

## Охрана окружающей среды

УДК 628.168:537.528  
DOI: 10.33070/etars.3.2019.06

**Петров С.В.<sup>1</sup>**, *докт. техн. наук*, **Бондаренко С.Г.<sup>2</sup>**, *канд. техн. наук*,  
**Пастушенко О.В.<sup>2</sup>**, **Вовненко К.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут газу НАН України, Київ*

*вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: svp\_plazer@i.ua*

<sup>2</sup> *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

*просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: S.G.Bondarenko@i.ua*

### Управління процесами плазмохімічного очищення води від стійких органічних забруднень

Актуальність роботи пов'язана з потребою пошуку альтернативних методів очистки води від стійких органічних забруднювачів, очищення за якими задовільнить рівень якості обробленої води, буде відповідати сучасним екологічним вимогам та санітарним нормам якості стічної води. Експериментально визначено ефективність методу електророзрядної очистки води від стійких органічних забруднень. Розроблено SCADA-систему, яка здійснює обробку даних та управління процесами очищення води від стійких органічних забруднень. Проведено оцифровку осцилограм електричного імпульсу за допомогою середовища Origin Pro. Визначено значення потужності, витрат енергії на очищення води від фенолу. Визначено коефіцієнт корисної дії установки по очищенню води від стійких органічних забруднень. Для моніторингу та керування процесом очищення води спроектована SCADA-система в середовищі Trace Mode 6. *Бібл. 12, рис. 10, табл. 3.*

**Ключові слова:** плазма, електричний розряд, очищення води, стійкі органічні забруднювачі, витрати енергії.

#### Постановка проблеми

У промислово розвинених країнах досить гострою проблемою є постачання необхідної кількості води, придатної для забезпечення потреб населення та промисловості. За результатами узагальнення даних державного обліку водокористування, у 2017 р. у поверхневі водні об'єкти України скинуто 4715 млн м<sup>3</sup> стічних вод, у тому числі підприємствами промисловості — 2785, житлово-комунальної галузі — 1510, сільського господарства — 355,5 млн м<sup>3</sup> [1, 2].

Із загального обсягу скинутих у водні об'єкти стічних вод забруднені складають 997,3 млн м<sup>3</sup> (21,15 %), нормативно-очищені — 1023 млн м<sup>3</sup> (21,7 %), нормативно-чисті без очистки — 2550 млн м<sup>3</sup> (54,08 %), а шахтно-кар'єрні води, що не категоруються, — 144,7 млн м<sup>3</sup> (3 %) [1, 2].

Найбільша кількість забруднюючих речовин (25 %) потрапляє у річки басейну Дніпра, майже 16 % — Сіверського Дінця. Наприклад, р. Сіверський Донець та її притоки забруднені легкоокисними речовинами, нафтопродуктами,

фенолами, сполуками азоту та важких металів. Фенол є одним з найбільш токсичних компонентів природних та стічних вод. Різноманіття речовин, що містять феноли, ускладнює підбір оптимальних способів очищення води від них. На сьогодні в Україні не залишилося жодного поверхневого водного об'єкта, який би за екологічним станом належав до водних об'єктів першої категорії.

Очищення води є одним з найважливіших завдань не тільки в Україні, а й в усьому світі. Особливо гостро стоять питання очищення стічних вод, що утворюються в результаті роботи підприємств чорної та кольорової металургії, коксохімічного виробництва, хімічної та целюлозно-паперової промисловості, машинобудування, комунального та сільського господарства, а також очищення води для потреб населення (питна вода, вода для басейнів тощо). До води плавальних басейнів пред'являються практично такі самі вимоги, що й до питної води, бо потрапляння води до рота та її заковтування при плаванні зазвичай неминучі явища. Вода плавальних басейнів не має містити отруйних речовин та патогенних мікроорганізмів та має володіти певними фізичними властивостями, що прописані у санітарних нормах.

Очищення води є досить важкою технологічною задачею. Сучасні водоочисні споруди — це складні багатоступінчасті системи, що використовують при своєму функціонуванні різноманітні методи очищення, які визначаються фізико-хімічними характеристиками води, що очищається, станом та поведінкою домішок у ній, а також цільовим призначенням. Практика свідчить, що жоден з традиційних методів та засобів очищення води не може бути універсальним для всіх видів обробки води: від підготовки питної води до знезараження побутових та промислових стоків. Останнім часом поряд з традиційними методами очищення у водоочисні споруди вводять нові, нетрадиційні методи очищення. Це викликано тим, що традиційні методи очищення не завжди можуть забезпечити прийнятну якість очищення, а для її досягнення потрібно істотно ускладнення та подорожчання схеми. Крім того, наявність невеликих населених пунктів, вахтових селищ та їх віддаленість від основних транспортних магістралей вимагають створення невеликих та маловартісних установок. Поряд з традиційними методами очищення розвиваються такі напрямки, як електрокоагуляція, озонування, електророзрядні технології, ультрафіолетовий вплив, кавітація, магнітна обробка, радіаційна обробка та окислювальні технології, які поляга-

ють у комплексному впливі на воду декількох факторів [3].

Аналіз публікацій, присвячених технологіям водоочищення, показує, що в останні роки активно розробляються технології безпосереднього впливу електричних розрядів на воду. Цей метод дає можливість вирішити багато технологічних проблем у процесах знезараження води та очистки її від домішок. У роботах [4–10] показано, що вплив електричного розряду на воду сприяє її знезараженню та розкладанню органічних сполук, які знаходяться у ній. Застосування неврівноваженої плазми електричного розряду може очищати природну та стічну воду [11, 12]. Плазмовий метод очищення води, заснований на ініціюванні різними способами електричних розрядів у рідині, можна назвати як універсальний. Суть його полягає у виникненні плазмового розряду всередині або над поверхнею рідкого середовища, при цьому використовуються різні форми розрядів.

Оскільки температура плазми вище температури дисоціації будь-яких молекул, це забезпечує розпад будь-якого стійкого з'єднання. Такий метод також є надзвичайно ефективним, оскільки у плазмі утворюється велика кількість радикалів, іонів та коливально збуджених молекул, що сильно прискорює перебіг хімічних реакцій. Завдання полягає в доведенні стану очищеної води за хімічними та біологічними показниками до рівня, який дозволяє її скидання у водойми при повній відповідності вимогам діючих санітарних норм та при мінімальних енерговитратах.

В останні роки намічається прогрес переходу від досліджень до практичного застосування плазмового розряду у водному середовищі у різних сферах життєдіяльності: природоохоронній, технічній, медицині, сільському господарстві тощо.

Особливий інтерес становить обробка водних розчинів у галузях, що швидко розвиваються: текстильній промисловості, атомній індустрії, промислового тваринництва та ін. У цьому зв'язку пропонується нова технологія, так звана «холодна плазма», для очищення та знезараження води на основі комплексного використання впливаючих фізичних факторів, ініційованих спеціальним імпульсним електричним розрядом, а саме: прискорених електронів, ультрафіолетового випромінювання, хімічно активних частинок, ударних та акустичних хвиль, кавітації та струменевих течій.

Дана технологія ефективно вирішує проблеми там, де традиційні методи очищення та знешкодження виявляються неефективними та дорогими, наприклад, де синтезуються різні види

стійких органічних забруднювачів, шкідливих речовин, радіонуклідів і т.п.

Електричний розряд у водному розчині на основі використання високовольтних імпульсів генерує високоактивні частинки такі, як  $H^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $O^+$ ,  $H^-$ ,  $O^-$ , реакційні частинки  $OH_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  та молекули  $H_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O_2$ . Основними є коливально збудженні радикали  $OH^*$ , константа швидкості реакцій яких з органічними забруднювачами у 1 млн разів вище, ніж озону. Створення промислового обладнання для плазмохімічної обробки водних розчинів з використанням імпульсного електричного розряду до рівня керованої технології націлене на необхідність підвищення ступеня очищення та зменшення енерговитрат. При розробленні нового обладнання важливо визначити кінцеву мету: плазма створить унікальні аспекти або підвищить ефективність процесів у порівнянні з існуючими. Технологія обробки водних розчинів з використанням прямого підводного електричного розряду є інноваційною, вона забезпечить якісне зростання ефективності процесів, затребуваних ринком.

Розробка плазмохімічних реакторів для цих цілей вимагає детального опрацювання модельних уявлень про природу впливу розряду на розчин, будову основної реакційної зони, співвідношення вкладів плазмових та рідкофазних реакцій. Нерівноважна плазма генерується пульсуючим електричним розрядом, в якому тривалість імпульсу зазвичай становить від кілька сотень наносекунд до десятків мікросекунд. У такому пульсуючому розряді газова температура набагато нижче електронної температури (1–10 eV), оскільки тривалість розрядного імпульсу набагато коротше, ніж час передачі тепла від електронів до молекул. Таким чином, імпульсний розряд може генерувати високо реакційну плазму з низьким енергоспоживанням, оскільки енергія, яка підводиться, в основному використовується на утворення радикалів, іонів та збуджених частинок з незначними втратами на розширення каналу та нагрів газу.

Пульсуючий внесок енергії дає можливість обмежити термічні ефекти, отже призводить до підвищення енергетичної ефективності. Грунтуючись на природних процесах спільної дії природних окиснювачів

(озону, атомарного кисню, радикалів  $OH^*$  та інших активних частинок) та УФ-випромінювання, що генеруються в дисперсному водному потоці імпульсним електричним розрядом, створений зразок установки спрямований на широкомасштабне використання. Даний комплекс, вирішений у модульному виконанні, легко вбудовується у системи обробки водних розчинів для очищення від важких металів, радіонуклідів, солей жорсткості, дезінфекції тощо.

Мета роботи — науково-технічне обґрунтування побудови системи плазмової обробки водних розчинів, а саме: системи регулювання процесу електророзрядної очистки забрудненої води, з перспективою масштабування на велику продуктивність.

Для цього необхідно вирішити такі задачі: виконати аналіз схеми процесу електророзрядної водообробки як об'єкту автоматизації; провести експериментальні дослідження використання електророзрядної очистки води від органічних забруднювачів; виконати аналіз та обробку результатів експериментальних дослідів з використанням пакетів Mathcad, Origin Pro та інших; спроектувати систему керування електророзрядною установкою в середовищі Trace Mode 6.

### Опис електророзрядної установки для очищення води від стійких органічних забруднень

Установка, яка представлена на рис.1, складається з електророзрядного модуля 4, через який прокачується забруднена вода, що подається з ємності 2 потоком II за допомогою на-

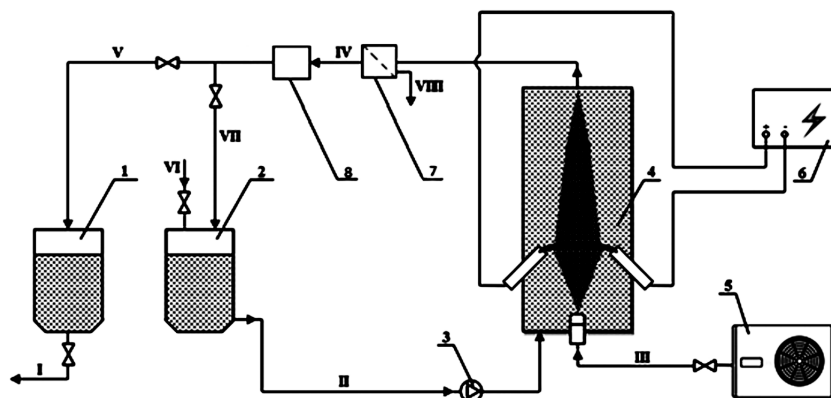


Рис.1. Схема електророзрядної установки для очищення забрудненої води: 1 — ємність для обробленої води; 2 — ємність для забрудненої води; 3 — насос подачі забрудненої води; 4 — електророзрядний модуль; 5 — компресор; 6 — високочастотне інверторне джерело високої напруги; 7 — фільтр; 8 — блок аналізу; I, V — очищена вода; II, VI — забруднена вода; III — повітря; IV — оброблена вода; VII — подача води на доочищення; VIII — осад.

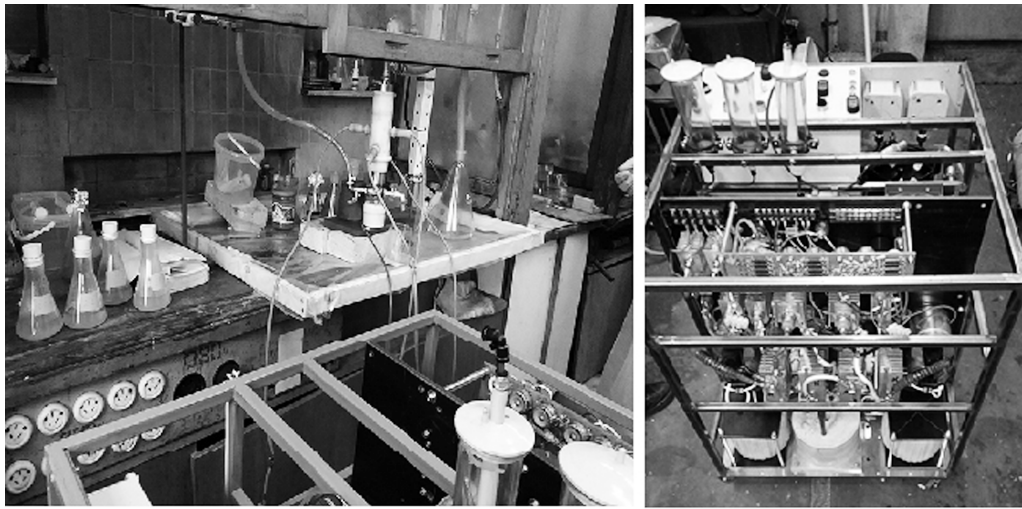


Рис.2. Лабораторна установка електророзрядної очистки води.

сосу 3. Всередині електророзрядного модуля знаходяться електроди, занурені у забруднену воду, між ними виникає дуговий заряд. Електроживлення дуги підтримується від високочастотного інверторного джерела високої напруги 6.

Після електророзрядного модуля оброблена вода потоком IV проходить через фільтр 7 та блок аналізу 8. Якщо ступінь очистки задовільний, очищена вода подається потоком V до ємності з очищеною водою 1. Якщо вода не відповідає заданим нормам, то вона спрямовується потоком VII до ємності з забрудненою водою та проходить повторну очистку.

Були проведені експериментальні дослідження ефективності водоочищення забрудненої води від стійких органічних забруднювачів на лабораторній установці електророзрядної очистки води (рис.2). Метою дослідження було визначити ефективність роботи установки за рахунок ступеня очистки від різних видів забруднювачів та розрахувати витрати потужності та енергії на очистку води.

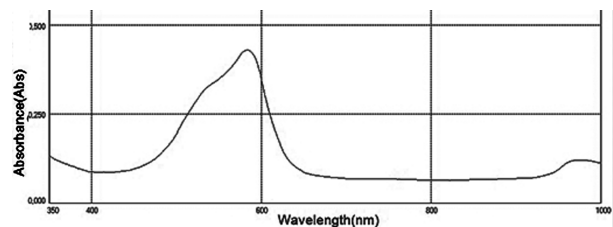
### Аналіз обробленої води

Після проведення експериментів модельні та очищені розчини були направлені у хімічну

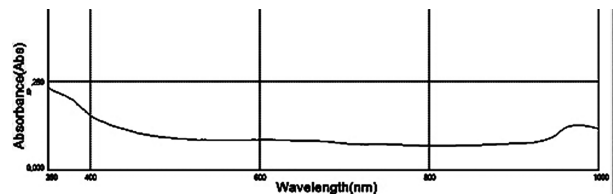
**Таблиця 1. Хімічний аналіз розчинів**

Забруднювач	pH	TDS, мг/л	ХСК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Анілін	8,52/7,93	525/491	1426/783
Фенол	7,42/6,86	417/593	1307/631
Метилфіолетовий	8,18/7,27	519/478	1805/620,3

*Примітка.* TDS — число нерозчинних елементів, або «загальна мінералізація»; ХСК — хімічне споживання кисню; pH — показник кислотності води. У чисельнику — модельний розчин, у знаменнику — оброблений розчин.



а



б

Рис.3. Графік концентрації мікрочастинок у модельному (а) та в обробленому (б) розчинах.

лабораторію, де було виконано перевірку основних показників якості очищення води. Аналіз модельних та оброблених розчинів аніліну, фенолу та метилфіолетового (аніліновий барвник) приведено у табл.1.

Для метилфіолетового барвника проведений фотометричний аналіз із використанням фотометра Unico та програмного забезпечення K3 Analyts. Сутність фотометричного аналізу полягає у тому, щоб визначити зменшення інтенсивності потоку монохроматичного світла після проходження його через шар забарвленого розчину та, врахувавши закони світлопоглинання

**Таблиця 2. Аналіз зразків води відходів хімічно-фармакологічної промисловості**

Показник	До обробки	Після обробки	НЗ	Методика виконання досліджень
Запах, бали при 20 °С	5	1	—*	ГОСТ 3351-74, ДСТУ EN 1420-1:2004
Запах, бали при 60 °С	5	2	—*	ГОСТ 3351-74, ДСТУ EN 1420-1:2004
Водневий показник рН	7,8	7,3	6,5–8,5	ДСТУ 4077-2001
Залізо загальне, мг/дм <sup>3</sup>	1,2	0,01	–	ДСТУ ISO 6332:2003
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	428	7080	≤ 1000	ГОСТ 26449.1-85
Хімічне споживання кисню дихроматне, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	5810	820	500–1000	ДСТУ ISO 6060:2003
Розчинений кисень, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,89	4,1	≥ 2	ДСТУ ISO 5813:2004
Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>	51	1,1	45	ДСТУ 4078-2001
Амоній, мг/дм <sup>3</sup>	57,9	0,01	23	ГОСТ 4192-82
Загальна жорсткість, ммоль/дм <sup>3</sup>	4,98	3,11	–	ДСТУ ISO 6059:2003
Загальна лужність, ммоль/дм <sup>3</sup>	6,87	4,2	≤ 6,5	ДСТУ ISO 9963-1:2007

*Примітка.* НЗ – Нормативне значення на скид до каналізації; \* – не нормується.

ня, зробити висновок про концентрацію розчиненої речовини. Графіки результатів представлені на рис.3.

Як можна побачити, на першому графіку присутній пік, а на другому – ні. З цього можна зробити висновок, що в обробленому розчині концентрація мікрочастинок значно зменшилася, отже електророзрядне очищення модельного розчину було ефективним.

Аналіз зразків води відходів хімічно-фармакологічної промисловості до і після плазмової обробки наведений у табл.2.

Хімічний аналіз розчину важких металів у воді наведений у табл.3.

**Таблиця 3. Результати плазмохімічної обробки розчинів важких металів**

Розчин (аналізуємий компонент)	Концентрація компоненту, мг/л	Цикли обробки розчину
Мідного купоросу в технічній воді (мідь)	33,6/3,3	2
ZnCl <sub>2</sub> в технічній воді (цинк)	3300/365	2
Перманганату калія в дистильованій воді (марганець)	109,2/81	2
CdJ <sub>2</sub> у технічній воді (кадмій)	2,4/0,6	1

*Примітка.* У чисельнику – у вихідному розчині, у знаменнику – в обробленому розчині.

Виконані досліди вказують на те, що плазмове очищення водних розчинів від різних забруднювачів ефективне. Проблема полягає в тому, щоб процес очищення забрудненої води, часто невідомого та змінного хімічного складу, довести до стану, при якому концентрація забруднюючих речовин задовольняє заданим нормам.

### Визначення питомих витрат енергії

Важливим питанням при створенні технологічного устаткування є визначення витрат енергії на процес очищення забрудненої води до стану, при якому концентрації забруднюючих

речовин задовольняють заданим нормам. Таке визначення здійснено обробкою результатів експериментальних досліджень модельних розчинів. Для цього при проведенні експериментальних досліджень по плазмохімічному очищенню забрудненої води були зняті осцилограми зміни току та напруги за допомогою осцилографу 3000 Series Scope Connect Software. Мета дослідження полягала у знаходженні залежності ступеня очищення води від витрати енергії на проведення процесу очищення води. Це надасть можливість мінімізувати витрати енергії на проведення процесу очищення води від конкретної речовини, а також обрати кількість робочих модулів для проведення процесу.

На рис.4 наведена осцилограма імпульсу сили струму та напруги розряду на режимі, придатному при очищенню забрудненої води від фенолу.

Головною особливістю вказаного режиму є утворення разом із основним розрядним каналом розвиненої мережі іскрових розрядів. Це унікальне явище, зафіксоване на осцилограмі у вигляді ще двох додаткових пробоїв після збуд-

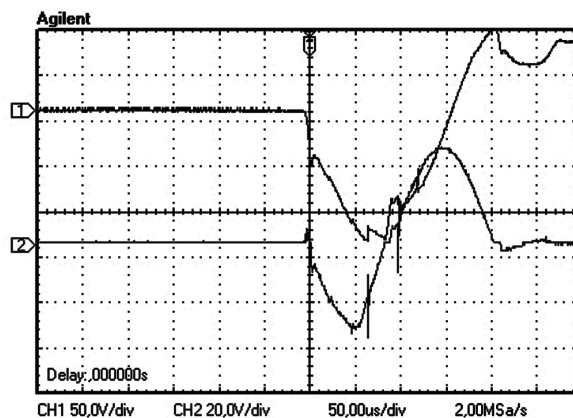


Рис.4. Осцилограма імпульсу струму та напруги на розряді.

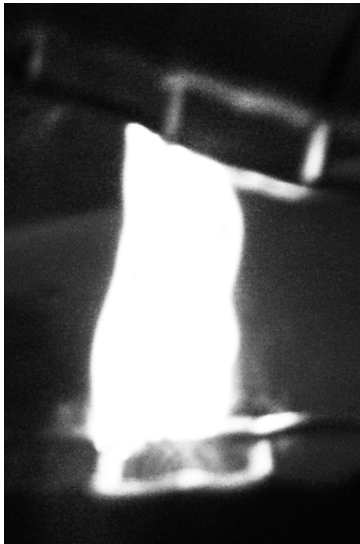


Рис.5. Горіння низки паралельних розрядів.

ження імпульсу. Воно супроводжується горінням низки паралельних розрядів (рис.5), що дає можливість значно збільшити об'єм зони обробки та, як наслідок, її ефективність.

Візуально у плазмовому реакторі створюються умови об'ємного горіння (рис.6). У такому разі вся оброблювальна рідина проходить через зону розряду.

Для розрахунку витрат потужності потрібно отримати числові показники напруги та струму, що записувалися за допомогою осцилографа (див. рис.4). Повна тривалість розряду складає приблизно 300 мкс. На цьому інтервалі

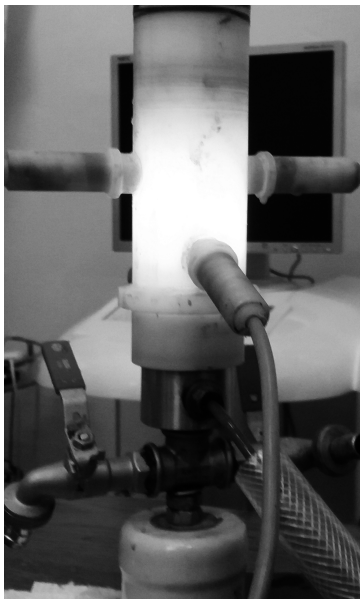


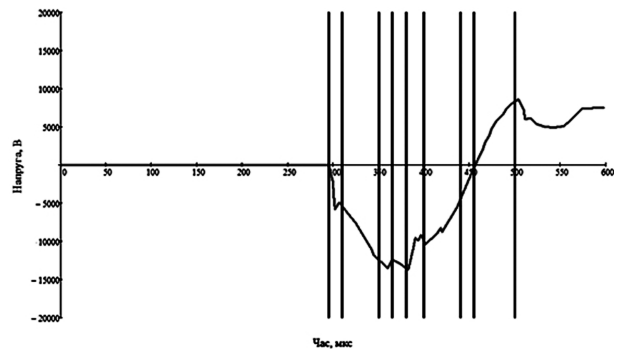
Рис.6. Об'ємне горіння розряду в проточному плазмовому реакторі.

необхідно виділити фази розряду та отримати безпосереднє значення вихідних величин для переносу їх в один з математичних пакетів для подальшого розрахунку.

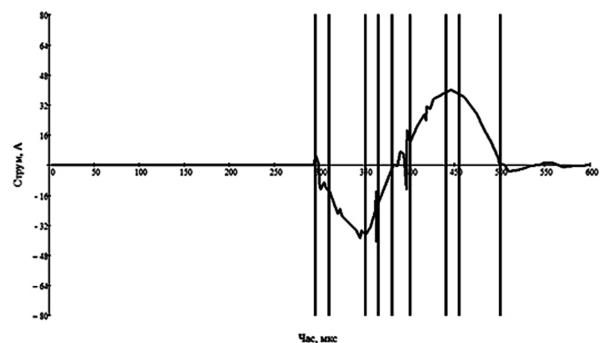
Оцифровка осцилограми проведена за допомогою програмного пакету OriginPro 2017, обраного за показниками ефективності при рішенні такого класу завдань (рис.7). Отримані масиви даних дають можливість виконувати необхідні розрахунки та побудови в математичних пакетах. Після оцифровки отримані дані дали можливість виконати необхідні розрахунки в математичному пакеті Mathcad. Розрахунок проведений для усіх фаз розряду.

У наведеному на осцилограмі імпульсі протікають 8 фаз: зростання напруги до пробою – 6 кВ; пробій з падінням напруги до 5 кВ; горіння перехідного розряду: напруга збільшується до 14 кВ, струм – до 40 А; другий пробій з падінням напруги до 13 кВ та падінням струму до 24 А; загасання розряду з переходом струму через нуль; зворотний імпульс із збудженням другого пробою.

У математичному пакеті Mathcad була розрахована потужність на всіх фазах та побудова-



а



б

Рис.7. Графік зміни з часом напруги (а) та струму (б).

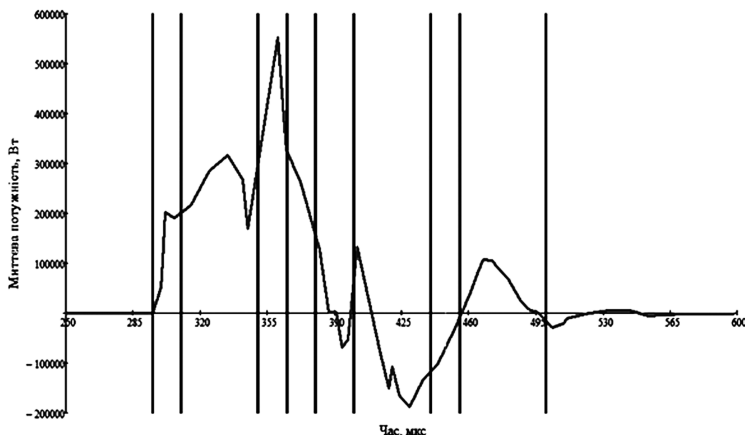


Рис.8. Залежність миттєвої потужності від часу горіння розряду.

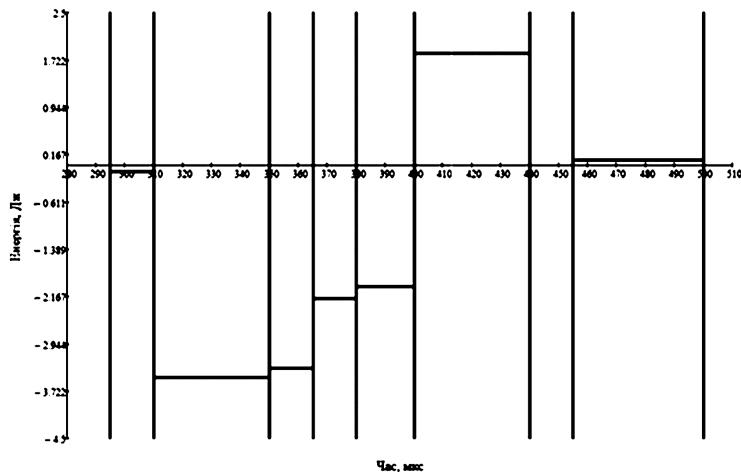


Рис.9. Розподілення енергії за фазами.

ний графік її залежності від часу горіння розряду (рис.8). Згадані вище фази, що протікають у розряді, на графіку зображені вертикальними лініями.

Вклад енергії для розряду в перших чотирьох фазах розраховано за методом трапецій:

$$E = \frac{h}{2} [(y_0 + y_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} y_i],$$

де  $E$  — енергія;  $h$  — крок;  $y_0$  — початкове значення потужності;  $y_n$  — кінцеве значення потужності;  $y_i$  —  $i$ -е значення потужності.

Вклад енергії був розрахований для кожної фази горіння розряду окремо. На рис.9 представлено розрахунки для кожної з фаз.

Сумарний вклад енергії в розряд на даному режимі — 9,328 Дж, сумарний ККД — 0,324. Такі розрахунки дають можливість визначити параметри роботи плазмохімічного модуля для мінімізації витрат енергії на проведення процесу очищення води від конкретної речовини та зробити правильний підбір конструктивних параметрів модуля.

### Аналіз технологічної схеми як об'єкту автоматизації

Ціллю процесу є отримання на виході очищеної води заданої якості очистки. На процес впливають значення напруги та струму, витрата вихідного компонента, витрата повітря, тиск у фільтрах. Аналіз показав, що для нормального функціонування схеми необхідні такі дії: контролювати тиск у фільтрі; регулювати рівень в ємності із забрудненою водою; контролювати рівень в ємності з очищеною водою; регулювати та контролювати витрату подачі забрудненої води до електророзрядного модуля; регулювати та контролювати витрату подачі повітря; контролювати витрату очищеної води; контролювати значення струму та напруги; контролювати значення електропровідності, рН та кольору води у блоці аналізу.

У середовищі SCADA-системи Tcase Mode був розроблений набір сторінок візуалізації технологічного процесу, за допомогою яких здійснюється моніторинг і керування технологічним процесом. Для створення графічного інтерфейсу використані стандартні блоки бібліотеки Tcase Mode. На рис.10 показано повноекранний режим головного екрану оператора.

Tcase Mode 6 призначена для автоматизації промислових підприємств, енергетичних об'єктів та є інформаційно-вимірювальною (для моніторингу — відображення графічних залежностей за певний період часу, візуалізація зміни параметрів у реальному часі), а також керуючою з системою зворотних зв'язків. Головний вплив на перебіг хімічних реакцій складається через управління концентрацією радикалів  $\text{OH}^*$  через рівень енергії у розрядному імпульсі та частоти її слідування. Існують чіткі

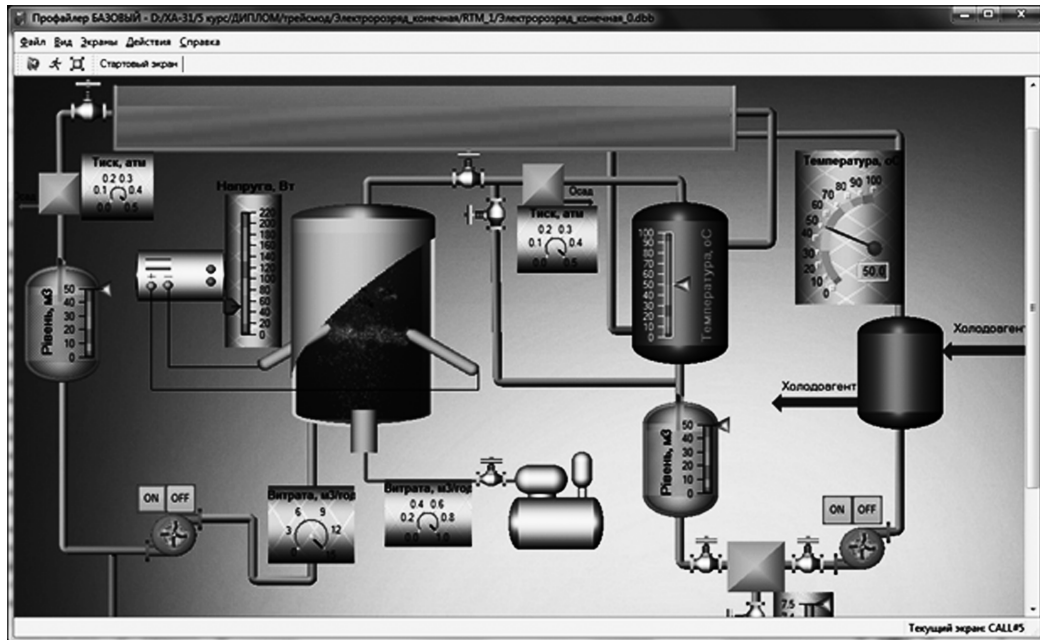


Рис.10. Вікно профайлера з готовою до запуску установкою.

вимоги щодо викидної води, саме тому потрібно передбачити контури стабілізації основних показників води при зміні вхідних параметрів. Для точного контролю параметрів регулювання було обрано ПІД-регулятор. Загальне рівняння ПІД-регулятора має вигляд:

$$\mu = k \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt + T_{пр} \varepsilon' \right),$$

де  $\mu$  – регулюючий вплив на виході регулятора;  $k$  – коефіцієнт передачі;  $\varepsilon$  – сигнал неузгодження, що подається на вхід регулятора;  $T_i$ ,  $T_{пр}$  – постійні часу інтегральної та диференціальної складових.

Сигнал неузгодження формується із значень електропровідності, рН та кольору вихідного розчину, які корелюють з хімічним складом, та регулюючими характеристиками (частота слідування імпульсів та енергія в розряді). Експериментально визначено, що саме їх значення корелюють з утворенням головного хімічного реагента – радикала ОН.

### Висновки

Використання плазми в технології знезараження та очищення води є перспективним щодо промислового застосування та має такі переваги: відсутність утворення побічних продуктів та застосування хімічних реагентів. Установки плазмохімічної обробки води не потребують

спеціальних приміщень та можуть експлуатуватися у стаціонарному або мобільному варіантах для очищення та знезараження стічних вод різного походження та у різній кількості. Витрати на обробку води за даною технологією не перевищують витрат у порівнянні з традиційними методами. Розроблений алгоритм розрахунку потужності та енергії, які витрачаються на оброблення забрудненої води, надасть можливість визначити енергію, необхідну для потрібного ступеня очистки води, тим самим мінімізувати витрати електроенергії на проведення процесу очищення та зробити правильний підбір параметрів роботи плазмохімічного модуля.

### Список літератури

1. Офіційний сайт Міністерства екології та природних ресурсів України. – <http://www.menr.gov.ua/>
2. Про забруднення водних ресурсів зворотними водами у цифрах за останній період. – <http://ecolog-ua.com/news/pro-zabrudnennya-vodnyh-resursiv-zvrotnymy-vodamy-u-cyfrah-za-ostanniy-period/>
3. Шиян Л.Н. Химия воды. Водоподготовка: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 72 с.
4. Lubicki P., Jayaram S. High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium *Yersinia enterocolitica*. *Bioelectrochem. Bioenergetics*. 1997. Vol. 43, № 1. P. 135–141.
5. Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1999. Vol. 32, № 15. P. 1908–1915.



6. Пискарев И.М. Окисление фенола частицами ОН, Н, О и О<sub>3</sub>, образующимися в электрическом разряде. *Кинетика и катализ*. 1999. Т. 40, № 2. С. 505–511.
7. Рязанов Н.Д., Перевазкина Е.Н. Действие обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда в воде. *Электронная обработка материалов*. 1984. № 2. С. 43–45.
8. Cheng H., Chen S., Wu Y., Ho D. Non-thermal plasma technology for degradation of organic compounds in wastewater control a critical review. *Journal Environ. Eng. Manage.* 2007. Vol. 17, № 6. P. 427–433.
9. Быков А.А. Исследование газожидкостных течений и характеристик электрического разряда в процессах очистки промышленных и бытовых сточных вод : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 24 с.
10. Foster J., Sommers B.S., Gucker S.N., Blankson I.M., Adamovsky G. Perspective on the interaction of plasmas with liquid water for water purification. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, Vol. 40, № 5. P. 1311–1323.
11. Anpilov A., Barkhudarov E., Christofi N., Kop'ev V., Kossyi I., Taktakishvili M., Zadiraka Y. Pulsed high voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids. *Lett. Appl. Microbiol.* 2002. Vol. 35, № 1. P. 90–94.
12. Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J.D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *J. Electrostatics*. 2003. Vol. 58, № 1–2. P. 135–145.

Надійшла до редакції 05.02.2019

**Петров С.В.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Бондаренко С.Г.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Пастушенко А.В.<sup>2</sup>**, **Вовненко К.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: svp\_plazer@i.ua

<sup>2</sup> **Национальный технический университет Украины**

«Киевський политехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», Киев  
просп. Перемоги, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: S.G.Bondarenko@i.ua

## Управление процессами плазмохимической очистки воды от стойких органических загрязнений

Актуальность работы связана с необходимостью поиска альтернативных методов очистки воды от стойких органических загрязнителей, очистка которыми удовлетворит уровень качества обработанной воды, будет соответствовать современным экологическим требованиям и санитарным нормам качества сточной воды. Экспериментально определена эффективность метода электроразрядной очистки воды от устойчивых органических загрязнений. Разработана SCADA-система, которая осуществляет обработку данных и управление процессами очистки воды от устойчивых органических загрязнений. Проведена оцифровка осциллограмм электрического импульса с помощью среды Origin Pro. Определены значения мощности, затрат энергии на очистку воды от фенола. Определен коэффициент полезного действия установки по очистке воды от устойчивых органических загрязнений. Для визуализации и управления процессом очистки воды построена технологическая схема в среде Trace Mode 6. *Библ. 12, рис. 10, табл. 3.*

**Ключевые слова:** плазма, электрический разряд, очистка воды, стойкие органические загрязнители, затраты энергии.

**Petrov S.V.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences,  
**Bondarenko S.G.<sup>2</sup>**, Candidate of Technical Sciences,  
**Pastushenko A.V.<sup>2</sup>**, **Vovnenko K.V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> **The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**  
 39, Degtyarevskaya Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: svp\_plazer@i.ua

<sup>2</sup> **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev**  
 37, Peremogy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: S.G.Bondarenko@i.ua

## Plasma-Chemical Process Control of Water Purification from Persistent Organic Pollution

The urgency of work is connected with the need to find alternative methods of water purification from persistent organic pollutants, which will satisfy the level of quality of treated water and will meet modern environmental requirements and sanitary norms of sewage quality and electrical energy. The efficiency of the method of electrodischarge water purification from persistent organic pollutants has been experimentally determined. The SCADA-system, which provides data processing and management of water treatment processes from persistent organic pollutants, is developed. Digitizing oscillograms using the Origin Pro environment. The values of power, energy consumption for water purification from phenol are determined. Determine the efficiency of the plant to clean water from persistent organic pollutants. To visualize and control the process of water purification, a technological scheme was built in the environment of Trace Mode 6. *Bibl. 12, Fig. 10. Tab. 3.*

**Key words:** plasma, electric discharge, water purification, persistent organic pollutants, energy costs.

### References

- [Official site of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine]. — <http://www.menr.gov.ua/> (Ukr.)
- [On Contamination of Water Resources by Return Water in Figures for the Last Period]. — <http://ecolog-ua.com/news/pro-zabrudnennya-v-odnyh-resursiv-zvorotnymy-vodamy-u-cyfrah-za-ostanni-period/> (Ukr.)
- Shiyan I.N. [Chemistry of water. Water treatment : Tutorial]. Tomsk : TPU, 2004. 72 p. (Rus.)
- Lubicki P., Jayaram S. High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium *Yersinia enterocolitica*. *Bioelectrochem. Bioenergetics*. 1997. 43 (1). pp. 135–141.
- Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1999. 32 (15). pp. 1908–1915.
- Piskarev I.M. [Oxidation of phenol by OH, H, O and O<sub>3</sub> particles formed in an electrical discharge]. *[Kinetics and catalysis]*. 1999. 40 (2). pp. 505–511. (Rus.)
- Ryazanov N. D., Perevyazkina E.N. [Action disinfecting factors of a pulsed electric discharge in water]. *[Electronic processing of materials]*. 1984. No. 2. pp. 43–45. (Rus.)
- Cheng H., Chen S., Wu Y., Ho D. Non-thermal plasma technology for degradation of organic compounds in wastewater control a critical review. *Journal Environ. Eng. Manage.* 2007. 17 (6). pp. 427–433.
- Bykov A.A. [Investigation of gas-liquid flows and electrical discharge characteristics in the treatment of industrial and domestic wastewater]. Avtoref. dis. ...Cand.Techn. of Sci. Moscow, 2011. 24 p. (Rus.)
- Foster J., Sommers B.S., Gucker S.N., Blankson I.M., Adamovsky G. Perspective on the interaction of plasmas with liquid water for water purification. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2012. 40 (5). pp. 1311–1323.
- Anpilov A., Barkhudarov E., Christofi N., Kop'ev V., Kossyi I., Taktakishvili M., Zadiraka Y. Pulsed high voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids. *Letters in Applied Microbiology*. 2002. 35 (1). pp. 90–94.
- Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J.D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *Journal Electrostatics*. 2003. 58 (1–2). pp. 135–145.

Received February 5, 2019