

ФІЗИЧНІ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ТА АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Н.А. Шидловська^{1*}, чл.-кор. НАН України, С.М. Захарченко^{1**}, докт. техн. наук,
М.Ф. Захарченко^{2***}, канд. хім. наук, І.Л. Мазуренко^{1****}, канд. техн. наук,
М.А. Куліда^{3*****}, канд. вет. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, iryalmazurenko@gmail.com

² Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України,
пр. акад. Палладіна, 32/34, Київ, 03142, Україна,

e-mail: zakhar@ionc.kiev.ua

³ Національний університет біоресурсів та природокористування України,

вул. Потехіна, 16, Київ, 03041, Україна,

e-mail: mkulida@ukr.net

Наведено критичний аналіз сучасних електрофізичних і електрохімічних методів підготовки води в контексті ефективності оброблення ними поверхневих природних вод для потреб теплової і атомної енергетики. Розглянуто фізичні аспекти електрохімічної коагуляції. Розраховано теоретичні значення питомої енергії руйнування пасивуючих плівок на поверхні алюмінієвих і залізних електродів та необхідні для цього мінімальні значення напруги на них. Описано механізми перетворення енергії розрядних імпульсів у зануреному у воду шарі гранул утворюючого коагулянт металу. Згідно з описаною моделлю процесів перетворення енергії розраховано мінімальні теоретичні значення питомої енергії утворення ерозійних частинок Al та Fe з розплавленого металу та з металу, що випарувався. Описано методику дослідження енергоефективності плазмоерозійної коагуляції в лабораторних умовах та наведено результати цих досліджень. Розраховано питому енергію на освітлення 1 м³ води електрохімічною і плазмоерозійною коагуляцією в різних режимах з використанням Al та Fe як утворюючих коагулянт металів. На основі аналізу отриманих результатів представлено рекомендації щодо підвищення енергоефективності режимів плазмоерозійної коагуляції. Бібл. 29, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: розрядний струм, тепла енергетика, енергоефективність, плазмоерозійна коагуляція, електрохімічна коагуляція, водопідготовка.

Вступ. Сумарна встановлена потужність АЕС, ТЕЦ і ТЕС генеруючих компаній за даними Національної енергетичної компанії Укренерго у серпні 2021 року становила 41792 МВт [1]. Для компенсації втрат води в їхніх теплових мережах за приблизними підрахунками щогодинно необхідно підживлення порядку 10000 м³. Підсилення антропогенного впливу на навколишнє середовище призводить до збільшення номенклатури та концентрації високомолекулярних домішок у природних водах, які важко видаляються [2, 3], а також до глобального потепління і забруднення вод фосфатами, що в свою чергу, є причиною збільшення концентрації в них ціанобактерій (синьо-зелених водоростей) [4] та пролонгації сезону їх активного розмноження [5]. Це значно ускладнює задачу забезпечення енергетики чистою водою у все зростаючих об'ємах та викликає необхідність розроблення нових, більш ефективних методів її очищення [6]. **Метою роботи** є критичний аналіз сучасних електрофізичних та електрохімічних методів очищення води, дослідження їхньої енергоефективності в різних режимах та розроблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності режимів плазмоерозійної коагуляції.

Аналіз методів підготовки води. Традиційна технологічна карта водопідготовки теплових мереж включає в себе наступні основні операції [6]: 1) механічну фільтрацію від крупнодисперсних домішок; 2) освітлення з видаленням дрібнодисперсних домішок, мікроорганізмів, розчинених органічних забруднень та іонів важких металів; 3) корекцію кислотності; 4) деіонізацію на катіонітних і аніонітних фільтрах 1-го шаблю; 5) дегазацію; 6) деіонізацію на фільтрах 2-го шаблю та на фільтрах сумісної дії. Найбільше забруднень як за номенклатурою, так і в окремих випадках, за масою видаляються на операції освітлення. Від якості її проведення залежать не тільки показники води, а і період реновації катіонітних і аніонітних смол фільтрів, термін їх експлуатації та період

© Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Мазуренко І.Л., Куліда М.А., 2022
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-9907-7416>; ** <https://orcid.org/0000-0002-8597-8045>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-9408-6850>; **** <https://orcid.org/0000-0002-0146-7396>;
***** <https://orcid.org/0000-0001-8937-1972>

ремонтів, строк служби і коефіцієнт корисної дії теплового обладнання. Операція освітлення включає в себе коагуляцію, відстоювання, знезараження, консервацію, зберігання води та фільтрацію її на механічних фільтрах тонкого очищення з антрацитовою крихтою [6].

Традиційно коагуляція здійснюється хімічним способом в результаті додавання у воду солей алюмінію або заліза. Аніони цих солей (Cl^- , SO_4^{2-} та ін.) вносять додаткові забруднення та підвищують кислотність води, що призводить до необхідності виконання операцій по її корекції. Крім того, коагуляція має порівняно невисоку ефективність під час видалення неполярних та слабо полярних молекул, таких як циклоалкани, бензол, їхні похідні та ін.

Одним з ефективних методів боротьби з такими забрудненнями є деструкція їх молекул у воді за допомогою плазмохімічних процесів, або як ще їх називають у англійській літературі – *advanced oxidation processes*, що можна перекласти як розвинені процеси окислення [7], а потім видалення залишків за допомогою таких традиційних процесів як коагуляція і відстоювання з подальшими седиментацією, флотацією, фільтруванням та ін. [8]. До плазмохімічних процесів оброблення води відносять, насамперед, коронний розряд на поверхню її тонкого шару [7], імпульсний коронний розряд в її об'ємі [9], стримерні [10] та плазмові розряди в ній [11], імпульсний бар'єрний розряд [12], діафрагменний розряд [13], розряд у водно-повітряних сумішах [14, 15] та ін. [16].

Питомі витрати електричної енергії на деструкцію високомолекулярних забруднень плазмохімічними методами складають: 0,43...0,51 кВт-год./г для натрійцефтріаксону, що відповідає приблизно 4,8...5,1 кВт-год./м³ для водних скидів фармацевтичних підприємств [15], 0,51...5,88 кВт-год./г для фенолу, 0,012...5,71 кВт-год./г для метиленової сині, 0,021...0,76 кВт-год./г для метилоранжу [8], 0,036...0,05 кВт-год./г для парацетамолу, 0,024...0,042 кВт-год./г для ібупрофену і 0,029...0,05 кВт-год./г для саліцилової кислоти [17]. Хоча питомі витрати електричної енергії саме на деструкцію високомолекулярних сполук у воді плазмохімічними методами суттєво нижчі, ніж іскроерозійною коагуляцією [15], їх продуктивність на сучасному етапі розвитку обладнання на 2...3 порядки нижча за необхідну для підготовки води задля підживлення ТЕС навіть малої потужності [7, 8]. Зважаючи на зазначене вище, на сьогодні плазмохімічні методи мають найбільшу перспективу у разі оброблення водних скидів фармацевтичних підприємств, а їх використання для потреб теплової енергетики малоїмовірне.

Майже повністю позбавитися не тільки від аніонів солей і кислот, а й взагалі від хімічних реагентів під час очищення великих об'ємів природних вод дає змогу найсучасніша технологія мембранної фільтрації, або як її ще називають, зворотного осмосу, яка використовується разом з технологією ультрафільтрації [18]. Але, як і будь-яка технологія, вона має свої недоліки – необхідність заміни обладнання майже всього технологічного ланцюгу водопідготовки, що призводить до дуже великих капітальних вкладень, висока собівартість та відносно малий термін служби мембранних молекулярних фільтрів, необхідність їх частого промивання й очищення, використання складного обладнання з високим тиском, тощо. Розвиток сучасних методів виготовлення мембранних фільтрів [19] надасть змогу збільшити конкурентоздатність цієї технології. Вже відомі приклади її успішного використання [20]. Вона може бути актуальною для об'єктів теплової енергетики, які знаходяться на стадії проектування, коли немає потреби у демонтажі старого обладнання хімічної водопідготовки.

На відміну від попередньої технології, електрохімічна [21], іскроерозійна [6] та її більш сучасна версія – плазмоерозійна коагуляція [22] не потребують демонтажу традиційного обладнання хімічної водопідготовки. До вже наявного обладнання додаються електрокоагулятор і джерело постійного струму у разі електрохімічної коагуляції або розрядна камера та генератор розрядних імпульсів у разі іскроерозійної чи плазмоерозійної коагуляції. На відміну від двовимірних (поверхневих) плазмохімічних процесів, висока ефективність яких спостерігається лише у вузькому поверхневому шарі води або у дрібнодисперсних водно-повітряних сумішах [8], ці технології є тривимірними і забезпечують одночасну обробку всього об'єму води у активній зоні коагулятора або розрядної камери [22]. Тому їх продуктивність на два-три порядки вища і за цим критерієм вони можуть бути застосовані на об'єктах теплової енергетики.

Завдяки дії електричної енергії, коагулянт в цих технологіях отримується безпосередньо з металу електродів та шару гранул під час його хімічної взаємодії з водою, яка обробляється. Тому шкідливі аніони солей і кислот відсутні. Зважаючи на наведене вище, саме ці технології можуть бути альтернативною хімічній коагуляції на об'єктах теплової енергетики без демонтажу існуючої системи водопідготовки. Розглянемо фізико-хімічні та енергетичні аспекти цих процесів більш детально.

Фізико-хімічні та енергетичні аспекти електрохімічної коагуляції. Утворюючі коагулянт метали Me валентністю x , які мають від'ємне значення стандартного електродного потенціалу, у випадку ідеального стану їх поверхні повинні взаємодіяти з водою без залучення сторонніх джерел енергії згідно з хімічною реакцією $Me + H_2O = Me(OH)_x + (x/2) \cdot H_2 \uparrow$. Але на практиці, внаслідок утворення на їхній поверхні пасивуючих плівок з оксидів та гідроксидів, цей процес гальмується, а у випадку алюмінію, пасивуючі плівки на поверхні якого є термодинамічно стійкими, не відбувається зовсім. Для руйнування таких плівок у стандартних умовах необхідно затратити енергію, мінімальне теоретично можливе значення якої дорівнює вільній енергії Гіббса їх утворення в цих умовах ΔG_{298}^0 . Будемо вважати, що на місці зруйнованої плівки одразу ж утворюється нова, і щоб отримати чистий метал, плівку необхідно руйнувати щоразу. Тоді, знаючи кількість N_{Me} атомів металу Me у молекулі його оксиду або гідроксиду і молярну масу металу M_{Me} , розрахунок теоретичних питомих витрат енергії на відновлення 1 кг металу внаслідок електрохімічного руйнування його сполук здійснюється за формулою $w_e = -\Delta G_{298}^0 / (N_{Me} \cdot M_{Me})$.

У переважній більшості випадків на поверхні алюмінію утворюється його оксид Al_2O_3 . Енергія Гіббса утворення цієї сполуки складає $-1582,3$ кДж/моль, а теоретичне значення питомої енергії відновлення металу $w_e=8,139$ кВт·год./кг [22]. В результаті хімічної взаємодії заліза з водою можуть утворюватися декілька його оксидів і гідроксидів: $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . Найменше теоретичне значення питомої енергії відновлення металу спостерігається під час руйнування FeO і складає $1,212$ кВт·год./кг, а найбільше – під час руйнування $Fe(OH)_3$ і складає $3,47$ кВт·год./кг [22]. У подальшому будемо умовно вважати, що на поверхні залізних електродів утворюється тільки $Fe(OH)_3$.

Оскільки у даних процесах на катоді відновлюється водень, електродний потенціал якого прийнятий рівним нулю, то напруга між електродами чисельно буде дорівнювати потенціалу анода. Його мінімально можливе теоретичне значення легко знайти, знаючи число електронів, які беруть участь у процесі Z , модуль заряду електрона \bar{e} та число Авогадро N_A за формулою $U_E = -\Delta G_{298}^0 / (Z \cdot \bar{e} \cdot N_A \cdot N_{Me})$. Для Al_2O_3 значення цієї напруги становитиме $2,733$ В, а для $Fe(OH)_3$ $2,417$ В. Однак, практичне значення напруги між електродами U_C завжди буде вище мінімально можливого теоретичного U_E внаслідок наявності додаткових складових: падіння напруги на омичному опорі електроліту, який збільшується із ростом струму та перенапруги електрода, яка згідно з рівнянням Батлера-Фольмера збільшується з ростом щільності струму.

Найменше описане в літературі [21] практичне значення напруги U_C між електродами найбільш економічного на сьогодні «щільного» (з відстанню між електродами менше 15 мм і великою їхньою площею) лабораторного електрокоагулятора для алюмінієвих і сталевих електродів становило приблизно 5 В. Практичне значення питомої енергії, яка витрачається на електрохімічне розчинення 1 кг металу в описаних умовах розраховується за формулою: $w_c = \bar{e} Z N_A U_C / M_{Me}$ і для алюмінієвих електродів складає $14,889$ кВт·год./кг, а для залізних – $7,179$ кВт·год./кг.

Енергетичні аспекти фізичних процесів іскро- та плазмоерозійної коагуляції. В іскроерозійній коагуляції дрібнодисперсні (менше 20 мкм) частинки Al або Fe утворюються внаслідок іскрової ерозії поверхні гранул відповідних металів в розрядній камері під дією імпульсів електричної енергії тривалістю десятки мікросекунд. Потрапляючи у воду, що обробляється, вони вступають з нею у хімічну реакцію, яка описана вище, і утворюють високоактивний коагулянт на основі гідроксидів цих металів [6]. Подальші процеси відбуваються аналогічно електрохімічній коагуляції. Від дисперсності ерозійних частинок залежить швидкість протікання хімічних реакцій і частка металу, яка повністю вступає в хімічну реакцію з водою протягом заданого часу технологічної операції, тобто її матеріалоефективність.

Плазмоерозійна коагуляція дає змогу отримувати ультрадисперсні ерозійні частинки металів (менше 2 мкм) [23] за рахунок обмеження еволюції переважної частки плазмових каналів між поверхнями їх гранул передіскровою стадією стримера або лідера [24], тому матеріалоефективність цього процесу вище, ніж попереднього. Основні електрофізичні процеси утворення, розвинення, міграції і колапсу плазмових каналів між поверхнями сусідніх гранул металів в їх шарі внаслідок підведення імпульсів електричної енергії та фізичні процеси розплавлення, випаровування і евакуації металу, утворення ударних хвиль і електромагнітного випромінювання від радіочастотного до ультрафіолетового діапазонів та ін. [25], які при цьому мають місце, детально описані в [22, 23].

Перетворення переважної частки енергії електричних імпульсів у інші види енергії по завершенні цих процесів в описаних умовах можна звести до перетворення у теплову енергію, яка призводить до розплавлення і випаровування певної маси m металу гранул у зонах, що знаходяться безпосередньо поблизу плазмових каналів [22]. Це узгоджується з даними [26]. Таке спрощення більш коректне для плазмоерозійної коагуляції, де процеси утворення ударних хвиль і електромагнітного випромінювання суттєво менш інтенсивні, ніж у разі іскроерозійної коагуляції. У відповідності з цим спрощенням та зневажаючи витратами енергії на нагрівання прилеглих до приканальних зон областей гранул нижче температури їх плавлення, а також прилеглих областей, заповнених робочою рідиною, знаючи середнє значення питомої теплоємності металу у твердому стані c_s [22], температуру плавлення металу T_m , температуру навколишнього середовища T_0 та питому теплоту плавлення металу λ_m , мінімальну теоретично можливу питому енергію утворення ерозійних частинок з розплавленого металу приканальних зон можливо розрахувати за формулою: $w_m = c_s(T_m - T_0) + \lambda_m$. Для алюмінію її значення складає 0,302 кВт·год./кг, а для заліза – 0,463 кВт·год./кг.

За тих самих спрощень, знаючи питому теплоємність металу в рідкому стані c_l , температуру випаровування металу T_v і його питому теплоту випаровування λ_v , мінімальну теоретично можливу питому енергію утворення ерозійних частинок з металу приканальних зон, який випарувався, можливо визначити за формулою: $w_v = w_m + c_l(T_v - T_m) + \lambda_v$. Для алюмінію її значення складає 3,926 кВт·год./кг, а для заліза – 2,509 кВт·год./кг.

Дослідження питомих витрат енергії плазмоерозійної коагуляції в лабораторних умовах.

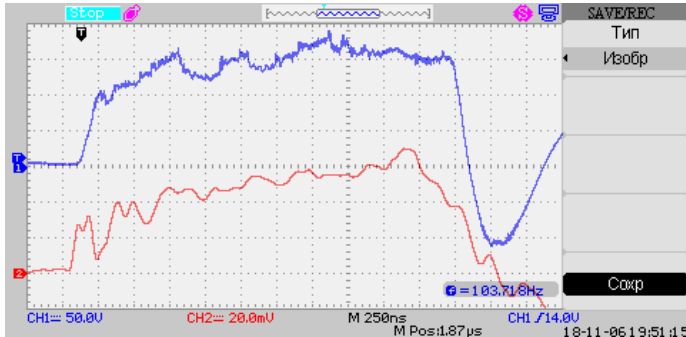
До складу лабораторної установки входили: транзисторний генератор розрядних імпульсів [22], цифровий запам'ятовуючий осцилограф Siglent SDS1104CFL, розрядна камера та седиментаційний бак для контролю відсутності ерозійних частинок розмірами більше 10 мкм. Як гранули утворюючого коагулянт металу використовувалися відрізки електротехнічного дроту алюмінієвого сплаву марки А7Е діаметром 4 мм і довжиною приблизно 4 мм, попередньо оброблені іскроерозійним методом до квазісферичної форми діаметром приблизно 4 мм, поверхня яких мала характерні лунки. Висота їх шару в розрядній камері з вертикальними електродами становила 25 мм, ширина – 60 мм, а відстань між електродами – 50 мм. Електроди розмірами 80×60×6 мм були виготовлені з алюмінієвої шини марки АД0.

Проток води, яка оброблювалася в розрядній камері, був спрямований знизу нагору. Об'ємна швидкість його руху становила $Q=12$ мл/с. Така швидкість була достатньою для гарантованого виносу всіх, у тому числі і найбільших, ерозійних частинок з розрядної камери, але недостатньою для підйому гранул у їхньому шарі і тим більше їх виносу. Після розрядної камери вода із зваженими в ній ерозійними частинками надходила в седиментаційний бак, розміри якого 300×200×150 мм дозволяли на порядок знизити лінійну швидкість її руху. Такі гідродинамічні умови давали змогу осідати на дно великим (понад 10 мкм у поперечнику) ерозійним частинкам. Більш дрібні частинки безперешкодно залишали седиментаційний бак разом з оброблюваною водою і спрямовувались до баку-освітлювача, де перебували протягом тривалого часу (понад двох годин), достатнього для окислення алюмінію до його гідроксиду, дозрівання коагулянту на його основі і осадження його разом із захопленими забрудненнями.

Амплітуда розрядних імпульсів напруги U_m , їхня тривалість τ і частота повторення f вибиралися таким чином, щоб з одного боку, у процесі, що розглядається, не утворювалися великі (понад 10 мкм) частинки алюмінію і процес був стабільним, а з іншого – його продуктивність була достатньою для забезпечення необхідної концентрації коагулянту у воді, яка обробляється. Синхронні осцилограми імпульсів напруги $u(t)$ на шарі гранул алюмінію і струму $i(t)$ у ньому для режиму, близького до середньостатистичного, показано на рисунку в інвертованих кольорах для економії тонеру. Дільник напруги 1:10 був підключений до першого каналу осцилографа, а високочастотний імпульсний трансформатор струму з коефіцієнтом перетворення $S=860$ А/В – до другого каналу. Для режиму, у якому зняті осцилограми рисунку, значення параметрів імпульсів склали: $\tau=3$ мкс, $f=100$ Гц, $U_m=180$ В, $I_m=60$ А. Передана в розрядну камеру енергія одного такого

імпульсу розраховувалася за формулою: $W_1 = \int_0^{\tau} u(t) \cdot i(t) dt$. Для зменшення стохастичних флуктуацій

сигналів напруги і струму, які суттєво ускладнюють обробку їх осцилограм і можуть привести до помилок під час обчислення енергії імпульсів, осцилограми напруги і струму було піддано згладжуванню багато ітераційним методом ковзного середнього з подвоєнням ширини вікна фільтрації на кожній наступній ітерації [27]. В результаті розрахунків енергія одного середньостатистичного імпульсу W_1 складала 32,7 мДж.



Протягом експерименту за час $\Delta t = 10800$ с (3 години) маса алюмінієвих гранул і електродів зменшилася на $m_p = 1,8$ г. Питомі витрати енергії розраховувалися за формулою: $w_p = f \cdot \Delta t \cdot W_1 / m_p$. В цьому режимі вони склали 5,45 кВт·год./кг. В аналогічних дослідях із гранулами низьколегованої сталі питомі енерговитрати склали приблизно 3,2 кВт·год./кг.

Порівняльний аналіз питомих витрат енергії плазмоерозійної та електрохімічної коагуляції. Для якісного освітлення природних поверхневих вод поблизу м. Києва для потреб ТЕС і ТЕЦ, в залежності від пори року, молярна концентрація коагулянту κ_V повинна знаходитися у діапазоні від 0,05 до 0,15 моль/м³ [6]. Середньорічне її значення становить приблизно 0,1 моль/м³. Його і будемо використовувати у подальших розрахунках. Необхідна для освітлення 1 м³ води питома маса утворюючого коагулянт металу, виражена в кілограмах, розраховується за формулою: $m_V = \kappa_V M_{Me} N_{Me} / 1000$. Тоді, з урахуванням питомих витрат енергії на отримання 1 кг металу у вигляді ерозійних частинок або іонів в розглянутих процесах w_{Me} , питомі витрати енергії на освітлення 1 м³ води в них становитимуть: $w_V = m_V w_{Me}$. Для зручності порівняння питомі витрати енергії на отримання 1 кг утворюючих коагулянт металів у вигляді ерозійних частинок або іонів, а також питомі витрати енергії на освітлення 1 м³ води в різних режимах електрохімічної та плазмоерозійної коагуляції наведемо у таблиці.

Параметр \ Утворюючий коагулянт метал	Al	Fe
Теоретичне значення питомої енергії руйнування пасивуючих плівок w_e , кВт·год./кг	8,14	3,47
Теоретичне значення питомої енергії на освітлення води в результаті руйнування пасивуючих плівок w_{Ve} , Вт·год./м ³	22,00	19,43
Практичне значення питомої енергії на електрохімічне розчинення 1 кг металу w_c , кВт·год./кг	14,89	7,18
Практичне значення питомої енергії на освітлення води електрохімічною коагуляцією w_{Vc} , Вт·год./м ³	40,20	40,21
Теоретичне значення питомої енергії утворення ерозійних частинок з розплавленого металу w_m , кВт·год./кг	0,30	0,46
Теоретичне значення питомої енергії на освітлення води плазмоерозійною коагуляцією в режимі розплавлення металу w_{Vm} , Вт·год./м ³	0,81	2,58
Теоретичне значення питомої енергії утворення ерозійних частинок в режимі випаровування металу w_v , кВт·год./кг	3,93	2,51
Теоретичне значення питомої енергії на освітлення води плазмоерозійною коагуляцією в режимі випаровування металу w_{Vm} , Вт·год./м ³	10,61	14,06
Практичне значення питомих витрат енергії на утворення плазмоерозійних частинок w_p , кВт·год./кг	5,45	3,20
Практичне значення питомих витрат енергії на освітлення води плазмоерозійною коагуляцією w_{Vp} , Вт·год./м ³	14,72	17,92

З аналізу даних таблиці випливає наступне. 1. Теоретичні значення питомої енергії руйнування пасивуючих плівок на поверхні як Al, так і Fe істотно вищі, ніж теоретичні значення питомої енергії випаровування цих металів, особливо у випадку Al. Це є передумовою більшої енергетичної ефективності електрофізичних методів отримання коагулянту з цих металів порівняно з електрохімічним методом.

2. Практичні значення питомих витрат енергії на утворення плазмоерозійних частинок цих металів у 2,2...2,7 рази нижчі за практичні значення питомої енергії на їх електрохімічне розчинення, що робить електрофізичні методи отримання коагулянту більш перспективними, ніж електрохімічні.

Крім того, обслуговування електрокоагуляторів вимагає частого очищення поверхні електродів для забезпечення енергетичної ефективності процесу, а ця операція є трудомісткою і на сучасному етапі розвитку обладнання не автоматизована. Також перевагами іскро- та плазмоерозійної коагуляції над електрохімічною є високий антимікробний ефект [25] і можливість уповільнення розвитку ціанобактерій у разі додавання у шар гранул *Al* або *Fe* невеликої кількості гранул *Si*.

3. Теоретичні значення питомої енергії утворення ерозійних частинок з розплаву *Fe* у 5,4, а *Al* у 13 разів менші за теоретичні значення питомої енергії їх утворення з парової фази. Тому пошук режимів, в яких переважна кількість ерозійних частинок із заданими властивостями утворюється не з пари, а з рідкого металу є перспективним. Зменшення енергії, яка виділяється в окремих плазмових каналах в наслідок зменшення потужності розрядного струму і тривалості його протікання в кожному з них [28], в тому числі через підвищення швидкості їх міграції [29], за умови збереження середньої потужності, яка виділяється в усіх плазмових каналах разом, є важливою задачею. Рекомендації щодо реалізації таких режимів наведено у [24]. Реалізація деяких з них у методі плазмоерозійної коагуляції підвищує його енергоефективність порівняно з методом іскроерозійної коагуляції [6] на 10...15%.

4. Для більшості режимів, розглянутих у таблиці, питомі витрати енергії на утворення іонів або ерозійних частинок *Al* з електродів або гранул у перерахунку на 1 кг більші, ніж для *Fe*. Але питомі витрати енергії для освітлення 1 м³ води з використанням *Al* у більшості випадків менші, ніж з використанням *Fe*. Це спричинено тим, що за однакової валентності молярна маса *Fe* більш ніж у 2 рази перевищує молярну масу *Al*.

Узагальнення і висновки. 1. Плазмохімічні методи оброблення води є найбільш енергоефективними для деструкції високомолекулярних забруднень стічних вод, проте низька продуктивність обладнання, що їх реалізує і відносно невисока ефективність видалення іонів солей жорсткості, мікроорганізмів та дрібнодисперсних забруднень не сприяє їхньому застосуванню для очищення поверхневих природних вод для потреб теплової енергетики.

2. Теоретичні розрахунки показали, що за ідеальних умов енергоефективність плазмоерозійної коагуляції може бути в 1,4...2 рази більша, ніж електрохімічної. Експерименти в лабораторних умовах довели, що на практиці цей показник може складати від 2,2 до 2,7. Перевагами іскро- та плазмоерозійної коагуляції над електрохімічною є також високий антимікробний ефект і можливість уповільнення розвитку ціанобактерій.

3. Питомі витрати електричної енергії плазмоерозійного коагуляційного очищення 1 м³ води в лабораторних умовах приблизно в 1,4 рази вищі за мінімально можливі теоретично в режимі випаровування всієї маси утворюючого коагулянт металу, з якої утворюються ерозійні частинки. Це обумовлює перспективи подальшого підвищення енергоефективності методу.

4. Підвищення енергоефективності плазмоерозійної коагуляції може досягатися завдяки забезпеченню режимів, у яких більшість плазмоерозійних частинок необхідних розмірів утворюються не з парової, а з рідкої фази утворюючого коагулянт металу, збільшенню швидкості підведення потужності в плазмові канали в результаті скорочення тривалості фронтів імпульсів розрядного струму, зменшенню потужності розрядного струму і тривалості його протікання в кожному з окремих плазмових каналів за умови збереження середньої потужності, яка виділяється в усіх плазмових каналах разом.

Роботу виконано за рахунок бюджетної теми «Розробити нові математичні моделі та методи дослідження електрофізичних процесів і полів в електротехнічному обладнанні для вирішення задач його надійної експлуатації та діагностування» (шифр «Комплекс-5»). Державний реєстраційний номер 0121U107443, КПКВК 6541030.

1. Укренерго. Національна енергетична компанія. Встановлена потужність енергосистеми України на 08/2021. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (дата доступу: 07.10.2021).

2. Hu X, Wang B. Removal of pefloxacin from wastewater by dielectric barrier discharge plasma: Mechanism and degradation pathways. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. No 9. Article ID 105720. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105720>

3. Amin M.T., Alazba A.A., Manzoor U. A Review of Removal of Pollutants from Water/Wastewater Using Different Types of Nanomaterials. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2014. Article ID 825910. 24 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/825910>

4. Zhao C.S., Shao N.F., Yang S.T., Ren H., Ge Y.R., Feng P., Dong B.E., Zhao Y. Predicting cyanobacteria bloom occurrence in lakes and reservoirs before blooms occur. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 670. Pp. 837–848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.161>

5. Giudice D.D., Fang Sh., Scavia D., Davis T.W., Evans M.A., Obenour D.R. Elucidating controls on cyanobacteria bloom timing and intensity via Bayesian mechanistic modeling. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. Article ID 142487. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142487>
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей. *Энергетика и электрификация*. 2002. № 12. С. 34–40.
7. Zeghioud H., Nguyen-Tri P., Khezami L., Amrane A., Assadi A.A. Review on discharge Plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 38. Article ID 101664. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101664>
8. Берека В.О., Кондратенко І.П. Електророзрядні технології обробки води та критерії доцільності їхнього використання. *Праці ІЕД НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>
9. Hartmann W., Roemheld M., Rohde K.-D., Spiess F.-J. Large Area Pulsed Corona Discharge in Water for Disinfection and Pollution Control. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 4. Pp. 1061–1065.
10. Kolb J.F., Joshi R.P., Xiao S., Schoenbach K.H. Streamers in water and other dielectric liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. Article ID 234007. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/23/234007>
11. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42. Article ID 053001. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>
12. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue. 12. Pp. 3064–3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2760888>
13. Lukes P., Clupek M., Babicky V., Sunka P. Pulsed Electrical Discharge in Water Generated Using Porous-Ceramic-Coated Electrodes. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2008. Vol. 36. No 4. Pp. 1146–1147. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.920945>
14. Яворовский Н.А., Корнев Я.И., Прейс С.В., Пельцман С.С., Хаскельберг М.Б., Чен Б.Н. Активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке. *Известия Томского политехнического института*. 2006. Т. 309. № 2. С. 108–113.
15. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Супруновская Н.И., Шевченко Н.И., Яцюк С.А., Соломенцева И.М. Повышение энергоэффективности электрофизических методов очистки сточных вод от органических загрязнений. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск Силова електроніка та енергоефективність*. 2007. Ч. 5. С. 75–79.
16. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffman M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45. Pp. 882–905.
17. Panorel I., Preis S., Kornev Ia., Hatakka H., Louhi-Kultanen M. Oxidation of aqueous pharmaceuticals by pulsed corona discharge. *Environmental Technology*. 2013. Vol. 34. No 7. Pp. 923–930. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.722691>
18. Larin B.M., Bushuev E.N., Larin A.B., Karpychev E.A., Zhadan A.V. Improvement of Water Treatment at Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. No 4. Pp. 286–292. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601515020056>
19. Geise G.M., Lee H.S., Miller D.J., Freeman B.D., McGrath J.E., Paul D.R. Water purification by membranes: The role of polymer science. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 2010. Vol. 48. Pp. 1685–1718. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.22037>
20. ТЭЦ-6 СОП «Киевские ТЭЦ ПАО «КИЕВЭНЕРГО». URL: https://ecosoft.ua/customer_story/tets-6/ (дата доступу: 19.10.2021).
21. Каратаев О.Р., Шамсутдинова З.Р., Хафизов И.И. Очистка сточных вод электрохимическими методами. *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 22. С. 21–23.
22. Захарченко С.М., Шидловська Н.А., Перекос А.О., Захарченко М.Ф. Енергоефективність електрофізичних методів диспергування та електрохімічного розчинення деяких металів. *Металофізика та новітні технології*. 2021. Т. 43. № 4. С. 465–487. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0465>
23. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>
24. Захарченко С.Н. Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозионным диспергированием их гранул в жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 16–23.
25. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде. *Химия и технология воды*. 1999. Т. 21. № 3. С. 328–336.

26. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.
27. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Порівняння ефективності згладжування сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому багатоітераційними методами фільтрації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.003>
28. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Параметрична модель опору плазмоерозійного навантаження, адекватна в широкому діапазоні змін прикладеної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.003>
29. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the Formation of Multi-Channel Pulse Currents and Fast-Migrating Electric Sparks in the Layer of Current-Conducting Granules of Electric-Discharge Installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>

PHYSICAL AND TECHNICAL-ECONOMIC ASPECTS OF MODERN METHODS OF WATER TREATMENT FOR THERMAL AND NUCLEAR POWER ENGINEERING

N.A. Shydlovska¹, S.M. Zakharchenko¹, M.F. Zakharchenko², I.L. Mazurenko¹, M.A. Kulida³

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, irvnamazurenko@gmail.com

²V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Palladina, 32/34, Kyiv, 03142, Ukraine. E-mail: zakhar@ionc.kiev.ua

³National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Potekhina st., 16, Kyiv, 03041, Ukraine. E-mail: mkulida@ukr.net

A critical analysis of modern electric-physical and electric-chemical methods of water treatment is given in the context of the efficiency of treatment surface natural waters for the thermal and nuclear power engineering. Physical aspects of electric-chemical coagulation are considered. Theoretical values of the specific energy of destruction of passivation films on the surface of aluminum and iron electrodes, as well as the minimum voltages required for this, are calculated. The mechanisms of conversion of the energy of discharge pulses in a layer of granules of metal forming a coagulant immersed in water are described. According to the described model of energy conversion processes, the minimum theoretical values of the specific energy of the formation of erosive Al and Fe particles from molten and evaporated metal are calculated. A technique for studying the energy efficiency of plasma-erosion coagulation under laboratory conditions is described, and the results of these studies are presented. The specific energy of purification of 1 m³ of water by electric-chemical and plasma-erosion coagulation was calculated in various modes using Al and Fe as metals forming the coagulant. Based on the analysis of the obtained results, recommendations for ways to improve the energy efficiency of plasma-erosion coagulation modes are given. References 29, figure 1, table 1.

Keywords: discharge current, thermal power engineering, energy efficiency, plasma-erosion coagulation, electric-chemical coagulation, water treatment

1. Ukrenergo. National Power Company. Installed capacity of the IPS of Ukraine values as of 08/2021. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (accessed: 07.10.2021). (Ukr)
2. Hu X, Wang B. Removal of pefloxacin from wastewater by dielectric barrier discharge plasma: Mechanism and degradation pathways. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. No 9. Article ID 105720. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105720>
3. Amin M.T., Alazba A.A., Manzoor U. A Review of Removal of Pollutants from Water/Wastewater Using Different Types of Nanomaterials. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2014. Article ID 825910. 24 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/825910>
4. Zhao C.S., Shao N.F., Yang S.T., Ren H., Ge Y.R., Feng P., Dong B.E., Zhao Y. Predicting cyanobacteria bloom occurrence in lakes and reservoirs before blooms occur. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 670. Pp. 837–848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.161>
5. Giudice D.D., Fang Sh., Scavia D., Davis T.W., Evans M.A., Obenour D.R. Elucidating controls on cyanobacteria bloom timing and intensity via Bayesian mechanistic modeling. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. Article ID 142487. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142487>
6. Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N. Prospects for the use of spark erosion coagulation in water treatment systems of heat networks. *Energetika i elektrifikatsiya*. 2002. No 12. Pp. 34–40. (Rus)
7. Zeghioud H., Nguyen-Tri P., Khezami L., Amrane A., Assadi A.A. Review on discharge Plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 38. Article ID 101664. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101664>
8. Bereka V.O., Kondratenko I.P. Electric Discharge Water Treatment Technologies and Criteria of Expediency of their Use. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Issue 58. Pp. 90–99. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>

9. Hartmann W., Roemheld M., Rohde K.-D., Spiess F.-J. Large Area Pulsed Corona Discharge in Water for Disinfection and Pollution Control. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 4. Pp. 1061–1065.
10. Kolb J.F., Joshi R.P., Xiao S., Schoenbach K.H. Streamers in water and other dielectric liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. Article ID 234007. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/23/234007>
11. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42. Article ID 053001. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>
12. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue. 12. Pp. 3064–3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2760888>
13. Lukes P., Clupek M., Babicky V., Sunka P. Pulsed Electrical Discharge in Water Generated Using Porous-Ceramic-Coated Electrodes. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2008. Vol. 36. No 4. Pp. 1146–1147. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.920945>
14. Yavorovskiy N.A., Kornev Ya.I., Preis S.V., Pelchtsman S.S., Haskelberg M.B., Chen B.N. Active oxidizing particles in water-air flow. *Izvestiia Tomskoho Politekhnikheskoho Instituta*. 2006. Vol. 309. No 2. Pp. 108–113 (Rus).
15. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I., Yatsyuk S.A., Solomentseva I.M. Improving the Power Efficiency of Electrophysical Methods of Wastewater Treatment from Organic Pollution. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vypusk Silova elektronika ta energoefektivnist*. 2007. Vol. 5. Pp. 75–79. (Rus)
16. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffman M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45. Pp. 882–905.
17. Panorel I., Preis S., Kornev Ia., Hatakka H., Louhi-Kultanen M. Oxidation of aqueous pharmaceuticals by pulsed corona discharge. *Environmental Technology*. 2013. Vol. 34. No 7. Pp. 923–930. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.722691>
18. Larin B.M., Bushuev E.N., Larin A.B., Karpychev E.A., Zhadan A.V. Improvement of Water Treatment at Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. No 4. Pp. 286–292. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601515020056>
19. Geise G.M., Lee H.S., Miller D.J., Freeman B.D., McGrath J.E., Paul D.R. Water purification by membranes: The role of polymer science. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 2010. Vol. 48. Pp. 1685–1718. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.22037>
20. CHP-6 SOP Kiev CHPP PJSC KIEVENERGO. URL: https://ecosoft.ua/customer_story/tets-6/ (accessed: 19.10.2021). (Rus)
21. Karataev O.R., Shamsutdinova Z.R., Khafizov I.I. Wastewater treatment by electrochemical methods. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 18. No 33. Pp. 21–23. (Rus)
22. Zakharchenko S.M., Shydlovska N.A., Perekos A.O., Zakharchenko M.F. Power Efficiency of Electrophysical Methods of Dispersion and Electrochemical Dissolution of Several Metals. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2021. Vol. 43. No 4. Pp. 465–487. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0465>
23. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Physical Prerequisites of Construction of Mathematical Models of Electric Resistance of Plasma-erosive Loads. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.02.005>
24. Zakharchenko S.M. Increase of Efficiency of Obtaining of Ultradispersive Metals Particles by Volume Electroerosive Dispersion their Granules in a Liquid. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 1. Pp. 16–23. (Rus)
25. Goncharuk V.V., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Savluk O.S., Potapchenko N.G., Kosinova V.N. Disinfectant action of the volume electrospark discharges in water. *Khimiia i tehnologiya vody*. 1999. Vol. 21. No 3. Pp. 328 – 336. (Rus)
26. Namytkov K.K. Electroerosive phenomenon. Moskva: Energiya, 1978. 456 p. (Rus.)
27. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Comparison of the Smoothing Efficiency of Signals of Voltage on the Plasma-erosive Load and its Current by Multi-Iterative Filtration Methods. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 3–13. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.04.003>
28. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Parametric Model of Resistance of Plasma-erosive Load, Adequate in the Wide Range of Change of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 3. Pp. 3–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.03.003>
29. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the Formation of Multi-Channel Pulse Currents and Fast-Migrating Electric Sparks in the Layer of Current-Conducting Granules of Electric-Discharge Installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2022.02.003>

Надійшла 07.04.2022
Остаточний варіант 11.05.2022