР до площі розрядного проміжку  $S_{pn}$ , тобто  $\beta = S_\Sigma / S_{pn}$ . Значення  $S_\Sigma$  можна оцінити наступним чином. Відстань  $\lambda_k$  між сусідніми краплями, що летять вниз з однієї трубки,  $\lambda_k = v_k / f_k$ . Число крапель  $n_k$ , що одночасно знаходяться під однією трубкою в розрядному проміжку висотою  $h_{pn}$ , становитиме  $n_k = h_{pn} / \lambda_k$ . Тоді при числі трубок  $n$  загальна площа  $S_\Sigma$  буде дорівнювати

$$S_\Sigma = 0,25\pi d_k^2 f_k n h_{pn} v_k^{-1}, \quad (14)$$

і враховуючи, що  $n = l_e / b$ ,  $S_{pn} = l_e h_{pn}$ , коефіцієнт  $\beta$  буде становити

$$\beta = 0,25\pi d_k^2 f_k (b v_k)^{-1}. \quad (15)$$

Значення  $\beta$  для експериментальних умов цієї роботи наведені в таблиці. З них виходить, що для режимів *A*, *B* лише приблизно десята частина стримерів, що утворюються в ІБР, може виявляти пряму дію на краплі води. Ефективність решти стримерів набагато менша, бо короткоіснуючі високоактивні радикали, що генеруються ними, не встигають окислити домішок МС у воді. З довгоіснуючих речовин тільки озон міг би вплинути на обробку води. Але через те, що час перебування води в розрядній камері, перш ніж вона витече через штуцер, не перевищує кількох секунд і концентрація озону в ній мала (до 2,1 мг/л), наслідок існування цих стримерів на обробку води менший, ніж тих, що безпосередньо діють на неї в розрядному проміжку. Тому найбільш вірогідно, що саме через малі значення  $\beta$  енергетична ефективність ІБР при обробці води в крапельному стані в цілому втричі нижча, ніж при обробці плівки, коли  $\beta = 100$  %, хоча в обох випадках фактор  $\alpha$  майже однаковий ( $\alpha = 6 \dots 7$ ). При обробці води в режимі *C* коефіцієнт  $\beta$  на 1,5 порядку менший, ніж для режимів *A* та *B*. Тому, незважаючи на більші значення  $\alpha$  при ЕР, енергетична ефективність у цьому режимі на порядок нижча, ніж для режимів *A*, *B*.

Однакові величини  $Y$  для режимів *A* та *B* можна пояснити тим, що хоча другий режим характеризується вищими параметрами  $\alpha$  та  $\beta$ , у першому режимі крупні краплі ( $d_k = 2,5$  мм) більше впливають на підсилення електричного поля біля них, що призводить до інтенсифікації іонізаційних процесів [9], компенсуючи тим самим зменшення значень  $\alpha$  та  $\beta$ .

З виразу (15) видно, що коефіцієнт заповнення розрядного проміжку  $\beta$  визначається геометричними параметрами краплеутворюючого пристрою  $b$  та гідродинамічними параметрами руху крапель  $d_k$ ,  $f_k$ ,  $v_k$ . Його можна в кілька разів збільшити, зменшуючи відстань між трубками  $b$  та швидкість  $v_k$  за рахунок створення потоку повітря зустрічного руху крапель. Слід звернути увагу й на те, що  $\beta \sim d_k^2$ , у той час як  $\alpha \sim d_k^{-1}$ , з чого виходить, що значення  $Y$  не можуть весь час монотонно зростати при зменшенні  $d_k$ . Оскільки збільшення величин  $\alpha$  та  $\beta$  впливає на зростання  $Y$ , оптимальні значення  $d_k$  мають бути знайдені на основі подальших



експериментальних досліджень та розрахунків з урахуванням режиму ІБР та кінетики плазмохімічних реакцій як у розрядному проміжку, так і в самій рідині, що обробляється.

**Вивчення феноменологічних особливостей діафрагмового розряду у воді.** Пошуки засобів покращення якостей води (обеззаражування, очищення тощо) не послаблюються. Серед привабливих засобів залишаються розряди у воді, оскільки в перспективі вони мають бути позбавленими дорогих допоміжних робіт і пристроїв (наприклад, як окремого виробництва озону при озонуванні води, пристроїв барботації, систем захисту від отруєння озоном і т.п.). Серед трьох видів розрядів у воді міжелектродний (лінійний) і коронний поки що не виправдовують надій через надто велику потужність (міжелектродний) і малий об'єм зони реакції – каналів розряду і стримерів (корона). Третій вид розряду – діафрагмовий як явище вивчений ще недостатньо і тому потребує подальших саме феноменологічних досліджень.

Перш за все проведено дослідження формування факелів діафрагмового розряду (ДФР). Виявлено, що не очікувано анодний факел розряду від отвору спрямований не на катод, а обернений назад на свій анод як на катод, а катодний відповідно обернений на свій катод як на анод, що поки не має пояснення. У чистій (водопровідній) воді анодний факел розгалужений на стримери, катодний має вигляд неідеальної напівсфери.

Досліджена трансформація факелів у розчинах із зміною електропровідності розчинів на два порядки порівняно з провідністю чистої води. Об'єм катодних факелів, як найбільш характерних за розмірами, зростає, наприклад, у сантинормальному розчині у 60 разів порівняно з факелами у воді. Анодний же факел втрачає стримерність і майже не змінює лінійних розмірів порівняно з тими, які спостерігаються у чистій воді. Зі зростанням напруги розряду об'єм катодних факелів у воді зростає також ефективно, наприклад, при збільшенні напруги всього у 2,5 разу (від 4 до 10 кВ) об'єм катодного факела зростає в 11 разів.

Проведені дослідження показують, що факели ДФР якісно відрізняються від утворень лінійного і коронного розрядів тим, що мають не стримерну, а об'ємно-просторову структуру, що дає переваги для застосування ДФР при обробці води. Крім того, за літературними даними для коронних розрядів такий характер і колір випромінювання вказують на порівняно невисоку температуру факела 2...4 тис. К. При таких температурах генерується більше малоенергетичних молекулярних часток у порівнянні, наприклад, з лінійним розрядом, які саме й мають високу окисну хімічну активність.

Для практичного використання має значення природа зародження ДФР. До цього часу в літературі існує думка, що ДФР виникає при випаровуванні води в отворі під дією високої густини струму з наступним електричним пробоем пари. Проте за дослідженнями у відділі встановлено, що ДФР виникає при безпосередньому електричному пробоеі на кромці діафрагми у отворі при подачі імпульсної напруги, причому без виникнення парових пузирів. Ці дослідження проведені в трьох варіантах.

При фотографуванні ДФР перпендикулярно до прозорої діафрагми (вздовж осі розряду) при порівняно невеликій і постійній енергії джерела живлення (5 Дж) виявилось, що навіть плазма за весь час розряду (протягом імпульсу напруги) не заповнює отвору діафрагми, наприклад, діаметром  $d_0 = 1...2$  мм. Слідів утворення пари не спостерігається, а її утворення мало б заповнити весь отвір. При цьому центри розряду розміщуються по периметру отвору, і кількість їх досягає в різних розрядах від одного до чотирьох. Слід зауважити, що розвиток і завершення одночасно кількох паралельних каналів також є особливістю діафрагмового розряду, якої не спостерігається у будь-яких інших видах розрядів.

Другий варіант дослідження проведено при аналогічному фотографуванні розряду перпендикулярно до прозорої діафрагми з незмінним діаметром отвору  $d_0 = 0,9$  мм, але при зміні енергії джерела живлення за рахунок збільшення початкової напруги в межах  $U_0 = 4...10$  кВ. Факельне утворення повністю закриває отвір і, наприклад, при  $U_0 = 10$  кВ діаметр факельного утворення в 7,4 разу більший від діаметра отвору. Вдалось знайти спосіб спостерігати і фотографувати зображення об'єкта, що затуляється факелом.

Фотографування за цим способом отвору під факелом показало, що канал розряду навіть при  $U_0 = 10$  кВ не заповнює отвору за весь час розряду і знову таки не видно слідів утворення в отворі пари води. Оскільки отвір не заповнюється каналом розряду, то і густина струму до його утворення не могла мати критичної величини, яка призводила б до пароутворення.

Третій варіант перевірки природи зародження ДфР виходить з передбачення: якщо причиною є розряд на кромці, то він має виникати і на верхній кромці діафрагми, зануреній під воду, де нема умов для виникнення пароутворення через відкритість простору над кромкою діафрагми. З цією метою верхня кромка була виконана у формі кругового вирізу діаметром  $D = 5,3$  мм, значно більшим від діаметра підводного отвору в діафрагмі  $d_0 = 0,9$  мм. Це дослідження показало, що підняття рівня води до  $0,5 \dots 0,8 D$  призводить до виникнення ДфР на кромці діафрагми під водою. При цьому факел через умови розряду мало розвинений і добре візуалізується його фіксація тільки на кромці діафрагми. Таким чином, можна вважати доведеним, що природою зародження ДфР є електричний розряд на кромці діафрагми в отворі, а попереднє утворення пари води в отворі взагалі не спостерігається.

При дослідженнях описаних розрядів на верхній кромці діафрагми, але при піднятті рівня води до  $0 \dots 0,4 D$ , встановлено, що при подачі напруги виникає не підводний, а поверхневий розряд по воді, який зароджується в точці зіткнення кромки діафрагми, води і повітря у верхній частині діафрагми, яка має занурену у воду і виступаючу над водою частину. Цей розряд стелиться по поверхні води і струми з нього занурюються під воду на весь об'єм води, як і у підводному ДфР. Оскільки цей розряд виникає в точці зіткнення кромки діафрагми і поверхні води, то його можна назвати поверхнево-розрядним підвидом діафрагмового розряду. Такий розряд також викликає науковий інтерес як явище в цілому і, зокрема, як можливий інструмент обробки води, тому потребує окремого вивчення.

**Висновки.** 1. Створено нелінійну модель опору ГСПС, адекватну в широкому діапазоні зміни напруги розрядних імпульсів (від 23 до 250 % номінального значення), як при низьких значеннях, що не призводять до виникнення плазмових каналів між гранулами (до 36 В), так і при високих, що забезпечують розвинені іскрові канали між усіма гранулами шару (понад 390 В).

2. Обмеження діапазонів зміни значень коефіцієнтів функцій, апроксимуючих залежності опору ГСПС, засноване на особливостях електрофізичних процесів при пошуку їх оптимальних значень, а також попередній аналітичний розрахунок деяких з них дають змогу знизити значення параметрів нев'язки апроксимацій.

3. Одними з головних чинників, які визначають енергетичну ефективність імпульсного бар'єрного розряду при обробці води в крапельному стані, є розмір крапель та коефіцієнт заповнення ними розрядного проміжку  $\beta$ . Варіювання діаметру крапель в діапазоні  $1 \dots 2,5$  мм не впливає на енергетичний вихід розряду. Зменшення розміру крапель до величин порядку  $0,1$  мм сприяє збільшенню енергетичного виходу. В умовах цієї роботи при обробці імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані, що містить як домішок метиленову синь з початковою концентрацією  $50$  мг/л, збільшення  $\beta$  з  $0,2$  до  $8$  % призводить до зростання енергетичного виходу з  $1,2$  до  $11,3$  г/кВт·год.

4. Виявлено особливості діафрагмового розряду у формуванні плазмових факельних утворень. Встановлено їх відмінність від розрядних каналів лінійного і коронного розрядів у воді. Висунуто гіпотезу про природу зародження ДфР, відмінну від прийнятої до цього часу в літературі. Також виявлено окремий поверхнево-розрядний вид діафрагмового розряду.

1. Божко И.В., Чарный Д.В. Исследование эффективности очистки воды от органических примесей импульсными разрядами // Техн. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 81–86.
2. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объёмного электроискрового разряда в воде // Химия и технология воды. – 1999. – № 3. – Т. 21. – С. 328–336.
3. Захарченко С.М. Статистичні дослідження еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при його електроерозійній обробці на прикладі гранул алюмінію у воді // Наук. вісн. Нац. гірничого ун-ту. – 2013. – № 1 (133). – С. 62–67.
4. Захарченко С.Н. Влияние напряженности внешнего электрического поля и температуры на сопротивление искроэрозионных гидрозолей металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 33. – С. 113–120.
5. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 17–27.
6. Захарченко С.Н. Особенности электромагнитных процессов в установках искроэрозионной коагуляции для систем водоподготовки тепловых сетей и агрегатов // Новини енергетики. – 2012. – № 6. – С. 41–48.

7. Захарченко С.Н. Физическая модель гранулированной токопроводящей среды // Техн. электродинамика. – 2012. – № 6. – С. 19–26.
8. Захарченко С.Н., Шидловская Н.А. Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями // Электронное моделирование. – 2012. – 34, № 5. – С. 91–102.
9. Корнев Я.И. Обработка воды импульсными разрядами в водо-воздушном потоке // Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Томск: 2005. – 22 с.
10. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия: учебник для вузов / Под ред. Стромберга А.Г. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2009. – 528 с.
11. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения // Техн. электродинамика. – 2014. – № 6. – С. 3–17.
12. Шерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объёмной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Пр. Ин-ту электродинамики НАНУ. Электротехника' 2001. – К.: Вид. Ин-ту электродинамики НАНУ, 2001. – С. 3–16.
13. Alex Pokryvailo, Michael Wolf, Yefim Yankevich et al. High-power pulsed corona for treatment of pollutants in heterogeneous media // IEEE transactions on plasma science. – 2006. – Vol. 34. – № 5. – P. 1731–1743.
14. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Mingbo Wu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater // Chemical Engineering Journal. – 2014. – № 236. – P. 348–363.
15. Gao Jin, Gu Pingdao, Yuan Li, Zhong Fangchuan. Degradation of dye wastewater by ns-pulse DBD plasma // Plasma science and technology. – 2013. – Vol. 15. – № 9. – P. 928–934.
16. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zaharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture. – 2013. – № 61. – P. 105–115.
17. Monastyrsky G., Ochyn P., Wang G., Kolomytsev V., Koval Yu., Gilchuk A., Tinkov V., Shcherba A., Zaharchenko S. Effect of Powder Particles Size on Chemical Composition of Ti-Ni-base Spark Erosion Powder Obtained in Liquid Argon // Chemistry of Metals and Alloys. – 2011. – Vol. 4, Issue 3/4, December. – P. 188–199.
18. Monica Magureanu, Daniela Piroi, Nicolae Bogdan Mandache, Vasile Parvulescu. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters // Journal of applied physics. – 2008. – Vol. 104. – P. 103306 (1–7).

УДК 537.523.3:621.3.011.72

**И.В. Божко**, канд. техн. наук, **С.М. Захарченко**, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-корр. НАН Украины, **М.И. Фальковский**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

#### **Электроразрядные технологии очистки и обеззараживания воды**

*Приведены новые результаты, полученные в отделе электромагнитных систем ИЭД НАН Украины в 2014 году при выполнении электрофизических исследований электроразрядных процессов в воде. Предложена методика расчета сопротивления разрядного промежутка с водяными слоями и установлена адекватность нелинейной модели эквивалентного сопротивления гранулированных токопроводящих сред. Выполнена оценка энергетической эффективности импульсного барьерного разряда при обработке воды в капельном состоянии, содержащем органическую примесь. Определено, что одними из наиболее существенных факторов, которые влияют на энергетический выход разряда, являются размер капель и коэффициент заполнения ими разрядного промежутка. Выявлены особенности диафрагменного разряда в формировании плазменных факельных образований. Установлено их отличие от разрядных каналов линейного и коронного разрядов в воде. Библ. 18, рис. 5, таблица.*

**Ключевые слова:** нелинейное сопротивление, гранулированные токопроводящие среды, импульсный барьерный разряд, обработка воды, капли, энергетический выход, диафрагменный разряд, феноменологические особенности.

**I.V. Bozhko, S.M. Zaharchenko, I.P. Kondratenko, M.I. Falkovsky**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences, Ukraine,  
Peremohy, 56, 03680, Kyiv, Ukraine

#### **Electric-discharge technology for purification and disinfection of water**

*We present new results obtained in the Department of electromagnetic systems, EDI, NAS of Ukraine in 2014 when performing electrophysical studies of electro-discharge processes in water. The methods of calculating the resistance of the discharge gap with water layers and set the adequacy of the nonlinear model of the equivalent resistance of granular conductive environments. The estimated energy efficiency of pulsed barrier discharge in water treatment drip condition containing organic impurity. It is determined that one of the most significant factors that affect the energy output of the discharge, a is the droplet size and the fill factor of their discharge gap. Peculiarities of the diaphragm discharge in the formation of a plasma torch formations. Installed them a bit unlike linear channels and corona discharges in water. References 18, figure 5, table.*

**Key words:** nonlinear resistance, granular conductive medium, pulsed barrier discharge, water treatment, drops, power outlet, diaphragm discharge, phenomenological features.

Надійшла 2.04.2015

Received 2.04.2015