

## ОБРОБКА ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ ВОДИ В КРАПЕЛЬНОМУ СТАНІ

**І.В.Божко**, канд.техн.наук, **В.В.Кобильчак**

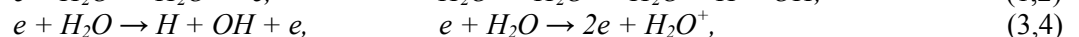
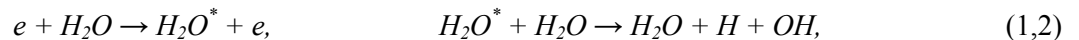
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: [ws77@ukr.net](mailto:ws77@ukr.net)

*Виконано оцінку енергетичної ефективності імпульсного бар'єрного розряду при обробці води в крапельному стані, що містить органічну домішку. Дослідження проводилися у трьох гідродинамічних режимах руху крапель з характерними для кожного з них розміром крапель 0,4; 1 та 2,5 мм, швидкостями руху та частотами крапання. Як домішка використовувалася метиленова синь з початковою концентрацією 50 мг/л. Показано, що за одне проходження крапель через розрядну камеру ступінь розкладання домішки становить 40...68%, а енергетичний вихід може досягати 11,3 г/кВт·год. Визначено, що одними з найбільш суттєвих чинників, які впливають на енергетичний вихід розряду, є розмір крапель та коефіцієнт заповнення ними розрядного проміжку, який характеризує відношення загальної площі крапель, що одночасно знаходяться в розрядному проміжку, до площі одного з електродів, що його утворює. За умов виконаних досліджень цей коефіцієнт досягав 11,5%. При його зменшенні до 0,2% енергетичний вихід знижується на порядок. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.*

**Ключові слова:** імпульсний бар'єрний розряд, обробка води, краплі, енергетичний вихід.

Серед нових методів очистки води, які зараз розробляються, одним з перспективних напрямків є використання так званих advanced oxidation processes – AOP's (передових окислювальних процесів) [5]. 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 через те, що 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  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ , молекули  $H_2O_2$ ,  $O_3$  тощо) та ультрафіолетового випромінювання. Особливе значення для обробки води має утворення гідроксильного радикалу  $OH$ , 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 у газі, коли одним з електродів є поверхня води, що обробляється [1,5,8], або у водо-повітряній суміші [3,4]. В стримерах таких розрядів генеруються [5] заряджені частинки з енергіями до 20 еВ, при яких стає можливим утворення радикала  $OH$  завдяки коливальному чи обертальному збудженню молекул води (порогова енергія  $\approx 1$  еВ, реакції (1), (2)), їхній дисоціації (порогова енергія  $\approx 7$  еВ, реакція (3)) та іонізації (порогова енергія  $\approx 13$  еВ, реакції (4), (5))



Існує також значна кількість інших плазмохімічних реакцій, коли утворюється радикал  $OH$ . Серед них (як найбільш вагому) слід виділити реакцію за участю збудженого атома кисню  $O(^1D)$ , що проходить у газі в присутності водяного пару,



У вологому повітрі концентрація  $OH$  у стримерах може досягати значних величин ( $\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) і навіть перевищувати концентрацію озону  $O_3$ , але час життя цих радикалів вельми обмежений [9]. Через  $\approx 10$  нс після закінчення розрядного імпульсу концентрація  $OH$  починає стрімко знижуватися і за кілька сотень мікросекунд зменшується на два порядки. Якщо радикали  $OH$  утворюються безпосередньо поблизу поверхні води, цього часу може бути достатньо для їхнього переходу з газової фази у воду з наступним окисленням розчинених у ній забруднень. Враховуючи дуже короткий час життя радикалів  $OH$ , товщина шару води, де буде проходити її обробка, буде вельми малою. Тому для ефективного використання в процесі обробки води генерованих у розряді радикалів  $OH$  бажано мати якомога більшим 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 прийнятними є обробка води при її стіканні тонким шаром товщиною  $\delta$  по вертикальній стінці [1,8] або у вигляді крапель малого діаметру  $d_k$  [2–4,6,7,10]. 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 [4], фактор  $\alpha_k = 109$  мм<sup>-1</sup>, тобто  $\alpha_k \gg \alpha_n$ .

Таким чином, слід було б чекати, що обробка імпульсним розрядом води в крапельному стані може бути більш ефективною, ніж обробка плівки води. Про це свідчать результати роботи [10], які показали, що ефективність імпульсного коронного розряду (ІКР) при обробці води в крапельному стані у порівнянні з обробкою води, забрудненою фенолом, що стікає по вертикальній стінці, вища на третину. Висновки [6] також підтверджують, що фактор  $\alpha$  має вплив на обробку води, зокрема, зменшення діаметра крапель від 0,5 до 0,15 мм призводить до  $\approx 30$  % збільшення енергетичної ефективності ІКР при обробці води з органічним забруднювачем. Але результати досліджень [4], навпаки, 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, у яких дослідження обробки води в крапельному стані проводилися б при застосуванні імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), відносно менше [2,3,7]. Але цей розряд вигідно відрізняється від ІКР тим, що він йде при більш однорідному та суттєво вищому середньому електричному полю в розрядному проміжку, що забезпечує більш ефективне використання енергії, яка вкладається в розряд [1]. Але для того щоб запобігти при практичному використанні занадто високих напруг ( $>30$  кВ), ширина розрядного проміжку при ІБР не повинна перевищувати кількох міліметрів ( $\approx 5$  мм). Це створює певні труднощі, бо при обробці весь потік крапель повинен проходити через відносно вузький розрядний проміжок. В 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 [2], 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 у [2,3], діаметр  $d_k$  не повинен бути занадто великим. Таким чином, при обробці води в крапельному стані ІБР треба, з одного боку, зменшувати розмір  $d_k$ , щоб збільшити фактор  $\alpha$ , з другого, навпаки, треба його робити приблизно 1 мм, щоб було підсилення електричного поля біля крапель. Тому для кращого розуміння фізичних процесів та удосконалення метода обробки імпульсними розрядами води необхідне подальше вивчення ІБР у газі, що містить краплі води. 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 є визначення впливу розміру крапель та наповненості 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 та озону в РК, а також пристрої для подачі води в РК, вимірювання її витрат, розміру крапель, їхньої швидкості та частоти крапання.

Принцип роботи РК та її конструкція схематично показані на рис. 1. Вода під тиском  $P$  з колектора поступала в десять трубок 1 з нержавіючої сталі, які були розташовані в один ряд на відстані  $b_1 = 3$  мм одна від одної. Довжина трубок становила 30 мм, їхні 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 дрібилася на краплі 3, які при падінні вниз пролітали через електродну систему з ІБР. Вона була утворена вертикально розташованою пластиною з нержавіючої сталі 6, яка мала розміри  $25 \times 40 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>, та сімома електродами 5 довжиною  $l_{el} = 35$  мм. На електроди, що мали діаметр 1,5 мм, були одягнені алундові трубки 4 діаметром 3 мм, котрі виконували роль діелектричного бар'єру. Ширина розрядного проміжку  $m$  становила 3 мм. Майже всі краплі пролітали через розрядний проміжок, не торкаючися

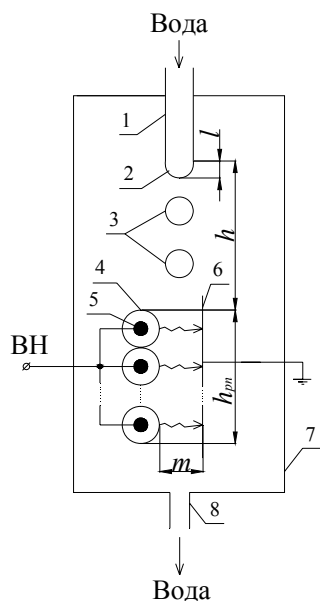


Рис. 1

електродів. На електроди 5 подавалася 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 який оброблена вода витікала в мензурку.

Утворення крапель, їхній рух та розмір вивчалися на основі фотографій, зроблених цифровою фотокамерою Canon A630. Спочатку дослідження обробки води ІБР були виконані 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, що важко розкладається при інших способах очищення води, наприклад, біоочищенні. Початкова концентрація МС у дистильованій воді дорівнювала  $K_0 = 50$  мг/л. Об'єм розчину, який оброблявся, становив 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 у відповідності до закону Ламберта-Бера щодо поглинання світла на довжині хвилі  $\lambda = 665$  нм у кюветі товщиною 10 мм. Для отримання коефіцієнта поглинання світла в кюветі записувалися абсорбційні спектри для розчинів МС у дистильованій воді з заздалегідь відомими концентраціями домішки.

Оскільки під час ІБР у РК накопичується озон, який також може у незначній мірі впливати на процес розкладання МС, була досліджена динаміка наростання його концентрації в РК, щоб у подальшому проводити обробку води при одному і тому самому вмісті озону в РК. Для цього у зволожену РК (~100% вологості) з ІБР через трубки 1 (рис. 1) з витратами 1 л/хв подавалося повітря, яке потім через штуцер 8 по шлангу надходило до оптичної кювети, де по поглинанню ультрафіолетового випромінювання ( $\lambda = 254,5$  нм) визначалася концентрація озону в повітрі  $K_{oz}$ . Виміри показали, що під час ІБР значення  $K_{oz}$  після початкового швидкого зростання через хвилину стають практично незмінними. Тому для того, щоб обробка води велася за умов стаціонарної концентрації озону в атмосфері РК, подача розчину МС у розрядний проміжок розпочиналася тільки через хвилину після початку ІБР. При частотах повторення розрядних імпульсів ІБР  $f = 100$  Гц та 400 Гц, при яких проводилася обробка води, усталена величина  $K_{oz}$  становила відповідно 1,2 та 2,1 мг/л.

**Результати та аналіз досліджень.** Типові осцилограми напруги  $u(t)$  (крива 1) та струму  $i(t)$  (крива 2) ІБР між електродами в РК представлені на рис. 2. Вид та параметри осцилограм не залежали від режимів руху крапель і практично були ті ж самі, що й за їхньої відсутності. З осцилограм видно, 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, визначалася інтегруванням за виразом

$$W_i = \int_0^{\tau_i} i(t)u(t)dt. \quad (7)$$

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

$$\tau_{pn} = h_{pn} / v_k, \quad (8)$$

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 би мав пряму дію на краплю. Тому пауза між двома ІБР не повинна перевищувати  $\tau_{pn2}$ . Звідси величина  $f_{min} = \tau_{pn2}^{-1} = 36$  Гц. З іншого боку, збільшувати  $f$  понад 100...200 Гц

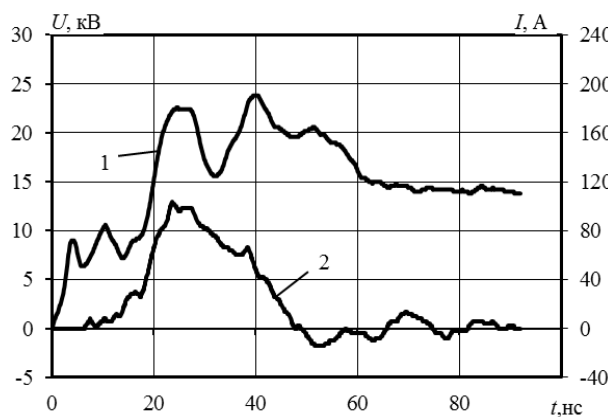


Рис. 2

недоцільно, бо при цьому знижується енергетична ефективність ІБР [1,2]. Тому дослідження щодо обробки води в режимах А та В виконані при частоті  $f_1 = 100$  Гц.

Обробка води проводилася в такій послідовності. Через 1 хвилину після подавання напруги на міжелектродний проміжок в розрядну камеру починалася подача води. Після закінчення її обробки відбиралася проба (5 мл) для аналізу, а потім весь цей цикл повторювався знову. Для кожного гідродинамічного режиму руху рідини було десять таких циклів обробки. Залежність концентрації МС від

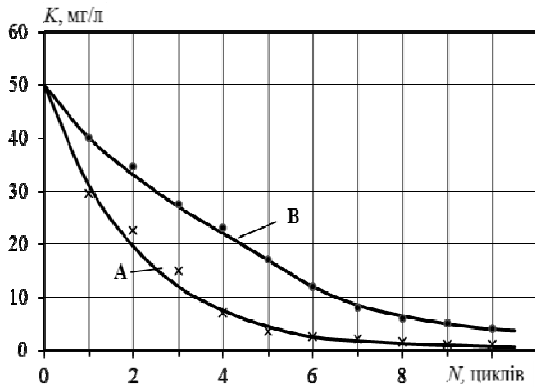


Рис. 3

числа циклів  $N$  показана на рис. 3. З нього видно, що для досягнення одного й того самого ступеню розкладання МС при режимі А (крива А) треба приблизно вдвічі менше циклів  $N$ , ніж при режимі В (крива В). Так, наприклад, для 90% розкладання МС (до  $K=5$  мг/л) у першому випадку  $N=5$ , у другому –  $N=10$ . Але слід враховувати те, що в режимі В дослідження проводилися при витратах рідини  $Q_{k2}$ , які вдвічі більші, ніж  $Q_{k1}$ . Тому для визначення ефективності обробки води ІБР більш коректним є порівняння змін  $K$  в залежності від питомого енерговкладу  $W_n$ , який дорівнює кількості енергії, що витрачена на обробку одиниці об'єму води

$$W_n = NfW_iQ_k^{-1}. \quad (9)$$

З рис. 4 видно, що ця залежність для обох режимів руху крапель одна й та сама. З цього 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 прийнятим у літературі [1-8,10] показником ефективності електро-розрядної 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

$$Y = dK/dW_n \approx \Delta K/\Delta W_n, \quad (10)$$

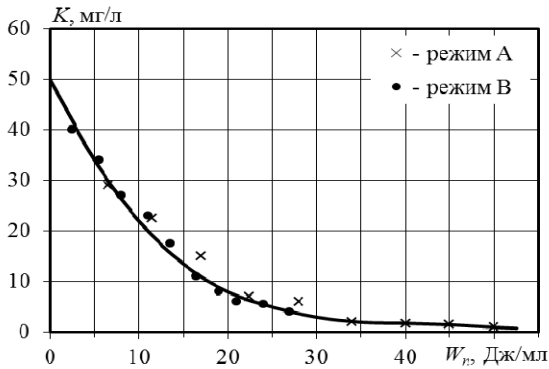


Рис. 4

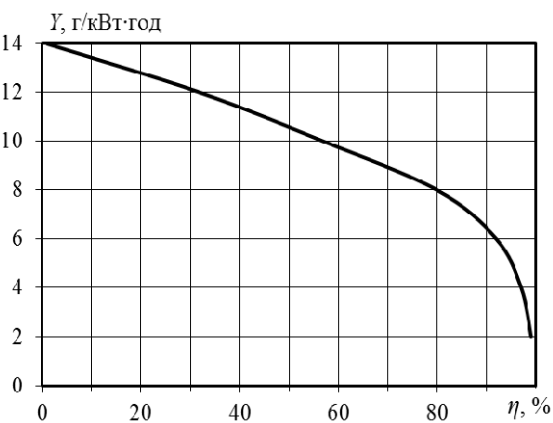


Рис. 5

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 ступеню розкладання МС  $\eta = 100(K_0 - K)/K_0$ , % показана на рис. 5. Вона отримана на основі кривої рис. 4 з використанням (10) при  $\Delta W_n = 1$  Дж/мл і зміні  $W_n$  у діапазоні 0...50 Дж/мл. Із 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 дорівнює 2 г/кВт-год при  $\eta = 98\%$ . Такий характер залежності  $Y(\eta)$  є типовим при обробці води імпульсними розрядами [1,2,4,5,8,10]. 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>) [1,8], 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 їхніх розмірів на ефективність обробки води ІБР. Тому було вирішено провести дослідження з  $d_k$ , меншим, ніж 1 мм. Для отримання крапель такого розміру був використаний ефект їхнього електростатичного розпилення [6] під дією коронного розряду, який виникає на краплях, що утворюються на кін-

цях трубок, через які подається в розрядну камеру вода. Складність застосування електростатичного розпилення (ЕР) для обробки води ІБР полягає у 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, де б переважна частина крапель, на відміну від умов роботи [2], 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 б, рис. 1), що подавалася 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, було 11, кількість високоевольтних електродів – 3,  $l_{e2} = 64$  мм,  $h_{pn2} = 9$  мм. За цих умов приблизно 95% крапель, що утворювалися на кінцях трубок, проходили через розрядний проміжок, не торкаючися електродів. Факел з крапель, який був полідисперсним ( $d_k = 0,06 \dots 0,5$  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 проводилася при ІБР з  $f_2 = 400$  Гц.

Результати обробки ІБР води в крапельному стані у різних режимах показані в таблиці. Для їхнього порівняння та аналізу до неї також занесені дані, що були отримані в інших дослідженнях за подібних умов.

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
А	2,5	2,4	МС	50	5,6	1	40	8	11,3	Дослідж. авторів
В	1	6	МС	50	5,6	2	40	11,5	11,3	
С	0,4	12	МС	50	108	1	68	0,2	1,2	
-	1...5	6...1,2	Фенол	71,3	5	-	30	-	15,8	[2]
-	0,055	109	Фенол	94	6,5	-	66	-	33	[4]

З таблиці видно, що в діапазоні  $d_k = 1 \dots 2,5$  мм (режими А, В) розмір крапель не впливає на енергетичну ефективність ІБР. Однак зменшення  $d_k$  (режим С) призводить до зростання з 40 до 68% ступеню розкладання МС  $\eta$  за один цикл обробки. Але при цьому на порядок падає енергетичний вихід  $Y$ . В той же час при обробці води, забрудненої фенолом, зменшення  $d_k$  з 1...5 мм до 0,055 мм призводить до збільшення вдвічі величин  $\eta$  та  $Y$ . Порівняння енергетичних виходів при обробці ІБР води в режимі В та при ІБР на плівку води [1,8], для яких фактори  $\alpha$  приблизно однакові ( $\alpha = 6 \dots 7$ ), показує, що при плівковому русі рідини величина  $Y$  значно вище. Наведені факти дають підставу стверджувати, що крім розміру крапель на енергетичну ефективність імпульсних розрядів при обробці води впливають й інші фактори. Одним з таких факторів 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  $h_{pn}$ , буде становити  $n_k = h_{pn} / \lambda_k$ . Тоді при числі трубок  $n$  загальна площа  $S_\Sigma$  буде дорівнювати

$$S_\Sigma = 0,25\pi d_k^2 f_k n h_{pn} v_k^{-1}. \quad (11)$$

І, враховуючи, що  $n = l_e / b$ ,  $S_{pn} = l_e h_{pn}$ ,

$$\beta = 0,25\pi d_k^2 f_k (b v_k)^{-1}. \quad (12)$$

Значення  $\beta$  для експериментальних умов цієї роботи представлені в таблиці. Очевидно, що для режимів А, В лише приблизно десята частина стримерів, що утворюються в ІБР, може проявляти 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 виявляти вплив 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  $\beta$  у цілому енергетична ефективність ІБР при обробці води в крапельному стані втричі нижча, ніж при обробці плівки, коли  $\beta=100\%$ , хоча в обох випадках фактор  $\alpha$  майже однаковий ( $\alpha=6\dots7$ ). При обробці води в режимі С коефіцієнт  $\beta$  на півтора порядків менший, ніж для режимів А та В. Тому, незважаючи на більші значення  $\alpha$  при ЕР, енергетична ефективність у цьому режимі на порядок нижча, ніж для режимів А, В.

Однакові величини  $Y$  для режимів А та В 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 [6], компенсуючи тим самим зменшення значень  $\alpha$  та  $\beta$ .

З (12) 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  $\beta \sim d_k^2$ , в той час як  $\alpha \sim d_k^{-1}$ , з чого випливає, 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  $d_k$  повинні бути знайдені на основі подальших експериментальних досліджень та розрахунків з урахуванням режиму ІБР та кінетики плазмохімічних реакцій як в розрядному проміжку, так і в самій рідині, що обробляється.

**Висновки.** 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 діаметра крапель у діапазоні 1...2,5 мм не впливає на енергетичний вихід розряду. Зменшення розміру крапель до величин порядку 0,1 мм сприяє збільшенню енергетичного виходу. Коефіцієнт  $\beta$  є функцією взаємозалежних параметрів, що характеризують крапельний рух: діаметра крапель, їхньої швидкості та частоти повторення, а також характеристик пристрою для утворення крапель. В умовах цієї роботи при обробці імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані, що містить як домішку метиленову синь з початковою концентрацією 50 мг/л, збільшення  $\beta$  з 0,2% до 8% веде до зростання енергетичного виходу з 1,2 до 11,3 г/кВт·год, тобто на порядок. Для визначення всього комплексу оптимальних параметрів крапельного потоку, що проходять через зону дії імпульсного бар'єрного розряду, потрібні подальші дослідження, серед яких до першочергових належить пошук способу збільшення коефіцієнта заповнення  $\beta$ .

1. Божко И.В., Чарный Д.В. Исследование эффективности очистки воды от органических примесей импульсными разрядами // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 81–86.
2. Корнев Я.И. Обработка воды импульсными разрядами в водо-воздушном потоке // Автореферат дис. канд. техн. наук. – Томск: 2005. – 22 с.
3. Яворовский Н.А., Корнев Я.И., Преис С.В., Пельцман С.С., Хаскельберг М.Б., Чен Б.Н. Активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке // Известия Томского политехнического института. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 108–113.
4. Alex Pokryvailo, Michael Wolf, Yankevich E., Wald S., Grabowski L.R., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Reiser M., Glocker B., Eckhardt T., Kempenaers P., Wellemann A. High-power pulsed corona for treatment of pollutants in heterogeneous media // IEEE transactions on plasma science. – 2006. – Vol. 34. – № 5. – Pp. 1731–1743.
5. 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. – Pp. 348–363.
6. Ellyana Njatawidjaja, Anto tri Sugiarto, Takayuki Ohshima, Masayuki Sato. Decoloration of electrostatically atomized organic dye by the pulsed streamer corona discharge // Journal of Electrostatics. – 2005. – № 63. – Pp. 353–359.
7. 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. – Pp. 928–934.
8. 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. – Pp. 103306 (1–7).
9. Ryo Ono, Tetsuji Oda. Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – № 10. – Pp. 5876–5882.
10. Tsutomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose. The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air // IEEE transactions on plasma science. – 2010. – Vol. 38. – № 10. – Pp. 2675–2680.

**ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ ВОДЫ В КАПЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ****Божко И.В.**, канд.техн.наук, **Кобыльчак В.В.****Институт электродинамики НАН Украины,****пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.****e-mail: [ws77@ukr.net](mailto:ws77@ukr.net)**

*Изучалась энергетическая эффективность импульсного барьерного разряда при обработке загрязненной воды в капельном состоянии. Исследования проводились при трех гидродинамических режимах движения капель с характерными для каждого из них диаметрами капель 0,4; 1 и 2,5 мм, скоростями движения и частотами следования капель. Примесь к воде служила метиленовая синь с начальной концентрацией 50 мг/л. После однократного прохождения капель через разрядную камеру степень разложения примеси составляла 40...68% при энергетическом выходе до 11,3 г/кВт·час. Показано, что одними из главных факторов, которые определяют энергетический выход, являются размер капель и коэффициент заполнения разрядного промежутка ними. Коэффициент вычисляется как отношение общей площади всех капель, которые одновременно находятся в разрядном промежутке, к площади одного из электродов. Для экспериментальных условий данной работы этот коэффициент достигал 11,5%. При его уменьшении до 0,2% энергетический выход снижается на порядок.*

Библ. 10, табл. 1, рис. 5.

**Ключевые слова:** импульсный барьерный разряд, обработка воды, капли, энергетический выход.**WATER TREATMENT IN THE STATE OF DROPS BY PULSE BARRIER DISCHARGE****Bozhko I.V., Kobylchak V.V.****Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,****pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.****e-mail: [ws77@ukr.net](mailto:ws77@ukr.net)**

*Energy efficiency of pulse barrier discharge was studied when handling contaminated water in drop state. The study was conducted with three hydrodynamic modes of drops motion, each drop characterized by average drop size diameter of 0,4 mm, 1 mm and 2,5 mm accordingly plus by speed and frequency of dripping. Methylene blue, a persistent organic compound with an initial concentration of 50 mg/l, has served as a water contaminant. Having passed once through discharge camera, decomposition degree of impurities was achieved 40...68 % with the energy yield upto 11,3 g/kWh. The drop size diameter and coefficient of the discharge gap filling with drops is ones of the main factors that determines the energy yield of pulse barrier discharge. This coefficient is calculated as the ratio of the total area of all the drops, which are in the discharge gap at the same time, to the area of one of electrodes. For the experimental work conditions this ratio has reached 11,5%. When ratio is reduced to 0,2% the energy yield is down by one order.*

References 10, table 1, figures 5.

**Key words:** pulse barrier discharge, water treatment, drops, energy yield.

1. *Bozhko I.V., Charnyi D.V.* A study on effectiveness of water purification from organic impurities by pulse discharges // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2013. – № 3. – Pp. 81–86. (Rus)
2. *Kornev Ya.I.* Water Treatment in water-air flow by pulsed discharge. Diss. kand.tekhn. nauk. Tomsk, 2005. 22 p. (Rus)
3. *Yavorovskiy N.A., Kornev Ya.I., Preis S.V., Pelchtsman S.S., Khaskelberg M.B., Chen B.N.* Active particles-oxidants in water-air stream // *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. – 2006. – Vol. 309. – № 2. – Pp. 108–113. (Rus)
4. *Alex Pokryvailo, Michael Wolf, Yankevich E., Wald S., Grabowski L.R., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Reiser M., Glocker B., Eckhardt T., Kempnaers P., Welleman A.* High-power pulsed corona for treatment of pollutants in heterogeneous media // *IEEE transactions on plasma science*. – 2006. – Vol. 34. – № 5. – Pp. 1731–1743.
5. *Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue.* Review on electrical discharge plasma technology for wastewater // *Chemical Engineering Journal*. – 2014. – №236. – Pp. 348–363.
6. *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. – Pp. 928–934.
7. *Ellyana Njatawidjaja, Anto tri Sugiarto, Takayuki Ohshima, Masayuki Sato.* Decoloration of electrostatically atomized organic dye by the pulsed streamer corona discharge // *Journal of Electrostatics*. – 2005. – № 63. – Pp. 353–359.
8. *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. – Pp. 103306 (1–7).
9. *Ryo Ono, Tetsuji Oda.* Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93. – № 10. – Pp. 5876–5882.
10. *Tsuomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose.* The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air // *IEEE transactions on plasma science*. – 2010. – Vol. 38. – № 10. – Pp. 2675–2680.

Надійшла 11.12.2014

Остаточний варіант 26.01.2015