

## ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ВОДИ ТА КРИТЕРІЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ

**В.О. Берека\***, **І.П. Кондратенко\*\***, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [bereka.v@ukr.net](mailto:bereka.v@ukr.net),

*Проведено аналіз відомих результатів обробки модельних водних розчинів різними видами електричного розряду за технологією AOT's (advanced oxidation technologies / передові окисні технології). Виконано порівняння ефективності обробки з розкладання модельних забруднювачів за критерієм енергетичного виходу (Y), а також перспектив подальшого промислового впровадження технології за критерієм очікуваної продуктивності. Визначено чинники, що впливають на величину енергетичного виходу та енергоефективність загалом. Бібл. 17, рис.2, табл. 2.*

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

**Актуальність проблеми очищення та знезараження води.** Вода – невідемна складова життя людини. Запаси чистої води на Землі і далі невинно зменшуються, тому є потреба в регенерації забрудненої складової водного середовища. Промислові та побутові стоки несуть серйозну загрозу екосистемі через викиди їх у водойми [1]. У промислових стоках є широкий спектр органічних сполук, які негативно впливають на здоров'я людей, а також на екосистему загалом. Тому завдання максимального зниження негативного впливу цих забруднювачів має бути однією з найбільш пріоритетних для всіх країн. Особливо це стосується країн та міст, у яких широко розвинута промисловість. З усього спектру забруднювачів водної системи є ті, які легко піддаються розкладанню, а є, навпаки, стійкі до більшості традиційних методів очищення. Основну проблему створює друга категорія забруднювачів.

**Найвні методи обробки води.** З огляду на чинник постійного забруднення водного середовища, людство дійшло до певного алгоритму боротьби з цією проблемою. Задля запобігання забрудненню є очисні споруди. Це загальна назва для декількох етапів обробки від різноманітних забруднювачів. Треба зазначити, що є різні типи забруднювачів, а саме: дрібне сміття, органічні забруднювачі та мікрозабруднювачі (МЗ). Тому процес очищення стічних вод – багатоетапний.

Технологічний процес в очисних спорудах включає три етапи обробки [2]:

1. Перший етап. Суть і головне його завдання полягає в тому, щоби за допомогою механічних фільтрів видалити велике тверде сміття. У первинній обробці використовуються також відстійники, де відділяються маслянисті та жирові складові.

2. Другий етап. Він полягає в біологічному перетворенні розчинних і колоїдних органічних сполук за допомогою мікроорганізмів у тверді відкладення. Суміш мікроорганізмів із неорганічними і органічними частинками, що містяться у твердих речовинах, називають активним мулом.

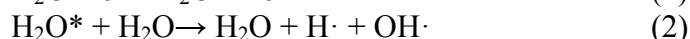
3. Третій етап. Цей етап є завершальним і складається з будь-яких додаткових способів обробки залежно від необхідного кінцевого результату. Найпоширенішим є хлорування через його низьку вартість і досить високий ступінь обробки. Однак цей процес може спричинити утворення шкідливих органічних сполук із вмістом хлору [2]. Альтернативою використанню хлорування є біоочистка, але вона має нижчу ефективність і спричинює утворення низки додаткових сполук, що включають мікрозабруднювачі.

Мікрозабруднювачі – це речовини, що надходять у довкілля з природних та антропогенних джерел і містяться в дуже малих концентраціях (одиниці мкг/л і навіть

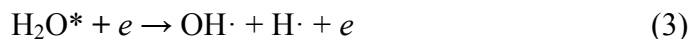
одиниці нг/л) [2], але вони суттєво впливають на довікілля та здоров'я людини. Проте аналіз літературних джерел засвідчив, що дотепер звичайні очисні споруди не могли достатньою мірою видаляти саме мікробабруднювачі (МЗ) [2].

Як наслідок можна стверджувати, що комплекс очисних споруд мусить включати технологію, яка буде ефективно видаляти МЗ. Упродовж останніх десятиріч активно досліджуються технології, у процесі роботи яких генеруються високоактивні частинки (радикали  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$ , молекули  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) та ультрафіолетове випромінювання. Згадані технології дістали назву АОТ's (advanced oxidation technologies / передові окисні технології). Це технології, у яких генерація сильних окиснювачів та УФ-випромінювання відбувається безпосередньо поруч із водою, що обробляється. Прикладами АОТ's є пероксикування (застосування пероксиду водню  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), УФ-опромінювання, радіоліз, мікрохвильова обробка, обробка ультразвуком, електрохімічне окислення, електророзрядні технології тощо. Серед усіх технологій найбільш конкурентоздатними з погляду економічної рентабельності під час промислового використання є озонування та електророзрядна обробка. Ключовою рисою озонування є обробка води лише озоном, який транспортується з камери генерування в камеру безпосередньої взаємодії з рідиною. Електророзрядна обробка дає змогу поєднати вплив усіх високоактивних сполук. Характеристикою високоактивних речовин є окислювальний потенціал. Найбільші значення окисного потенціалу  $\varphi$  мають озон  $\varphi(\text{O}_3) = 2,1$  В та гідроксильний радикал  $\varphi(\text{OH}) = 2,7$  В. Особливу цінність для розкладання МЗ має радикал  $\text{OH}$ . В електророзрядній технології він може утворюватися в нерівноважній плазмі одночасно за трьома плазмо-хімічними реакціями: коливально-обертального збудження молекул води; дисоціації води та її іонізації [3]:

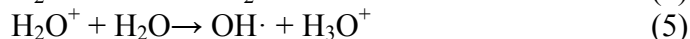
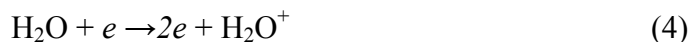
Коливально-обертальне збудження:



Дисоціація:



Іонізація:



Коли кисень піддається впливу електричного розряду, атом  $\text{O}$   $\varphi(\text{O}) = 2,42$  В може генеруватися внаслідок дисоціації молекули  $\text{O}_2$  і підвищує швидкість продукування  $\text{OH}$  [4].



Крім того, атом кисню може безпосередньо реагувати із забруднюючими речовинами і також бере участь у реакціях з  $\text{O}_2$ , що призводить до утворення  $\text{O}_3$ .

Отже, електророзрядна технологія розкладання МЗ має низку переваг, а саме: вона є відносно простою, активно вивчається та постійно вдосконалюється; обробка плазмою є екологічно чистим процесом, що виключає необхідність застосування хімічних реагентів; вона показує позитивний результат із руйнування хімічної структури стійких органічних сполук, включно з тими, до складу яких входять такі стійкі циклічні утворення, як бензолні кільця [5].

**Метою роботи** є аналіз електророзрядних технологій обробки води на основі порівняння їхньої енергоефективності, а також визначення їхнього найефективнішого виду з огляду на можливість застосування для обробки промислових об'ємів стоків.

**Критерії порівняння електророзрядних технологій обробки води.** На сьогодні в науковій літературі за цим профілем є порівняно невелика кількість порівняльних оглядів електророзрядних технологій, одним з першим серед яких є Malik [6]. У його роботі було розглянуто електророзрядні процеси, під дією яких відбувалося розкладання органічних барвників у воді. Locke і Jiang [7,4] порівнювали електророзрядні технології, за допомогою яких переважно відбувалося розкладання фенольних сполук. Vanraes [2] сфокусував увагу на

порівнянні конструктивних особливостей та специфіки конструкцій електророзрядних реакторів, які впливають на процеси обробки води.

Жодна з цих робіт не дає чіткого обґрунтування щодо того, яка технологія є найбільш прийнятна з погляду промислового використання, оскільки порівняння велось для робіт, виконаних за суттєво відмінних умов. Перш ніж перейти до порівняльного аналізу і спробувати аргументовано назвати вид електророзрядних технологій, найбільш прийнятний за низкою критеріїв, необхідно визначити ці критерії. Для модельних розчинів у літературі є порівняно універсальний показник ефективності – енергетичний вихід  $Y$  [4] (відношення кількості розкладеної під час розряду речовини до кількості вкладеної в цей розряд енергії). Зазвичай експерименти щодо енергоефективності проводяться на модельних розчинах, в яких є один вид забруднювача, а саме барвник [3, 4, 6]. Це пояснюється простою та зрозумілою методикою визначення ступеня розкладання забруднювача (знебарвлення). У разі використання електророзрядної технології треба враховувати вплив проміжних з'єднань, які утворюються внаслідок дії високоактивних частинок на молекули барвника. Ще однією причиною використання барвників є те, що проміжні з'єднання значно менше впливають на процес обробки, ніж проміжні з'єднання від розчинів із широким спектром всіляких хімічних сполук.

Для стічної води, яка містить широкий спектр сполук, важливим показником забрудненості є хімічне споживання кисню (ХСК). Цей показник свідчить про кількість кисню, потрібного для окислення речовин, які містяться в одному літрі води [мг/л]. Допустима величина ХСК варіюється залежно від того, для чого буде використана вода (питна вода, стічна, побутового використання). Спосіб визначення ХСК є достатньо складним і може бути виконаний тільки в лабораторіях зі спеціальним устаткуванням.

Наступним показником забрудненості є біохімічне споживання кисню (БСК). Це кількість кисню, використаного на аеробне біохімічне окислення під дією мікроорганізмів і розкладу нестійких органічних сполук, які містяться у воді.

Ще одним показником для оцінювання забрудненості стічних вод є вміст органічного вуглецю (ТОС). Цей термін використовується для визначення кількості органічних забруднювачів на основі вуглецю в системі водопостачання.

Кількість показників, що характеризують відповідність до норми як стічної, так і питної води, сягає десятків. Тому надалі як основний критерій порівняння буде використано лише енергетичний вихід  $Y$ .

Необхідно дати певне уточнення щодо такого показника як енергетичний вихід. На енергетичний вихід впливає низка чинників. Треба навести найбільш суттєві з них:

- середовище запалювання і роботи розряду (в об'ємі води або в газі);
- розгалуження поверхні води. Для більш ефективної обробки потрібно мати якомога більш розгалужену поверхню розчину в зоні обробки. Вище згаданий радикал ОН має вельми короткий термін існування (кілька мікросекунд). З огляду на це глибина проникнення його у воду обмежується цим часом. У роботах, проведених в Інституті електродинаміки НАН України, для опису розгалуженої поверхні користуються показником  $\alpha$  (відношення площі оброблюваної води  $S$  до її об'єму  $V$ ) [8]. Найбільше значення цього показника можна дістати, якщо вода рухається у вигляді крапель або у вигляді плівки. У випадку краплинного руху показник  $\alpha$  буде найбільшим (не враховуючи руху води у вигляді пари). На рис. 1 наведено показники розгалуженої поверхні залежно від діаметра крапель  $d_k$ . Їхній розмір для такої залежності був обраний завдяки простоті створення, хоча на практиці можна створити краплі з діаметром, істотно меншим від наведених. У випадку плівкового руху показник  $\alpha$  можна дістати не більшим ніж  $\alpha \leq 10 \text{ м}^2/\text{л}$ . На рис. 2 наведено показники розгалуженості поверхні залежно від товщини плівки  $\delta_{пл}$ . Найменша товщина плівки складає  $\delta_{пл} = 0,1 \text{ мм}$ . Плівку з товщиною меншою ніж  $0,1 \text{ мм}$  створити практично неможливо.

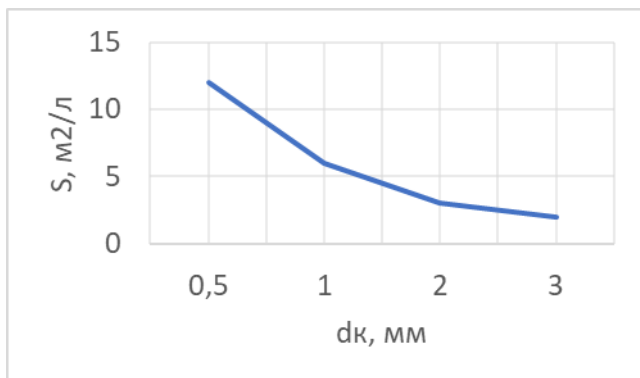


Рис. 1

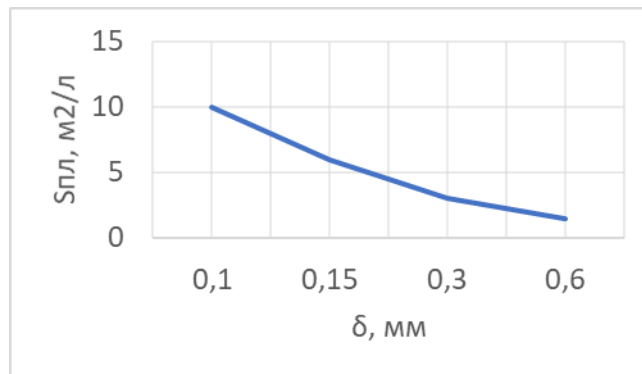


Рис.2

Проаналізувавши рисунки, можна побачити, що найбільші показники  $\alpha$  практично однакові в обох випадках, але використання плівкового режиму руху рідини з високим показником  $\alpha$  різко знижує можливу продуктивність пристрою для обробки води на відміну від краплинного;

- різновид розряду та прикладеної напруги (розряд постійного струму, розряд змінного струму, імпульсний розряд);

- частота повторення розрядних імпульсів. Цей чинник є досить неоднозначним. Логічно припустити, що, чим більша частота повторення імпульсів вкладеної енергії, тим ефективніша обробка води. Однак із літератури відомо, що оптимальна частота повторення імпульсів лежить у межах  $f \approx 100-500$  Гц [9–11]. Дослідники не знаходять аргументованого пояснення щодо цього. Оптимальна частота повторення імпульсів зазвичай визначається експериментальним шляхом:

- концентрація та різновид забруднювача;
- витрати повітря. Для ефективної роботи розряду необхідно забезпечити підтримання оптимального рівня кисню в зоні розряду. Від цього залежить кількість озону, що генерується;

- водневий показник (рН). Вміст іонів водню (гідроокисній -  $H^+$ ) у природних водах визначається здебільшого кількісним співвідношенням концентрацій вугільної кислоти та її іонів. Зазвичай використовують початкові модельні розчини з рН в межах 5-8 [6];

- наявність у початковому розчині добавок або каталізаторів (перекис водню, озон, сульфат заліза, оксид титану, активоване вугілля і т.і.) [4];

- тиск повітря в зоні обробки. Переважно всі технології обробки води проходять за атмосферного тиску. Це пояснюється тим, що немає необхідності додаткового створення підвищеного або пониженого тиску, що тягне додаткові витрати та труднощі конструювання промислової установки. Також підвищений тиск характеризується більшою напругою, яку потрібно подати, щоб утворити розряд.

**Класифікація електророзрядних технологій** відбувається за такими основними критеріями [2, 4, 6]:

- різновид розряду;
- різновид прикладеної напруги;
- середовище дії розряду.

**Класифікація на основі різновиду розряду.**

Технології на основі:

- розряду, що жевріє;
- дугового розряду;
- коронного розряду (КР);
- бар'єрного розряду (БР).

Для розряду, що жевріє, необхідно створити умови, за яких буде низький тиск. Такий розряд характеризується низькою густиною струму  $1 - 5 \text{ mA/cm}^2$ . Низький тиск газу створює труднощі для обробки води, тому що подавати воду безпосередньо в зону існування розряду неможливо. Для цього конструюється ізольована скляна камера і створюються необхідні умови через відкачування газу. Внаслідок цього обробка води ведеться лише ультрафіолетовим випромінюванням, яке виникає під час електричного розряду. Матеріал камери в цьому разі має бути таким, через який вільно проходить УФ (кварцове скло). Перелічені особливості не дають змоги цій технології конкурувати з АОТ's на основі інших розрядів у разі промислового впровадження.

Іскровий розряд являє собою перехідний процес до дугового розряду. Дуговий розряд характеризується великим струмом (десятки-тисячі ампер) і низьким падінням напруги (десятки вольт). Унаслідок цього в міжелектродному проміжку за атмосферного тиску різко зростає температура, що негативно впливає на генерацію окиснювачів, а також присутнє некорисне використання енергії, яка витрачається на нагрів газу. Тобто більша частина проміжку (~90 %) корисно не використовується.

Коронний розряд генерується лише за умови різко неоднорідного електричного поля в газі атмосферного тиску, коли хоча б один із електродів має малий радіус кривизни (гостра голка, ніж, стрижень). Іонізація і збудження нейтральних частинок газу локалізовані в обмеженій зоні (~1 мм) поблизу електроду з малим радіусом кривизни. Ця зона характеризується суттєво більшою напруженістю електричного поля порівняно з середніми значеннями для всього розрядного проміжку.

Бар'єрний розряд забезпечує порівняно просту технологію створення нерівноважної плазми в газах атмосферного тиску. За способом створення цього розряду вони поділяються на дві основні групи: традиційний БР, що збуджується змінною (синусоїдальною) напругою з частотою до десятків кГц, та імпульсний бар'єрний розряд (ІБР), що генерується імпульсами напруги малої тривалості (~ 100 нс). Під час генерації БР використовується принаймні один діелектричний бар'єр, що запобігає виникненню іскри. За специфікою роботи БР має низку переваг над КР. По-перше, БР проходить за значно більшої просторової однорідності електричного поля. По-друге, для БР притаманна рівномірність напруженості електричного поля на всьому міжелектродному проміжку, що забезпечує генеруванням окиснювачів у всьому об'ємі газу. По-третє, БР забезпечує суттєво більшу густину струмопровідних каналів. Енергоефективність БР на імпульсній напрузі вища, ніж для БР змінного струму [9–11].

#### **Класифікація на основі середовища, в якому генерується електричний розряд.**

Середовище генерування розряду може бути:

- в об'ємі води:
  - безпосередньо у воді;
  - у воді в бульбашках газу,
- у газі:
  - на поверхню води;
  - на плівку води;
  - на краплини води.

Важливо зауважити, що генерація розряду у воді є процесом більш енергозатратним, бо вода – електропровідне середовище. Крім того, під час розрядів у воді є додаткові недоліки, а саме: швидке руйнування електродів системи, обмежена невелика концентрація утворюваних окисників. Саме з цим пов'язана доцільність додаткового створення бульбашок у воді різними способами (перемішування води або під'єднання до розрядної камери джерела подачі повітря). Водночас під час розряду в газі одним із важливих чинників є велика розгалуженість поверхні води, як уже було зазначено. Тому обробку доцільно вести тоді, коли вода перебуває в краплинному стані. Найгірші ж показники виявляються тоді, коли плазма діє на шар води значної (понад 1 мм) товщини.

**Порівняння за критерієм енергоефективності (Y).** Аналіз переваг та недоліків АОТ's на основі електричних розрядів, приведених у попередньому пункті роботи,

підтверджуються даними, наведеними в табл. 1, де представлено енергетичні виходи для технологій, взятих з декількох оглядових робіт [4, 6,], а також певних робіт [5, 12, 13].

Таблиця 1

Різновид розряду	Середовище розряду	C, мг/л	Забруднювач	Ступінь розкладання, $\eta$ , %	Y, г/кВт·год	Y*, г/кВт·год	Джерела
1. КР постійного струму	Над поверхнею води	57	Родамін	50	4,86	4,26	[6]
	Над поверхнею води	28	Фенол	82	1,09	1,95	[4]
2. Імпульсний коронний розряд (ІКР)	Над водою в O <sub>2</sub>	20	Індігокармін	50	4,84	12,1	[6]
	У воді	50	Родамін	50	0,202	0,202	[6]
	У воді з барботуванням повітря	20	Кислота помаранчева	50	0,37	0,93	[6]
	На поверхню води	10	Метиленова синь	90	4,6	23	[12]
	У воді	10	Родамін В	50	0,038	0,19	[13]
3. БР	На поверхню води	94	Фенол	40	0,88	0,47	[4]
4. Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР)	На плівку води	10	Метилоранж	50	9,38	46,9	[6]
	Розпилення води в O <sub>2</sub>	22	Родамін В	50	44,9	102,94	[6]
	На плівку води $\delta \sim 0,1$ мм	50	Метиленова синь	65	87	87	[5]
5. Ковзаючий дуговий розряд	На поверхню води	20	Реактивна синь 137	50	0,038	0,095	[6]
	Розпилення води в O <sub>2</sub>	20	Реактивна синь 137	50	0,13	0,325	[6]
6. Жервіючий розряд	Над поверхнею рідини	100	Фенол	60	0,34	0,17	[4]
	У воді	12	Еозін	50	0,029	0,12	[6]
7. Радіочастотний розряд	У воді	5	Метиленова синь	50	0,037	0,37	[6]
8. Мікрохвильовий розряд	У воді з бульбашками	10	Метиленова синь	50	0,155	0,775	[6]
9. Діафрагмовий розряд	У воді	12	Метиленова синь	50	0,042	0,175	[6]
	У воді	12	Еозін	50	0,307	1,28	[6]
10. Імпульсний діафрагмовий розряд	У воді з бульбашками	10	Метилоранж	50	0,262	1,31	[6],[15]
	У воді з бульбашками	50	Метилоранж	50	1,79	1,79	[6]

Варто зазначити, що електророзрядні технології згруповано на основі схожого ступеня розкладання забруднювача, а саме 40–60 % задля коректного порівняння. В оглядах забруднювач під час проведення експериментів застосовувався різний так само, як і його

концентрація в розчині, а, отже, це може бути причиною різного результуючого  $Y$  за порівняно однакових експериментальних умов. Тому треба враховувати цей чинник.

Що стосується домішки, то для більш коректного порівняння було взято за основу її однакову початкову концентрацію ( $C = 50$  мг/л) за всіх технологій. Для цього була перерахована величина  $Y$ , коли реальна концентрація (використана в конкретній роботі) відмінна від 50 мг/л (колонка  $Y^*$ ). Основою для перерахунку було рівняння хімічної кінетики:

$$dC/dt = -k_p C C_0, \quad (7)$$

де  $C$  – концентрація домішки;  $k_p$  – константа швидкості реакції, яка залежить від різновиду домішки та окисного потенціалу окиснювачів ( $\text{OH}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , );  $t$  – час;  $C_0$  – концентрація окиснювача.

Як видно з рівняння (1), швидкість зменшення концентрації домішки лінійно залежить від її початкової концентрації та є одним з елементів у розрахунку енергетичного виходу  $Y$ :

$$Y = \Delta C / \Delta W, \quad (8)$$

де  $\Delta C$  – зменшення концентрації домішки;  $\Delta W$  – затрачена на це енергія.

На основі рівнянь (7), (8) був проведений перерахунок енергетичних виходів, які представлені в колонці  $Y^*$  (табл. 1). Інакше кажучи, оціночно можна стверджувати: у скільки разів реально використана в експериментах концентрація домішки відрізняється від умовної ( $C^* = 50$  мг/л), у стільки разів  $Y^*$  будуть вищі (чи нижчі) представлених в оглядах.

На підставі аналізу даних, представлених у табл. 1, можна зробити низку висновків. По-перше, обробку води доцільно вести в газовому середовищі на межі розділу фаз «газ-рідина». Це, наприклад, доводить порівняння ІКР над водою з ІКР у воді. За однакового ступеня розкладання й однакової початкової концентрації забруднювача в першому випадку  $Y$  в 60 разів вищий. Воду в зону обробки доцільно подавати у вигляді крапель, бо це збільшує площу контакту розряду з водою. Це підтверджує порівняння ІБР на розпилену воду і ІБР на плівку води ( $Y$  в першому випадку в 2 рази вищий). Барботування повітря під час ІКР у воді, а, як наслідок, збільшення площі контакту окиснювачів із водою і збільшення кількості окиснювачів, неістотно підвищує енергоефективність загалом. На підставі цього встановлено, що ефективність обробки щодо середовища дії плазми розташовується в такому порядку (від найбільш до найменш ефективної): розряди на воду в краплинному стані  $\rightarrow$  розряди на поверхню води  $\rightarrow$  розряди у воді.

Розряди, що жевріють, як видно з табл. 1, є малоефективні. Їхні енергетичні виходи не перевищують 1 г/кВт·год. Це пояснюється тим, що процес обробки переважним чином відбувається внаслідок УФ-опромінення. Те саме щодо ефективності можна сказати про радіочастотний, мікрохвильовий та діафрагмовий розряди. Вони не є конкурентноспроможними у разі промислового використання.

Крім того, як видно з таблиці 1., найефективнішими розрядами є КР, БР, а також іскрові розряди в газових бульбах у воді. Причому використання імпульсної напруги підвищує енергоефективність у сотні разів (залежно від різновиду розряду).

Щодо імпульсних іскрових розрядів у бульбах у воді, то прикладом можуть слугувати досить серйозні дослідження українських вчених із Харківського політехнічного університету Бойка М.І., Макогона А.В. [16, 17].

Для більш конкретного порівняння БР та КР їх енергоефективність показано в табл. 2.

У цій таблиці зібрано енергетичні виходи з використанням ІКР та ІБР за початкових концентрацій 10, 40, 50 мг/л та домішками у вигляді метилоранжу та метиленової синьої. Як видно з таблиці, під час оброблення розчину з концентрацією метиленової сині 10 мг/л енергоефективність ІКР та ІБР практично однакова – 4,6 та 4,8 г/кВт·год відповідно за близького ступеня розкладання – 90 % (ІКР) та 94% (ІБР). Якщо ж порівняти експериментальні дані з  $C = 40$  мг/л, то у випадку розкладання 98 % метилоранжу ІБР

енергетичний вихід буде в 28 разів вищий, ніж у випадку розкладання 93 % метилоранжу ІКР. На підставі цього можна стверджувати, що ІБР є значно ефективнішим, ніж ІКР для боротьби з МЗ. Такий результат пояснюється насамперед відмінністю у фізичному характері розряду. ІБР характеризується суттєво просторово одноріднішим електричним полем (набагато вища кількість струмопровідних каналів на 1 см<sup>2</sup> розрядного проміжку, а, як наслідок, більше згенерованих окисних частинок). По-друге, у разі ІБР набагато вища середня напруженість електричного поля в міжелектродному проміжку. Тобто окислювачі генеруються не в певній зоні, як у випадку ІКР (біля коронуючого електроду), а в усьому проміжку. Ця сукупність чинників загалом дає перевагу ІБР на поверхню води над усіма іншими розрядами.

Таблиця 2

Різновид розряду	Середовище розряду	С, мг/л	Забруднювач	Ступінь розкладання, η, %	Υ, г/кВт·год	Джерело
1. ІКР	На поверхню води	10	Метиленова синь	90	4,6	[12]
		40	Метилоранж	93	0,7	[12]
2. ІБР	На поверхню води	10	Метиленова синь	94	4,8	[14]
		50	Метиленова синь	78	35	[14]
		40	Метилоранж	98	20	[14]

**Висновки.** Виконано порівняльний аналіз енергоефективності обробки води на основі електророзрядних технологій. Основним критерієм порівняння технологій був енергетичний вихід розряду. На цю величину впливає низка чинників: розвиненість поверхні, середовище запалювання, різновид прикладеної напруги, концентрація та різновид забруднювача. На підставі проведеного аналізу встановлено, що найефективнішою серед електророзрядних технологій є технологія на основі імпульсного бар'єрного розряду в газі на розвинуту поверхню води у вигляді краплин.

Фінансується за кошти держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 04.07.2017 р., протокол №2. Державний реєстраційний номер теми 0117U007714. КПКВК 6541030.

1. Димакова Н.А., Шарапов Р.В. Проблема загрязнения подземных вод. *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 2. С. 79–82.
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>.
3. Hoeben W.F.L.M., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Cramers C.A.M.G., Kroesen G.M.W. The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges. *Plasma Sour. Sci. Technol.* 2000. No 9. Pp. 361–369.
4. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation, *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368.
5. Божко І.В., Кондратенко І.П. Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню, *Технічна електродинаміка*. 2018. No 6. С. 89–97.
6. Malik M. A. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2010. No 30. Pp. 21–31.
7. Locke B.R, Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005. No 45. Pp. 882–905.



8. Кондратенко І.П., Божко І.В., Берека В.О. Визначення параметрів краплинно-плівкового стану модельної рідини. Інтернет-конференція *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування*. Київ, Україна, 20-24 травня 2019.
9. Sugai T., Liu W., Tokuchi A., Jiang W. and Minamitani Y. Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013. Vol. 41. No 4. Pp. 967–974.
10. T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, Investigation for optimization of an inductive energy storage circuit for electrical discharge water treatment. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014. Vol. 42. No 10. Pp. 3101–3108.
11. Sugai T., Jiang W., Tokuchi A. Influence of Forward Pumping Current on Current Interruption by Semiconductor Opening Switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 22. No 4. Pp. 1971–1975.
12. Grabowski L.R., Veldhuizen E.M., Pemen A.J.M., Rutgers W.R. Breakdown of methylene blue and methyl orange by pulsed corona discharge. *Plasma Sources Science and Technology*. 2007. No 16. Pp. 226–232.
13. Sugiartoa A.T., Itoa S., Ohshimaa T., Skalny Jan D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *Journal of Electrostatics*. 2003. No 58. Pp. 135–145.
14. Божко І.В., Чарный Д.В. Исследование эффективности очистки воды от органических примесей импульсными разрядами. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 3. С. 81–86.
15. Фальковский Н.И. Феноменологические особенности диафрагменного разряда. *Теплофизика высоких температур*. 2009. Т. 47. № 1. С. 22–26.
16. Бойко М.І., Макогон А.В. Генератор високовольтних наносекундних імпульсів з частотою проходження більше 2000 імпульсів за секунду для очищення води за допомогою розрядів у газових бульках. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 37–40.
17. Бойко М.І., Макогон А.В. Експериментальна установка для очищення води за допомогою розрядів у газових мішурах. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 89–95.

## ELECTRIC DISCHARGE WATER TREATMENT TECHNOLOGIES AND CRITERIA OF EXPEDIENCY OF THEIR USE

**V. Bereka, I. Kondratenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [bereka.v@ukr.net](mailto:bereka.v@ukr.net).

*The analysis of the known results of processing model aqueous solutions with different types of electric discharge using the AOT technology is carried out. Comparison of the processing efficiency for the decomposition of model pollutants for energy yield criterion (Y), as well as the prospects for further industrial implementation of the technology for the criterion of expected productivity, is carried out. The factors that influence the value of energy output and energy efficiency, in general, are determined. References 17, figures 2, tables 2.*

**Keywords:** barrier discharge, water treatment, energy yield.

1. Dimakova N.A., Sharapov R.V. Groundwater pollution problem. *Modern high technologies*. 2013. No 2. Pp. 79–82.
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>.
3. Hoeben W.F.L.M., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Cramers C.A.M.G., Kroesen G.M.W. The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges. *Plasma Sour. Sci. Technol.* 2000. No 9. Pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/9/3/315>
4. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
5. Bozhko I., Kondratenko I., The efficiency of treatment of an aqueous solution of methylene blue by a pulsed barrier discharge on its surface. *Tekhnichna electrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.06.089>
6. Malik M.A. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>

7. Locke B.R, Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005. No 45. Pp. 882–905. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie050981u>
8. Kondratenko I., Bozhko I., Bereka V. Determination of the parameters of the droplet-film state of the model fluid, Internet conference *Problems of modern energy and automation in the system of nature management*. Kyiv, Ukraine, 20-24 may 2019.
9. Sugai T., Liu W., Tokuchi A., Jiang W. and Minamitani Y. Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013. Vol. 41. No 4. Pp. 967–974. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2251359>
10. T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, Investigation for optimization of an inductive energy storage circuit for electrical discharge water treatment. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014. Vol. 42. No 10. Pp. 3101–3108. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2304543>
11. Sugai T., Jiang W., Tokuchi A. Influence of Forward Pumping Current on Current Interruption by Semiconductor Opening Switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 22. No 4. Pp. 1971–1975. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004989>
12. Grabowski L.R., Veldhuizen E.M., Pemen A.J.M., Rutgers W.R. Breakdown of methylene blue and methyl orange by pulsed corona discharge. *Plasma Sources Science and Technology*. 2007. No 16. Pp. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/16/2/003>
13. Sugiartoa A.T., Itoa S., Ohshima T., Skalny Jan D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *Journal of Electrostatics*. 2003. No 58. Pp. 135–145. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(02\)00203-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(02)00203-6)
14. Bozhko I., Charnyi D. Study of the efficiency of water purification from organic impurities by pulsed discharges. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 3. Pp. 81–86.
15. Falkovskiy N. Phenomenological features of the diaphragm discharge. *Thermal physics of high temperatures*. 2009. Is. 47. No 1. Pp. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X09010039>
16. Boyko N.I., Makogon A.V. High-voltage nanosecond pulse generator with a pass rate of more than 2000 pulses per second for water purification by means of discharges in gas bubbles. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 37–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.037>
17. Boyko N.I., Makogon A.V. Experimental plant for water purification with the help of discharges in gas bubbles. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.089>

Надійшла: 09.04.2021

Received: 09.04.2021