

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ВОДИ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЇЇ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ

В.О. Берека*, **І.В. Божко**** , канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко***** , чл.-кор. НАН України
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: ws77@ukr.net

Виконано дослідження енергоефективності імпульсного бар'єрного розряду під час обробки води в аерозольному стані в залежності від енергії імпульсів (21–72 мДж), частоти їхнього повторення (50–300 Гц), концентрації органічної домішки у воді (50–100 мг/л) та вмісту води (1,6–3,2 %) у водоповітряній суміші. Розряд генерувався уніполярними короткими імпульсами (~100 нс) в електродній системі з вертикально розташованими циліндричними електродами діаметром 2 мм, відстань між якими складала 2 мм. Найвищий енергетичний вихід, який було отримано під час розкладання домішки на 90 %, складав 32 г/квт·год. З метою визначення впливу параметрів руху води на енергоефективність імпульсного бар'єрного розряду за схожих умов зіставлено енергоефективність цього виду розряду під час руху води в плівковому, крапельному та аерозольному станах. Робиться висновок, що обробку води доцільно вести в крапельному стані за субміліметрового розміру крапель. У разі такого руху води енергоефективність імпульсного бар'єрного розряду на ≈30% вища, ніж в аерозольному. Бібл. 15, рис. 6, табл. 1.

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

Забруднення води через антропогенний вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей та обмежені запаси питної води відносяться до сьогоденних актуальних проблем. Тому вдосконалюються традиційні технології очищення води та розроблюються нові. Зазвичай обробка води проходить кілька основних стадій. На перших стадіях це можуть бути різні види механічної та фізико-хімічної обробки. Вторинна обробка часто полягає в біологічному перетворенні розчинених і колоїдних органічних речовин за допомогою різноманітних груп мікроорганізмів в присутності кисню. Завершальна стадія – обробка, яка необхідна для того, щоб зробити хімічний та біологічний склад води придатним для вживання людиною чи скидання в навколишнє середовище. Серед методів, що застосовуються на цьому етапі, поширеними є традиційне хлорування та озонування води, а також використання в останні десятиріччя нових технологій на основі передових окисних процесів (advanced oxidation processes – AOP) [1], за яких генерація окиснювачів відбувається безпосередньо у зоні, в якій необхідно забезпечити розкладання залишкових забруднювачів води.

Між багатьох видів AOP (озон в комбінації з ультрафіолетом та пероксидом водню, електронний пучок, ультразвук тощо) обробка води низькотемпературною плазмою є найбільш привабливою для практичного застосування [1]. Серед електричних розрядів, що генерують таку плазму, чільне місце займають імпульсні бар'єрний (ІБР) та коронний (ІКР) розряди на поверхню води, енергоефективність яких одна з найвищих [2–7]. В плазмі цих розрядів утворюються високоактивні частинки з окисними потенціалами більшими, ніж у кисню O_2 (1,2 В), серед яких озон O_3 (2,1 В) та гідроксильний радикал OH^* (2,7 В) є найактивнішими. Основним показником [1–4], що визначає енергоефективність того чи іншого виду розряду, є величина енергетичного виходу Y_{90} , яка дорівнює кількості розкладеного забруднювача (в грамах), що приходить на 1кВт·год витраченої в розряді енергії за умови, що концентрація забруднювача зменшилася на 90 % (тобто на порядок). Значення Y_{90} залежить від багатьох факторів: виду розряду, типу домішки, її початкової концентрації та інших параметрів, серед яких особливо важливим є величина питомої поверхні води α , що характеризує співвідношення площі поверхні оброблюваної рідини S до її об'єму V : $\alpha = S/V$, бо найсильніший окиснювач (радикал OH^*) через вельми малий час свого життя (<1нс) взаємодіє з домішками в основному на межі «газ-рідина». Тому обробку води доцільно виконувати за достатньо великих значеннях α (> 1 м²/л). Цього досягають за умов, коли вода знаходиться у плівковому (за товщини плівки ≈ 0,15 мм, $\alpha \approx 6,7$ м²/л), крапельному (за діаметру крапель $d_k \approx 1$ мм, $\alpha \approx 6$ м²/л) чи аерозольному станах ($d_k \sim 0,01$ – $0,1$ мм, $\alpha \approx 600$ – 60 м²/л). Можна припустити, що

© Берека В.О., Божко І.В., Кондратенко І.П., 2022

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-0888-2864>; ** <https://orcid.org/0000-0002-7955-246X>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>

обробка ІКР чи ІБР води в крапельному стані, коли $d_k < 1$ мм, буде енергетично вигіднішою, ніж в плівковому. На це вказують результати роботи [8], які показали, що енергоефективність ІКР під час обробки забрудненої фенолом води в крапельному стані вища на третину, ніж в плівковому. Висновки [9] також підтверджують, що фактор α має вплив на енергоефективність розряду: зменшення діаметра крапель від 0,5 до 0,15 мм призводить до $\approx 30\%$ збільшення енергетичної ефективності ІКР під час обробки води з органічним забруднювачем. Але результати досліджень [10] навпаки показали, що енергетичні затрати на очищення води від фенолу ІКР в аерозольному та плівковому реакторах майже однакові. Якщо порівнювати ІКР з ІБР, то другий вид розряду вигідно відрізняється від першого тим, що проходить за суттєво вищого середнього електричного поля в розрядному проміжку, що призводить до інтенсифікації утворення хімічно активних частинок та забезпечує більш ефективне використання енергії.

Виходячи з того, що виконані до цього часу дослідження [1–12] було проведено за різних умов (вид розряду, тип домішки, її початкова концентрація та ступінь розкладання тощо), за яких отримане значення енергетичного виходу Y_{90} коливалося в межах двох-трьох порядків, зробити певні висновки щодо впливу параметрів руху води на енергоефективність її обробки ІБР досить складно. Враховуючи це, а також те, що авторами раніш в зіставлюваних умовах були виконані дослідження обробки ІБР води в плівковому (товщина плівки $\approx 0,15$ мм) [13] та крапельному [14, 15] станах ($d_k \approx 1-1,7$ мм), доцільно саме за подібних умов визначити вплив різних чинників на енергоефективність цього розряду в аерозольному реакторі. Це дало б краще розуміння впливу параметрів руху води на енергоефективність її обробки. Тому **метою цієї роботи** є дослідження енергоефективності ІБР під час обробки води в аерозольному стані та її зіставлення з енергоефективністю цього розряду, коли вода рухається у вигляді плівки чи крапель субміліметрового розміру.

Експериментальна установка. До неї входили розпилювач води, робоча камера (РК), в якій проходила обробка води, генератор високовольтних імпульсів напруги (ГІ), прилади для вимірювання параметрів розряду та концентрації забруднювача води, а також допоміжна апаратура (компресор, ротаметри тощо). Конструкцію РК схематично наведено на рис. 1. В ній розміщалися електродна система (ЕС1), яка мала по 18 заземлених 6 та високовольтних 7 електродів, що розташовані шістьма

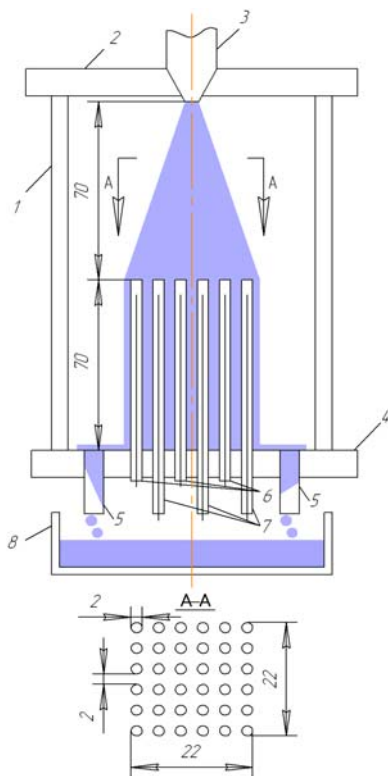


Рис. 1

рядами по шість штук в кожному. Електроди представляли собою мідні дротики діаметром 0,7 мм, на які одягнуто керамічні (алундові) трубки діаметром 2 мм, що виконували роль діелектричного бар'єру. Задля визначення впливу енергії імпульсу на ефективність обробки води в роботі також використовувалася друга більш потужна електродна система (ЕС2). В ній заземлені електроди виконано у вигляді 24 стрижнів (нержавіюча сталь) діаметром 2 мм. Високовольтні електроди (24 штуки) були такі ж самі, як і в ЕС1. Відстань між сусідніми електродами δ (рис. 1) для обох систем була однаковою (2 мм). Корпус РК був акриловий і складався з верхньої 2 та нижньої 4 кришок, котрі закривали відрізок труби 1 з внутрішнім діаметром 94 мм. Потік аерозолу утворювався пневматичним розпилювачем води 3, на вхід якого подавалася вода з верхнього резервуару та повітря під тиском 2 атм. Витрати води Q_v та повітря Q_p відповідно становили 33–64 мл/хв та 2 л/хв. Початковий об'єм води, що оброблювався ІБР, $V_0=150$ мл. Швидкість потоку аерозолу на зрізі розпилювача ≈ 5 м/с, діаметр крапель води $d_k \sim 0,01-0,1$ мм [10]. Після виходу з розпилювача факел аерозолу мав конусоподібну форму, яка на відстані ≈ 70 мм переходила в циліндроподібну (рис. 1) з діаметром ≈ 26 мм. З РК вода (разом з повітрям) виходила через патрубки 5 і попадала в нижній резервуар 8. Після обробки всього об'єму V_0 для аналізу відбиралася проба (5 мл), а потім вода переливалася з нижнього резервуару в верхній, після чого починався новий цикл її обробки.

Для створення ІБР використовувався ГІ, що міг забезпечувати уніполярні імпульси напруги з частотою їхнього повторення f до 1 кГц, амплітудою до 30 кВ, тривалістю порядку 100 нс та фронтом ≈ 40 нс. Він побудований за принципом магнітного стискання імпульсів з використанням у вихідній ланці індуктивного накопичувача енергії з переривником струму на діодах з малим часом відновлення (≈ 40 нс). Амплітуда імпульсів регулювалася шляхом зміни напруги джерела постійного струму, яке

живило ГІ. Осцилограми струму та напруги на РК записувалися осцилографом TDS 1012 за допомогою індуктивного датчика струму P6021 та активно-ємнісного подільника напруги P1015.

За модельний зразок забрудненої води, як і в попередніх роботах [13–15], використовувався розчин у водопровідній воді метиленової сині (МС). Вона є органічною речовиною, яка важко розкладається за інших методах очищення води. Концентрація МС у воді обчислювалася за поглинанням світла на довжині хвилі $\lambda=665$ нм, котре вимірювалося за допомогою монохроматора МДР-23. Дослідження проходило за початкових концентраціях МС $K_{омс}=50$ та 100 мг/л.

Результати досліджень та їхній аналіз. Параметри розряду. Як показали візуальні та фотографічні дослідження ІБР за частот f до ~ 300 Гц має однорідний характер. Про це свідчить рис. 2 ($f=220$ Гц), на якому п'ять світлих полос – випромінення ІБР. Однорідність розряду важлива задля проходження «корисних» для розкладання забруднень плазмохімічних реакцій, бо за такої форми розряду локально не підвищується температура газу. Результати, наведені в цій роботі, отримано за амплітуд напруги імпульсів на РК $U_m \approx 18\text{--}21$ кВ. Характерний для ІБР за $U_m \approx 19,5$ кВ вигляд осцилограм струму $i(t)$ (крива 1) та напруги $u(t)$ (крива 2) на РК показано на рис. 3. Вони були записані під час використання ЕС2 ($f=100$ Гц). Слід відмітити, що в досліджуваному діапазоні $f=50\text{--}300$ Гц для обох електродних систем характер осцилограм залишався практично незмінним. Датчики струму ДС та напруги ДН підключалися безпосередньо до РК, схему заміщення якої наведено на рис. 4, котра використовувалася під час розрахунків параметрів розряду.

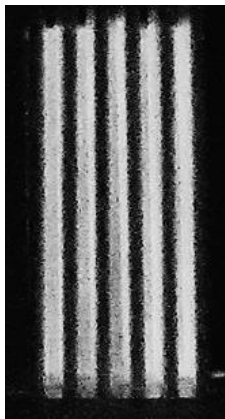


Рис. 2

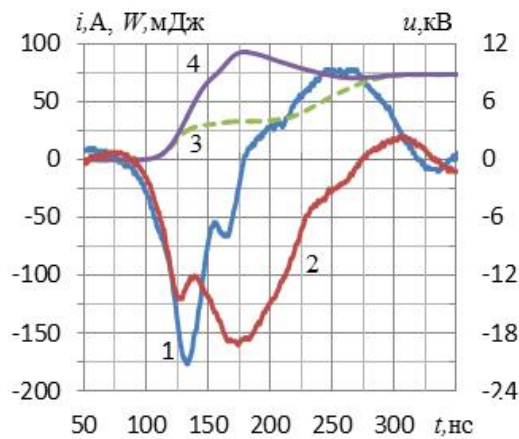


Рис. 3

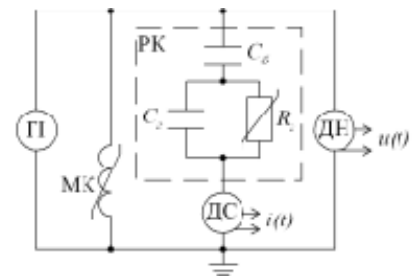


Рис. 4

На схемі позначено: сумарні ємності діелектричних бар'єрів $C_6 \approx 360$ пФ і газових проміжків $C_1 \approx 30$ пФ (для ЕС2), R_1 – загальний опір газових проміжків, котрий з початком розряду падає на кілька порядків до ~ 60 Ом. На рис. 4 також показано магнітний ключ (МК), який підключений до виходу ГІ. Він сприяє розряджанню ємності діелектричних бар'єрів після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Крива $i(t)$ свідчить, що імпульс струму складається з двох частин: прямого струму тривалістю $\tau_1 \approx 100$ нс з амплітудою $I_{m1} = 180$ А та зворотного з величинами $\tau_2 \approx 120$ нс і $I_{m2} = 75$ А. Енергія, що виділяється в газових проміжках за один розрядний імпульс за час $\tau = \tau_1 + \tau_2$, $W_1 \approx 72$ мДж. Цей процес проходить в два етапи: під час прямого (34 мДж) і зворотного імпульсів струму (38 мДж) (рис. 3, крива 3). Значення W_1 визначалося наступним чином. Спочатку розраховувалася зміна в часі t напруги на бар'єрах

$$u_6 = C_6^{-1} \int_0^t i dt + u_0 \quad (1)$$

та газових проміжках

$$u_2 = u - u_6. \quad (2)$$

Діелектричні бар'єри на електродах на момент кожного нового імпульсу струму завдяки підключенню МК на виході ГІ повністю розряджені. Тому початкова напруга на бар'єрах $u_0 = 0$. Після цього за виразом

$$W_2 = \int_0^\tau i u_2 dt \quad (3)$$

знаходилася енергія, що виділялася в газових проміжках за час імпульсу τ . Повна енергія імпульсу W_i , що надходить до розрядної камери (з урахуванням діелектричних втрат в бар'ерах та струму витіку в вологій ЕС), знаходилася за загальноприйнятим виразом [6, 8–10]

$$W_i = \int_0^{\tau} i u dt. \quad (4)$$

Її зміни під час імпульсу показано на рис. 3 кривою 4. Присутність максимуму на цій залежності пояснюється тим, що частина енергії під час прямого імпульсу струму йде на заряджання бар'єру. З рисунка видно, що в кінці імпульсу значення W_r та W_i майже однакові (різниця $\approx 1,5\%$). Це свідчить про те, що основна частина енергії імпульсу виділяється в газових проміжках.

Розкладання МС. Зміни концентрації домішки у воді $K_{мс}$ в залежності від часу її обробки t , які визначено за умов $K_{омс}=50$ мг/л, $Q_v=64$ мл/хв, $f=100$ Гц, $W_i=72, 36$ та 21 мДж, показано на рис. 5 відповідно кривими 1–3. Значення t обчислювалося за виразом $t=nV_0/Q_v$, у якому n – число циклів обробки. На рисунку для цих умов також показано енергетичні виходи Y_{90} , які розраховувалися за формулою

$$Y_{90} = \frac{0,9K_{омс}Q_v}{fW_i\tau_{90}}, \quad (5)$$

де τ_{90} – час обробки води, за якого ступінь розкладання домішки η дорівнює 90 %. Крива 4 відображує залежність $K_{мс}(t)$, яку отримано за частоти $f=50$ Гц ($K_{омс}=50$ мг/л, $W_i=36$ мДж). З рисунка видно, що за умов $W_i=21$ – 36 мДж та $f=50$ – 100 Гц швидкості розкладання МС та величини Y_{90} відрізняються в незначній мірі. Зростання енергії імпульсу до 72 мДж приводить до прискореного розкладання домішки, але при цьому на третину зменшується енергоефективність ІБР.

Результати досліджень розкладання МС за $K_{мс0}=100$ мг/л ($Q_v=64$ мл/хв) відображає рис. 6. Вони також показали подібні закономірності залежності $K_{мс}(t)$ від частоти f та енергії імпульсу W_i . Так до зменшення величини Y_{90} у півтора рази (за однакової енергії імпульсу $W_i=72$ мДж) приведе зростання f з 100 Гц (крива 2) до 220 Гц (крива 3), хоча час обробки води при цьому також скорочується на чверть. Найвищі значення $Y_{90}=32$ г/квт·год, що одержано за умов цієї роботи, отримано за $f=100$ Гц, $W_i=36$ мДж (крива 1). В цілому збільшення початкової концентрації МС з 50 до 100 мг/л приводить за схожих умов до зростання Y_{90} на $\approx 30\%$.

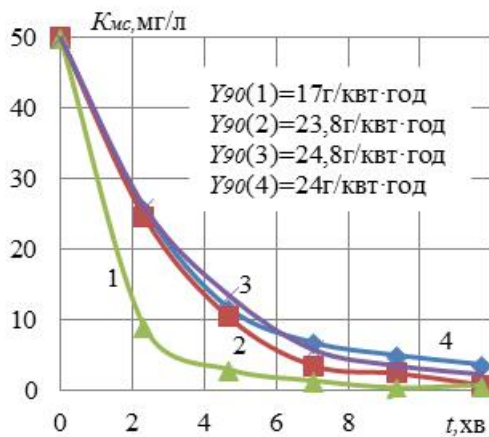


Рис. 5

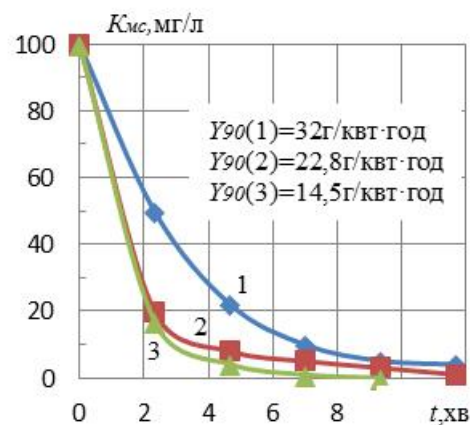


Рис. 6

Зменшення енергоефективності ІБР у разі зростання f понад ~ 100 Гц та перевищення певної межі енергії імпульсу є характерним і спостерігалось в багатьох дослідженнях, зокрема в [8–10]. Причиною цього може бути зміна перебігу важливих для генерації окиснювачів багатьох плазмохімічних реакцій, число яких сягає кількох десятків. Прояснити таку закономірність може моделювання плазмохімічних реакцій з урахуванням усіх факторів, що впливають на енергоефективність розряду.

Співвідношення витрат води Q_v та газу Q_r має суттєвий вплив на її обробку в аерозольному стані. Так зміна Q_v з 64 до 32 мл/хв, яка відповідає зменшенню водяного контенту $\beta = Q_v / (Q_r + Q_v)^{-1}$ в аерозолі з 3,2 до 1,6% (за об'ємом), визиває падіння величини Y_{90} майже вдвоє. Вірогідно, що зростання величини β приведе до збільшення частки поглинутих краплями розчину окисників, які генеруються розрядом. Це підтверджують дані [6]. Однак збільшення контенту у разі пневматичного розпилення води викликає зростання діаметра крапель, що зменшує їхню питому поверхню α . Тому повинно бути

оптимальне значення β_0 , за якого енергоефективність розряду максимальна. Для умов роботи [6] $\beta_0 \approx 5\%$.

Результати обробки ІБР води з домішкою МС (за схожих параметрів імпульсів, величин $f = 100$ Гц, $K_{\text{омс}} = 50$ мг/л, тощо) за різних режимів руху рідини наведено у таблиці (рядки 1–4). В ній для оцінки практичних можливостей методу обробки води ІБР також показано питомі енерговитрати $W_{\text{п}} = 0,9K_{\text{омс}}/Y_{90}$ на обробку 1 м^3 води за 90-відсоткового розкладання домішки з її початковою концентрацією $K_{\text{омс}}$. Як видно з таблиці, ІБР найефективніший тоді, коли обробка води йде в крапельному стані за $d_{\text{к}} \approx 1$ мм, за якого значення Y_{90} досягає 41 г/квт·год. Це на 24 % більше, ніж для крапель з $d_{\text{к}} \approx 1,7$ мм, що вказує на позитивну роль більшої розвиненості поверхні води. Але коли порівнювати обробку води в аерозольному та плівковому станах, для яких різниця значень α досягає одного-двох порядків, то величини Y_{90} відрізняються лише на $\approx 20\%$ та майже удвічі менше, ніж для крапель субміліметрового діаметру. Це вказує на те, що крім фактору α існують ще й інші суттєві чинники, котрі визначають енергоефективність ІБР під час обробки води. Одним з таких суттєвих чинників є підсилення напруженості електричного поля на поверхні краплі. Так моделювання розподілу напруженості електричного поля в пласкопаралельному газовому проміжку у разі ІБР ($\delta = 3$ мм) показало, що коли $d_{\text{к}} \approx 1$ мм напруженість поля біля краплі сягає трикратної величини по відношенню до однорідного поля в цьому проміжку за відсутності крапель. Але це підсилення у разі зменшення діаметра краплі падає та за $d_{\text{к}} < 0,5$ мм воно майже непомітне. У разі плівкового руху в пласкопаралельній електродній системі електричне поле в газовому проміжку однорідне, тому, незважаючи на те, що за плівкового та крапельного рухах фактори α майже однакові, для них величини Y_{90} відрізняються вдвоє.

№	Характер руху води	α , м ² /л	Умови обробки	η , %	Y_{90} , г/квт·год	$W_{\text{п}}$, квт·год/м ³	Посилання
1	Плівка, 0,15мм	6,7	ІБР, МС, 50мг/л, 100Гц	90	20	2,25	[13]
2	Краплі, 1мм	6		90	41	1,1	[14]
3	Краплі, 1,7мм	3,5		90	33	1,36	[15]
4	Аерозоль, 0,01–0,1мм	600–60		90	24	1,87	Ця робота
5	Аерозоль, 0,01–0,1мм	600–60	ІБР, МС, 100мг/л, 100Гц,	90	32	2,8	
6	Аерозоль, 0,01–0,1мм	600–60	ІКР, фенол, 100мг/л, 200Гц	90	22	4,1	[10]
7	Аерозоль, ~0,1мм	~60	БР, фенол, 100мг/л, 14,5кГц	90	2	45	[11]
8	Аерозоль	–	ІКР, фенол, 100мг/л, 600Гц	90	0,1	900	[12]

Задля порівняння енергоефективності різних видів розряду до таблиці (рядки 6–8) також занесено дані, що отримано під час обробки ІКР [10, 12] та бар'єрним розрядом (БР) [11] водного аерозолу, якій містить фенол – домішки, що відносно легко розкладаються під час озонування. З таблиці видно, що величини Y_{90} , які отримано в цих роботах, сильно різняться і значно нижчі, ніж під час обробки ІБР водного розчину МС (рядок 5).

Висновки. Енергоефективність обробки води імпульсним бар'єрним розрядом суттєво залежить від характеристик її руху. Найбільш доцільним є проведення обробки води в крапельному стані у разі розміру крапель субміліметрової величини, коли існує синергетичний ефект від розвиненості поверхні води та значного підсилення напруженості електричного поля біля крапель. Енергоефективність розряду за такої умови приблизно вдвічі вища ніж та, коли обробка води ведеться в плівковому чи аерозольному станах. Енергоефективність розряду сильно залежить від вмісту води в аерозолі. Оптимальне значення водного контенту знаходиться в межах кількох відсотків. В іншому випадку під час обробки води в аерозольному стані вплив різних чинників на енергоефективність імпульсного бар'єрного розряду подібний тим, що й у разі обробки води в плівковому та крапельному станах.

Роботу виконано за держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), державний реєстраційний номер теми 0117U007714, КПКВК 6541030.

1. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications. Edited by Mihaela I. Stefan. IWA Publishing, 2018. 712 p. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780407197>
2. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant. Plasma Science and Technology. *Plasma Science and Technology – Progress in Physical States and Chemical Reactions*. 2016. Pp. 429–476. DOI: <https://doi.org/10.5772/61830>.
3. Muhammad Arif Malik. Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient? *Plasma Chemical Plasma Process*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>.
4. 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. Vol. 236. Pp. 348-363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
5. Baroch P., Saito N., Takai O. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. No 8. 085207. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/8/085207>
6. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2691726>
7. Fangmin Huang, Li Chen, Honglin Wang, Zongcheng Yan. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 162. No 1. Pp. 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.041>
8. 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. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
9. 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. No 63. Pp. 353–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.12.001>
10. Pokryvailo A., Wolf M., Yankevich E., Wald S., Grabowski L.R., Van Veldhuizen E.V.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. No 5. Pp. 1731–1743. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.881281>
11. Chen Bingyan, Zhu Changping, Fei Juntao, He Xiang, Yin Cheng, Wang Yuan, Jiang Yongfeng, Chen Longwei, Gao Yuan, Han Qingbang. Water Content Effect on Oxides Yield in Gas and Liquid Phase Using DBD Arrays in Mist Spray. *Plasma Science and Technology*. 2016. Vol. 18. No 1. Pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/1/08>
12. Haixia Wu, Jiawei Fan, Yanhua Xu, Feng Liu, Zhi Fang. Organic pollutants treatment in a water aerosol reactor by pulsed corona discharge at atmospheric pressure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 569(1). 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/569/1/012029>
13. Божко І.В., Кондратенко І.П. Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.06.089>
14. Берека В.О., Божко І.В., Кондратенко І.П. Дослідження енергоефективності обробки імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.03.050>
15. Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П. Обробка водного розчину метиленової сині в краплино-плівковому стані імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.01.067>.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF WATER MOVEMENT AT ITS TREATMENTS ON ENERGY EFFICIENCY PULSE BARRIER DISCHARGE

V.O. Bereka, I.V. Bozhko, I.P. Kondratenko
 Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
 pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
 e-mail: ws77@ukr.net

A study of the energy efficiency of the pulsed barrier discharge during water treatment in the aerosol state depending on the energy of the pulses (21-72 mJ), their repetition rate (50-300 Hz), the concentration of organic impurities in water (50-100 mg / l) and water content (1.6–3.2%) in the water-air mixture. The discharge was generated by unipolar short pulses (~ 100 ns) in an electrode system with vertically arranged cylindrical electrodes with a diameter of 2 mm, the distance between which was 2 mm. The highest energy yield, which was obtained by decomposing the impurity by

90%, was 32 g / kWh. In order to determine the influence of water movement parameters on the energy efficiency of a pulsed barrier discharge under similar conditions, the energy efficiency of this type of discharge during water movement in film, drip and aerosol states was compared. It is concluded that water treatment should be carried out in the drip state on the submillimeter size of the drops. In the case of such water movement, the energy efficiency of the pulsed barrier discharge is $\approx 30\%$ higher than in aerosol. References 15, figures 6, table 1.

Key words: impulse barrier discharge, water treatment, aerosol, energy yield.

1. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Edited by Mihaela I. Stefan. IWA Publishing, 2018. 712 p. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780407197>
2. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant. Plasma Science and Technology. *Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions*. 2016. Pp. 429–476. DOI: <https://doi.org/10.5772/61830>
3. Muhammad Arif Malik. Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient? *Plasma Chemical Plasma Process*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>.
4. 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. Vol. 236. Pp. 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
5. Baroch P., Saito N., Takai O. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. No 8. 085207. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/8/085207>
6. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2691726>
7. Fangmin Huang, Li Chen, Honglin Wang, Zongcheng Yan. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 162. No 1. Pp. 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.041>
8. Tsomu 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. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
9. 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. No 63. Pp. 353–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.12.001>
10. Pokryvailo A., Wolf M., Yankevich E., Wald S., Grabowski L.R., Van Veldhuizen E.V.M., Rutgers W.R., Reiser M., Glocker B., Eckhardt T., Kempenaers P., Welleman A. High-power pulsed corona for treatment of pollutants in heterogeneous media. *IEEE transactions on plasma science*. 2006. Vol. 34. No 5. Pp. 1731–1743. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.881281>
11. Chen Bingyan, Zhu Changping, Fei Juntao, He Xiang, Yin Cheng, Wang Yuan, Jiang Yongfeng, Chen Longwei, Gao Yuan, Han Qingbang. Water Content Effect on Oxides Yield in Gas and Liquid Phase Using DBD Arrays in Mist Spray. *Plasma Science and Technology*. 2016. Vol. 18. No 1. Pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/1/08>
12. Haixia Wu, Jiawei Fan, Yanhua Xu, Feng Liu, Zhi Fang. Organic pollutants treatment in a water aerosol reactor by pulsed corona discharge at atmospheric pressure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 569(1). 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/569/1/012029>
13. Bozhko I.V., Kondratenko I.P. Efficiency of treatment of aqueous solution of methylene blue via exposure to pulse dielectric barrier discharge to the surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089> (Ukr)
14. Bereka V.O., Bozhko I.V., Kondratenko I.P. Research of energy efficiency of processing by pulse barrier discharge of water in a drop-film state. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 3. Pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.050> (Ukr).
15. Bereka V.O., Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P. Treatment of an aqueous solution of methylene blue in the droplet-film state by pulsed barrier discharge. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 1. Pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.067>. (Ukr).

Надійшла 16.03.2022
Остаточний варіант 11.04.2022