

УДК 537.523.9 + 621.373.54

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ОБРОБКИ ВОДИ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ

І.В. Божко^{1*}, канд.техн.наук, О.М. Карлов^{1**}, канд.техн.наук, І.П. Кондратенко^{1***}, чл.-кор. НАН України, Чарний Д.В.², канд.техн.наук

¹ - Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: ws77@ukr.net

² - Інститут водних проблем та меліорації НААН України,

вул. Васильківська, 37, Київ, 03022, Україна.

Розроблено комплекс для прямої обробки забрудненої води імпульсним бар'єрним розрядом, що складається з генератора імпульсів та розрядної камери. Генератор побудовано на принципах магнітного стиснення імпульсів та використання в кінцевій ланці індуктивного накопичувача енергії, який комутується діодом з малим часом обривання зворотного струму. Генератор забезпечує короткі (~100 нс) високовольтні (до 30 кВ) імпульси з енергією до 0,3 Дж, які діють на поверхню води, що тече тонкою плівкою (~0,15 мм) по поверхні внутрішнього електроду коаксійної розрядної камери. З метою отримання максимальної енергоефективності обробки води досліджено шляхи узгодження роботи всіх ланок комплексу. На основі аналізу втрат енергії при її передачі від зовнішнього джерела до навантаження встановлено, що основна їхня частина припадає на ланцюг з імпульсним трансформатором та кінцеву ланку генератора з розрядною камерою. При обробці водного розчину метиленової сині з початковою концентрацією 50 мг/л енергетичний вихід імпульсного бар'єрного розряду при 50 % розкладанні домішки досягав 75 г/квт·год, а енергоефективність комплексу в цілому – 22 г/квт·год. Бібл. 10, рис. 9.

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

Високий рівень забрудненості поверхневих і підземних вод та зростаючі вимоги до якості води, що використовується, привели до потреби удосконалення існуючих та розробки нових технологій її очищення. Серед нових технологій водоочищення одним із перспективних напрямків стало використання так званих передових окислювальних технологій (AOTs) [4,5,7,8], завдяки яким генерування сильних окислювачів (O₃, O, OH, H₂O₂) та ультрафіолетового випромінювання відбувається поблизу поверхні води, що проходить обробку. Доцільність розробки та впровадження цих технологій визначається величиною питомих енерговитрат на обробку води, експлуатаційними витратами, а також вартістю виготовлення та монтажу обладнання [5]. Найбільше цим критерієм відповідає використання в AOTs високовольтних електричних розрядів, серед яких імпульсний бар'єрний розряд (ІБР), що здійснюється на поверхню оброблюваної води, має найвищий енергетичний вихід [7], який обчислюється як відношення кількості розкладеної під дією розряду забруднювача води до вкладеної при цьому в розряд енергії. Комплекс для обробки води таким розрядом складається з двох основних частин: генератора імпульсів (ГІ) та розрядної камери (РК). ГІ повинен забезпечувати на навантаженні (РК) короткі імпульси напруги (~ 100–200 нс) з крутизною їхнього фронту понад 10¹¹ В/с. З економічної та практичної точок зору оптимальними величинами амплітуд імпульсів напруги є 10–30 кВ, а частота їхнього повторення 10–200 Гц [4,6–8]. Найбільш оптимальними умовами обробки води є такі, коли ІБР в РК діє на тонку плівку води (~0,15 мм) або на її краплі малих розмірів (<1 мм) [1]. Оскільки РК є навантаженням ГІ, то ефективність використання енергії, отриманої комплексом від зовнішнього джерела, залежить від взаємної узгодженості їхніх параметрів. Як показує досвід [9], умови, за яких енергетичний вихід ІБР є найбільшим, у загальному випадку не є оптимальними для передачі енергії ГІ в РК. Тому **метою роботи** було визначення шляхів отримання найбільш ефективного використання енергії та зменшення її втрат у комплексі для обробки води ІБР. При вирішенні цієї задачі був як базовий використаний ГІ [2] та РК, що забезпечували можливість «плівкової» обробки води ІБР.

Експериментальна установка. До її складу входили РК, ГІ, засоби діагностики тощо. РК, схематично показано на рис. 1, була коаксійного типу з внутрішнім циліндричним електродом 2 з нержавіючої

© Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В., 2017

ORCID ID: *<http://orcid.org/0000-0002-7955-246X>, **<http://orcid.org/0000-0002-1350-1870>,

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

сталі діаметром 32,6 мм. Зовні електрода 2 знаходилася трубка 4 з електротехнічного скла з зовнішнім та внутрішнім діаметрами 39 та 37,4 мм відповідно, на яку був щільно намотаний шар алюмінієвої фольги 3, що виконував функцію другого (високовольтного) електрода. Довжина внутрішнього електрода складала 250 мм. Введення та виведення в РК води та газу (повітря атмосферного тиску) здійснювалося відповідно через патрубки 7 та 6. Вода після надходження в РК рівномірним тонким шаром 1 (~0,15 мм) стікала вниз по електроду 2. Для запобігання утворення струминок на гідрофобній поверхні електрода він був вкритий тонким (0,1 мм) шаром склотканини.

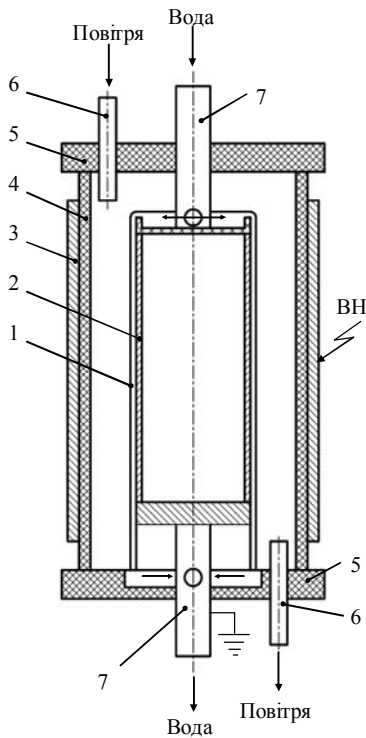


Рис. 1

приймалися наступними: ємність діелектричного бар'єру $C_6 = 2280$ пФ, ємність газового проміжку $C_2 = 175$ пФ, опір розряду R_2 під час ІБР змінювався від $\sim 10^{12}$ до кількох десятків омів. Виміри струмів та напруг у ГІ та РК проводилися приладами фірми Tektronix: цифровим двоканальним осцилографом TDS 1012, індуктивним датчиком струму P6021 та активно-ємнісним подільником напруги P6015.

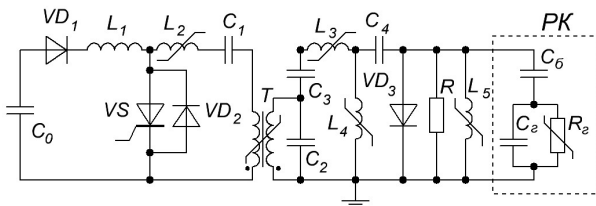


Рис. 2

становила $K_0 = 50$ мг/л.

Дослідження роботи ГІ та його аналіз. Як відомо, вихідні параметри будь-якого ГІ залежать від виду та величини його навантаження. Спочатку для налагодження та аналізу втрат енергії в ГІ, як більш простий, було розглянуто *варіант резистивного навантаження* генератора. При цих дослідженнях індуктивність L_5 (рис. 2) була відключена. На рис. 3 показано осцилограми напруги $U(t)$ (крива 1) на опорі $R=90$ Ом та струму $I(t)$ (крива 2) через діод VD_3 за умови, що напруга на C_0 дорівнює $U_0=360$ В. Як видно з $U(t)$, максимум вихідної напруги ГІ $U_m = 24$ кВ, а повна ширина імпульсу на рівні його половинної амплітуди (FWHM) становить 70 нс. Швидкість зростання напруги на рівні FWHM досягає $4,7 \cdot 10^{11}$ В/с. Момент початку такого прискореного підйому напруги (точка b на кривій 1) співпадає з моментом початку обривання зворотного струму через VD_3 (точка a на кривій 2). Час обривання зворотного струму ≈ 35 нс, а його амплітуда I_{m2} дорівнює амплітуді прямого струму через діод $I_{m1} = I_{m2} = 240$ А. Таким чином, для діода VD_3 , що використовується у цій роботі, коефіцієнт підсилення зворотного

струму $\alpha = I_{m2}/I_{m1}$ може сягати одиниці. При зростанні R у межах 10–200 Ом величина U_m збільшується від 12 до 30 кВ ($U_0=360$ В).

Залежність від величини R енергії, що виділяється в опорі W_R під час дії одного імпульсу t_i , показано на рис. 4 кривою 2 ($U_0=315$ В). Значення W_R обчислювалося за виразом

$$W_R = R \int_0^{t_i} I_R^2 dt, \quad (1)$$

де I_R – струм через опір R .

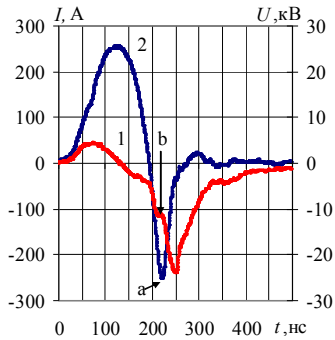


Рис. 3

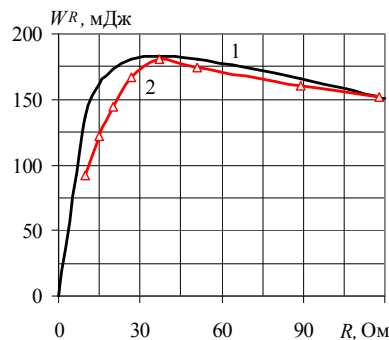


Рис. 4

Як видно з рисунку, зі зростанням величини R енергія W_R спочатку стрімко збільшується і при $R_m \approx 40$ Ом досягає максимуму $W_R = 180$ мДж, а у подальшому більш плавно знижується. Такий вид залежності $W_R(R)$ пояснюється наступним чином. Передача енергії в навантаження R починається тоді, коли під дією напруги зарядженого конденсатора C_4 осердя L_4 стає насиченим, після чого утворюється електричне коло C_4-L_4-R для розрядження C_4 .

При періодичному характері струму в цьому колі відбувається перезарядка C_4 , внаслідок чого частина енергії повертається у C_4 . Цього не буде спостерігатися при аперіодичному режимі, умовами для якого є

$$R > 2\rho, \quad (2)$$

де $\rho = (L_4/C_4)^{0,5}$ – характеристичний опір розрядного кола. У цій роботі індуктивність насичення $L_4 = 0,6$ мкГн, $C_4 = 1,115$ нФ, тому оптимальною величиною є $R_m = 2\rho = 46$ Ом. Ця величина близька до тієї, за якої експериментально отримані найбільші значення W_R . З іншого боку, при збільшенні R зростає час розряду C_4 , завдяки чому суттєво намагнічується осердя L_3 , що призводить до передачі частини енергії від C_4 у C_2, C_3 , внаслідок чого величини W_R зменшуються. Експериментально отриманий характер залежності $W_R(R)$ також підтверджує моделювання в програмному середовищі Місго-сар (рис. 4, крива 1) роботи кінцевої ланки ПІ (C_4-L_4-R). Результати моделювання показано на рис. 4 кривою 1.

Важливим показником, який характеризує ефективність роботи ПІ, є коефіцієнт передачі енергії η від первинного накопичувача енергії (C_0) до навантаження, який обчислювався за виразом

$$\eta = W_R/W_0 = W_R / \int_0^{t_i} I_{L1} U_0 dt, \quad (3)$$

де W_0 – енергія, яку віддає конденсатор C_0 для зарядження C_1 за час t_i , I_{L1} – струм через L_1 . При $U_0=315$ В величина $W_0 = 576$ мДж. За умов, коли $R = R_m$, коефіцієнт η досягає найбільшого значення 0,31. Ця величина залишається практично незмінною в діапазоні $U_0=200-400$ В. Енергія імпульсу W_R при збільшенні U_0 у межах цього діапазону зростає від 74 до 300 мДж.

Для аналізу втрат енергії при її передачі від C_0 до навантаження R доцільно весь процес розглядати як п'ять послідовних етапів. Аналіз буде вестися за умов, коли $U_0=315$ В, а величина $R=36,4$ Ом, при якій W_R знаходиться в зоні свого максимального значення (рис. 2). За цих умов $W_0=576$ мДж, $W_R=180$ мДж, сумарні втрати енергії $\Delta W=396$ мДж, а величина $\eta \approx 0,31$.

На першому етапі по колу $C_0-VD_1-L_1-L_2-C_1-T$ відбувається зарядження C_1 до напруги $U_{C1}=594$ В. Тривалість цього процесу $t_1 \approx 860$ мкс. Втрати енергії на цьому етапі відносно малі (2,5 %) і складають $\Delta W_1 = 10$ мДж. Вони розраховувалися за виразом

$$\Delta W_1 = W_0 - W_{C1}, \quad (4)$$

де $W_{C1} = 0,5C_1U_{C1}^2 = 566$ мДж (U_{C1} – напруга на C_1 в кінці цього етапу). Їх слід віднести на втрати на активних опорах VD_1, L_1, L_2, T та втрати в осердях індуктивностей.

На другому етапі за час $t_2 \approx 5$ мкс відбувається передача енергії $W_2=450$ мДж від C_1 до C_2, C_3 . При цьому втрати енергії $\Delta W_2=116$ мДж (29,1 %). Вони обчислювалися як різниця між енергією, що була накопичена в C_1 на початок етапу, і сумарною енергією в C_2, C_3 в його кінці

$$\Delta W_2 = W_{C1} - (W_{C2} + W_{C3}). \quad (5)$$

Значення W_{C2} , W_{C3} знаходилися таким самим чином, що і W_{C1} . До ΔW_2 входять втрати в L_2 , L_3 , L_4 , T (в активних опорах та в осердях), втрати в тиристорі VS $\Delta W_{VS} = 10$ мДж, які розраховувалися за виразом

$$\Delta W_{VS} = \int_0^{t_2} I_{VS} U_{VS} dt, \quad (6)$$

де I_{VS} , U_{VS} – відповідно струм та напруга на VS у відкритому стані, а також залишки енергії, яка залишилася в кінці цього етапу в C_1 (40 мДж) і потім розсіюється на елементах схеми.

На третьому етапі відбувається перезарядка C_2 ($t_3 \approx 500$ нс), внаслідок чого конденсатор змінює полярність, і потенціал верхньої точки конденсатора C_3 по відношенню до «землі» збільшується приблизно вдвічі. В кінці цього етапу сумарна енергія в C_2 , C_3 стає 380 мДж, а втрати $\Delta W_3 = 70$ мДж (17,7 %). Одна частина з цих втрат (≈ 36 мДж) припадає на ту частку енергії, що повертається в первинне коло трансформатора T і потім розсіюється, а друга – на втрати в самому T (≈ 34 мДж).

На четвертому етапі енергія $W_4 = 282$ мДж від C_2 , C_3 передається в C_4 ($t_4 \approx 160$ нс). Осцилограму зарядного струму конденсатора C_4 , який проходить по колу $C_2 - C_3 - L_3 - C_4 - VD_3$, відображено кривою 2 на рис. 3. Втрати енергії на цьому етапі $\Delta W_4 = 98$ мДж (24,7 %). Вони обчислювалися за виразом, аналогічним (5) як різниця між сумарною енергією в C_2 , C_3 на початку етапу і енергією C_4 – в його кінці. До ΔW_4 входять втрати в L_3 (≈ 34 мДж), в VD_3 ($\Delta W_{VD3} = 24$ мДж), а також залишки енергії в C_2 , C_3 (≈ 40 мДж) – в кінці етапу. Втрати ΔW_{VD3} обчислювалися за виразом, аналогічним (6).

На п'ятому етапі енергія $W_5 = 180$ мДж від C_4 по колу $C_4 - L_4 - R$ передається в R ($t_5 \approx 120$ нс). До моменту, поки зворотний струм через VD_3 не зменшиться до нуля (≈ 60 нс), через діод VD_3 також йде струм. Втрати на цьому етапі $\Delta W_5 = 102$ мДж (25,87 %), з яких 30 мДж припадає на втрати у VD_3 , 15 мДж – на залишок енергії в C_4 в кінці етапу внаслідок його перезарядки, а також енергію ≈ 20 мДж, що повертається в C_2 , C_3 , та втрати в L_3 , L_4 (≈ 37 мДж).

Таким чином, результати аналізу показують, що в цілому при передачі енергії до навантаження R при загальних втратах $\Delta W = 396$ мДж найзначніші їхні частки припадають на ланки, що пов'язані з імпульсним трансформатором T на другому та третьому етапах (186 мДж, 47 %), та є наслідком неідеальної узгодженості параметрів елементів електричної схеми (131 мДж, 33 %). Сумарні втрати на тиристорі VS та діоді VD_3 складають 64 мДж (16 %). Втрати енергії в елементах ГІ ведуть до їхнього нагрівання. Дослідження показали, що при $U_0 = 315$ В без їхнього примусового охолодження (вентилятором) можлива тривала робота ГІ з частотою повторення імпульсів до $f = 500$ Гц.

РК є резистивно-ємнісним навантаженням для ГІ. Такий тип навантаження суттєво впливає на коефіцієнт передачі енергії η . На рис. 5 показано осцилограми струму $I(t)$ (крива 1) та напруги $U(t)$ (крива 2) на РК за умов, що $U_0 = 315$ В, $R = 1$ кОм, L_5 відключена. З рисунка видно, що при ІБР імпульс струму складається з двох частин: з прямого (первинного) струму амплітудою $Im_1 = 340$ А тривалістю $t_n = 120$ нс та зворотного (вторинного) з параметрами $Im_2 = 100$ А, $t_s = 130$ нс. Напруга на РК, зростаючи зі швидкістю $\approx 2,5 \cdot 10^{11}$ В/с, досягає амплітуди 13 кВ. Після закінчення імпульсу струму на РК залишається напруга 4 кВ. Кривою 3 відображено зміну в часі заряду q на бар'єрній ємності C_b , величина якого

$$q = \int_0^{t_i} I dt. \quad (7)$$

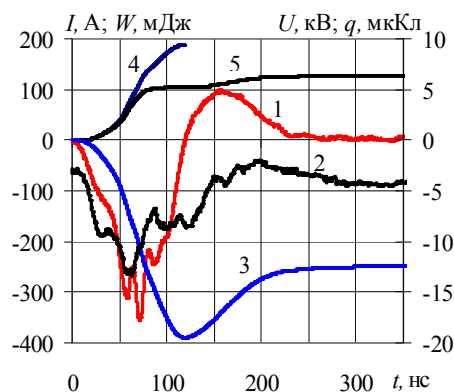


Рис. 5

Після проходження прямого струму ІБР на C_b залишається заряд $q_1 = 19,5$ мкКл, який обумовлює присутність на бар'єрі залишкової напруги $U_b = q_1 / C_b = 8,5$ кВ. Ця напруга обумовлює зворотний струм ІБР. Заряд, який при цьому віддає бар'єр, $q_2 = 7,1$ мкКл, тому після закінчення ІБР на бар'єрі зберігається заряд $\Delta q = q_1 - q_2 = 12,4$ мкКл, котрий є причиною залишкової напруги на РК. У подальшому (при $t > 350$ нс) значення Δq поступово зменшується. Швидкість цього процесу залежить від багатьох чинників: швидкості деіонізації газового проміжку РК, внаслідок чого зростає його опір R_z , електропровідності бар'єру, величини зовнішнього (по відношенню до РК) опору для розрядження C_b . Для умов цієї роботи час зменшення Δq до несуттєвих значень дорівнює ~ 1 с.

Енергія, що накопичилася в C_6 після прямого імпульсу струму, дорівнює $W_{61} = 0,5 q_1^2 / C_6 = 83$ мДж. Залишки енергії в бар'єрі після закінчення зворотного імпульсу складають $\Delta W_6 = 0,5 \Delta q^2 / C_6 = 34$ мДж. Ця енергія корисно не використовується в РК і складає значну частку (18 %) від енергії $W = 187$ мДж (рис. 5, крива 4), що була передана від ГІ в РК за час прямого імпульсу t_n ІБР. Величина W була розрахована за виразом

$$W = \int_0^{t_{n1}} IU dt \quad (8)$$

Значення енергії W_2 , що вкладається в газовий проміжок РК під час ІБР, розраховувалася за методикою, що викладена в [2]. Із залежності $W_2(t)$, яку на рис. 5 представлено кривою 5, видно, що під час прямого ІБР вкладається 105 мДж, зворотного – 22 мДж, а в цілому – 127 мДж. Таким чином, енергія, що передається в газовий проміжок і може корисно використовуватися, відповідає тільки 68 % енергії W .

Для ефективного використання енергії W_{61} треба створити певні умови. Вони повинні бути такі, щоб після закінчення первинного ІБР постійна часу розрядження бар'єрної ємності $\tau_6 \approx C_6(R_2 + Z_2)$ була досить малою, а газ у розрядному проміжку не встиг суттєво деіонізуватися і не зростає неприпустимо внаслідок цього величина R_2 . Вихідний імпеданс генератора Z_2 після первинного ІБР також повинен бути щонайменшим, щоб не збільшувати τ_6 та непродуктивні витрати енергії на елементах генератора під час вторинного розряду. Для умов цієї роботи, коли $U_0 = 315$ В, під час вторинного ІБР усереднене значення $Z_2 \approx 49$ Ом. Цю величину можна суттєво зменшити, якщо шунтувати РК магнітним ключем (МК) – індуктивністю з осердям, котре насичується після проходження прямого ІБР. Привабливість такого рішення полягає в тому, що в МК може втрачатися відносно мала частка енергії W_{61} . Вимоги до МК такі: його вплив на роботу всього комплексу під час первинного ІБР повинен бути несуттєвим, а імпеданс під час вторинного розряду досить малим, щоб суттєво зменшити величину Z_2 . У ролі МК у цій роботі використовується нелінійна індуктивність L_5 , співвідношення величин якої в ненасиченому і насиченому станах досягає ~ 400 .

На рис. 6 показано осцилограми струму (крива 1) та напруги (крива 2) на РК при підключеному МК ($U_0 = 315$ В). У порівнянні з випадком, коли МК відключений, для прямого ІБР вони залишилися майже без змін, але при зворотному розряді майже вдвічі зростає амплітуда струму ($I_{m2} = 180$ А), а залишковий заряд на бар'єрі (крива 3) $\Delta q \approx 0$. Енергія, що була отримана РК від ГІ, $W = 165$ мДж (крива 4) майже повністю вкладається в розрядний проміжок: $W_2 = 163$ мДж (крива 5). Застосування МК призвело до різкого зменшення значення Z_2 (до ≈ 22 Ом). Це дозволило використати всю енергію, що залишилася в бар'єрі після первинного розряду, і підвищити величину W_2 з 127 до 163 мДж, тобто на 23 %. Таким чином, вся енергія W , яка була передана від ГІ до РК, була повністю використана. Але вона менша за енергію $W_R = 180$ мДж, яку ГІ може передати за тих самих умов ($U_0 = 315$ В) у резистивне навантаження. Це пояснюється тим, що в розрядне коло вихідної ланки ГІ $C_4 - L_4 - R_2$ тепер, по-перше, входить нелінійний опір R_2 , величина якого змінюється під час ІБР на кілька порядків, і, по-друге, в нього слід також включити ємність C_6 . Величину R_2 згідно зі схемою заміщення РК можна визначити наступним чином:

$$R_2 = U_2 / I_2, \quad (9)$$

де $U_2 = U - U_6$ – напруга на газовій частині РК, $I_2 = I - I_c$ – струм через газ.

Як показав досвід, ємнісний струм $I_c = C_6(dU_6/dt)$ практично не впливає на точність розрахунків R_2 , тому можна прийняти, що $I_2 \approx I$. Враховуючи, що напруга $U_6 = C_6 \dot{q}$, на основі (7), (9) залежність $R_2(t)$ буде мати вигляд

$$R_2(t) = (U - C_6^{-1} \int_0^t I dt) / I. \quad (10)$$

За цим виразом на основі осцилограм $I(t)$, $U(t)$ можна знайти $R_2(t)$ за час ІБР. На початку ІБР ($t \approx 0$) значення $R_2 \sim 10^{12}$ Ом, яке в подальшому швидко зменшується. Як приклад, залежність $R_2(t)$ для умов, коли $U_0 = 315$ В і підключений МК, представлено на рис. 7. З рисунка видно, що після початкового стрімкого падіння при $t \approx 20$ нс величина R_2 стабілізується на рівні 20 Ом, а в кінці ІБР починає знову стрімко

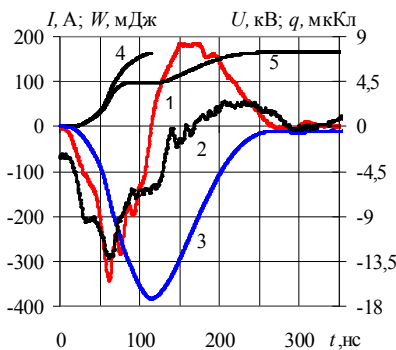


Рис. 6

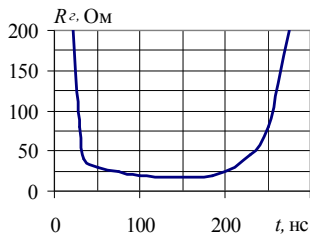


Рис. 7

наростати. Усереднене значення опору газового проміжку під час t_n дії прямого ІБР $R_{cy} \approx 32$ Ом. Воно знаходилося за виразом

$$R_{cy} = t_n^{-1} \int_0^{t_n} R_z dt. \quad (11)$$

Присутність у розрядному колі ємності C_{δ} змінює його характеристичний опір ρ , внаслідок чого зростає величина R_m , при якій коефіцієнт η досягає максимуму, і таким чином, не виконується умова (2), бо $R_{cy} < R_m$. Збільшити енергію W можна шляхом зменшення характеристичного опору ρ за рахунок збільшення ємності C_{δ} . На це вказують результати моделювання залежності $W(C_{\delta})$ ($U_0 = 315$ В, $R_{cy} = 40$ Ом), які свідчать, що зі збільшенням C_{δ} значення W зростає, наближаючися при $C_{\delta} \approx 3$ нФ до величини 180 мДж, яку було отримано у випадку резистивного навантаження. Досягти узгодженої роботи вихідної ланки ГІ та РК можна відповідним вибором напруги імпульсу та геометричних і діелектричних параметрів РК таким чином, щоб величини R_{cy} та C_{δ} задовольняли умові $R_{cy} \approx 2\rho$.

Обробка води ІБР та її аналіз. Процедура обробки води проходила наступним чином. Через РК з ІБР пропускався водний розчин МС. Одночасно з цим через РК прокачувалося повітря, яке є джерелом кисню, потрібного для утворення озону при розряді. Витрати рідини Q_e та газу Q_g становили відповідно 0,5 мл/с та 15 мл/с. Початковий об'єм розчину дорівнював $V_0 = 150$ мл. Вода стікала по внутрішньому електроду плівкою товщиною $\approx 0,15$ мм, час знаходження її в розрядній зоні близько 5 с. Після проходження всього об'єму води через РК від нього для аналізу відбиралася проба (5 мл), і процес обробки повторювався. Обробка відбувалася при підключеному МК. На кривій 1 рис. 8 показано значення концентрації МС K у залежності від числа циклів обробки N , що проводилася за умов $U_0 = 260$ В, $f = 10$ Гц. При кожній обробці зберігався однаковий питомий енерговклад $W_n = fW_z/Q_g = 2,2$ Дж/мл. З цієї кривої видно, що найбільші зміни концентрації відбуваються після першого циклу, коли K падає вдвічі. Після п'яти циклів обробки концентрація МС у воді зменшилася на 9%. Загально-вживаним показником ефективності електророзрядної обробки води [4–9] є величина енергетичного виходу Y , яка дорівнює відношенню маси розкладеної під дією розряду домішки до вкладеної в розряд енергії. Для умов цієї роботи

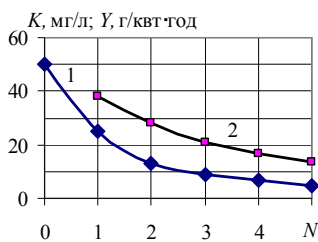


Рис. 8

$$Y = \Delta K V_p / f W_z t_{обр}, \quad (12)$$

де ΔK – зменшення концентрації домішки в воді об'ємом V_p за час її обробки $t_{обр}$.

Значення Y , які відповідають кожному циклу обробки N , позначено на кривій 2 (рис. 8) маркерами. Залежність $Y(N)$ свідчить про те, що при зменшенні K від 50 мг/л ($N=0$) до 5 мг/л ($N=5$) величина Y падає від 38 до 14 г/кВт·год. Вона також зменшується при зростанні частоти повторення імпульсів f . Особливо стрімке падіння значення Y відбувається в діапазоні $f = 10$ –40 Гц, коли вона знижується від 38 до 10 г/кВт·год. При $f = 120$ Гц величина Y становить 5 г/кВт·год ($U_0 = 260$ В, $W_n = 2,2$ Дж/мл, $N=1$). До подібного результату також призводить збільшення напруги U_0 , коли Y також падає. На це вказує залежність $Y(U_0)$, яку було отримано за умов $U_0 = 180$ –260 В, $f = 10$ Гц, $N=1$. Вона показала, що найбільше значення $Y_m = 75$ г/кВт·год відповідає напрузі $U_0 = 180$ В. Слід зазначити, що така величина Y_m вдвічі більша за ту, котра була отримана за аналогічних умов у [8]. При $U_0 = 260$ В Y становить 14 г/кВт·год. Зменшення енергетичного виходу ІБР при збільшенні f та U_0 можна пояснити наступним чином. При зростанні f зменшується час між імпульсами ІБР, якого може не вистачати на завершення плазмохімічних реакцій у воді, особливо за участю озону [3, 8], а при зростанні U_0 внаслідок збільшення енергії W_z стає більш суттєвим термічне розкладання хімічно активних частинок у розрядній плазмі за рахунок вторинних стримерів [3, 9]. Крім цього, як свідчать візуальні спостереження та фотографування ІБР, слід брати до уваги, що, коли f стає більш ніж ≈ 80 Гц, розряд має тенденцію переходити з гомогенної (дифузної) у ниткоподібну форму, що також сприяє термічному розкладанню хімічно активних частинок.

Аналіз експериментальних результатів показав, що величина W_n може бути параметром, який визначає енергетичний вихід ІБР. Узагальнюючу залежність $Y(W_n)$ ($f = 10$ –120 Гц, $U_0 = 180$ –365 В, $Q_g = 0,3$ –0,7 мл/с) представлено на рис. 9 кривою 1, звідки видно, що в області $W_n = 1$ –5 Дж/мл відбувається різке падіння енергоефективності обробки води ІБР. Тому доцільним є її проведення при мінімально можливих значеннях W_n . Можна припустити, що саме при $W_n \approx 1$ Дж/мл параметри ІБР є оптимальними з точки зору

мінімізації кількості енергії на обробку води. Більш детально питання про ефективність обробки води ІБР потребують окремих досліджень. З урахуванням втрат енергії в ГІ, які досягають 69% від енергії, отриманої від первинного джерела живлення, величина Y_k для всього комплексу при обробці водного розчину МС становить 22–1,5 г/кВт·год (рис. 9, крива 2).

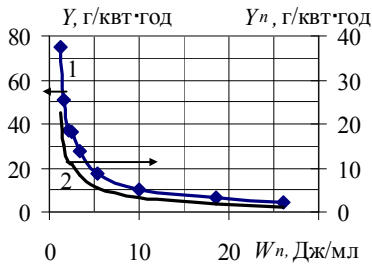


Рис. 9

Висновки. Досліджено чинники, які визначають енергоефективність комплексу для прямої обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. Встановлено, що найбільш суттєво на неї впливають втрати енергії в процесі магнітного стискання імпульсів напруги, узгодженість сумісної роботи вихідної ланки генератора імпульсів та розрядної камери, а також режим електророзрядної обробки води. При магнітному стисканні імпульсів найзначніші втрати енергії в генераторі при-

падають на ланку з високовольтним імпульсним трансформатором (29,1%), який потребує ретельного узгодження його характеристик з параметрами всієї електричної схеми генератора. Для ефективної передачі енергії в розрядну камеру необхідно, щоб характеристичний опір вихідного кола генератора імпульсів був близький до половини усередненої величини опору газового проміжку розрядної камери під час первинного імпульсного бар'єрного розряду. Щоб повністю корисно використовувати емісну енергію, яка залишається в розрядній камері після закінчення цього розряду, запропоновано шунтувати розрядну камеру магнітним ключем, який спрацьовує відразу після закінчення первинного бар'єрного розряду. При узгодженій роботі всіх елементів розробленого комплексу коефіцієнт передачі енергії від первинного джерела живлення в розрядну камеру досягає 31%. Для отримання найбільшої ефективності використання енергії, що була передана в розрядну камеру, обробку води з органічними домішками необхідно проводити при малих питомих енерговнесках, оптимальну величину яких треба визначати експериментальним шляхом. Використання розробленого комплексу для обробки модельного водного розчину метиленової сині показало, що енергетичний вихід імпульсного бар'єрного розряду сягає 75 г/кВт·год, а енергоефективність комплексу в цілому з урахуванням втрат у генераторі імпульсів – 22 г/кВт·год.

1. Божко І.В., Кобильчак В.В. Обробка імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 5 – С. 60–66.
2. Божко І.В., Зозулев В.І., Кобильчак В.В. SOS-генератор для електророзрядних технологій на основі імпульсного бар'єрного розряду // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 2. – С. 63–68.
3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.
4. Biljana P. Dojchinovich, Goran M. Roglicb, Bratislav M. Obradovich,, Milorad M. Kuraicaca, Mirjana M. Kostich, Jelena Nesich, Dragan D. Manojlovich. Decolorization of reactive textile dyes using water falling film dielectric barrier discharge // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – No 192. – Pp. 763–771.
5. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhuai Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater // Chemical Engineering Journal. – 2014. – No 236. – Pp. 348–363.
6. Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Plastinina N.A., Rybkin V.V. Application of Dielectric Barrier Discharge for Waste Water Purification // Plasma Chem Plasma Process. – 2011. – No 31. – Pp. 573–583.
7. Malik M.A. Synergistic effect of plasmacatalyst and ozone in a pulsed corona discharge reactor on the decomposition of organic pollutants in water // Plasma Sources Sci. Technol. – 2003. – No 12. – Pp. 526–532.
8. Monica Magureanu, Daniela Piroi, Nicolae Bogdan Mandache, Vasile Parvulescu. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters // Journal of Applied Physics. – 2008. – No 104. – Pp. 103306-1 – 103306-7.
9. Taichi Sugai; Akira Tokuchi; Weihua Jiang; Yasushi Minamitani. Investigation for Optimization of an Inductive Energy Storage Circuit for Electrical Discharge Water Treatment // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – Volume 42. – Issue 10. – Pp. 3101–3108.
10. Shuhai Liu, Manfred Neiger. Excitation of dielectric barrier discharges by unipolar submicrosecond square pulses // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2001. – No 34. – Pp. 1632–1638.

УДК 537.523.9 + 621.373.54

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ИМПУЛЬСНЫМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

Божко И.В.¹, канд.техн.наук, **Карлов А.Н.**¹, канд.техн.наук, **Кондратенко И.П.**¹, чл.-кор. НАН Украины, **Чарный Д.В.**², канд.техн.наук

¹ - Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: ws77@ukr.net

² - Институт водных проблем и мелиорации НААН Украины,

ул. Васильковская, 37, Киев, 03022, Украина.

Разработан комплекс, состоящий из генератора импульсов и разрядной камеры, предназначенный для прямой обработки воды импульсным барьерным разрядом. Генератор построен на принципах магнитного сжатия импульсов и использования в его выходном звене индуктивного накопителя энергии, который коммутируется диодом с малым временем обрыва обратного тока. Он обеспечивает короткие (~100 нс) высоковольтные (до 30 кВ) импульсы с энергией до 0,3 Дж, действующие на тонкую пленку (~0,15 мм) воды, стекающую по поверхности внутреннего электрода коаксиальной разрядной камеры. С целью достижения максимальной энергоэффективности обработки воды исследованы пути согласования работы всех звеньев комплекса. На основании анализа потерь энергии при ее передаче от внешнего источника к нагрузке делается вывод, что основная их часть приходится на звено с импульсным трансформатором и конечное звено генератора с разрядной камерой, которые требуют тщательного согласования с остальными звеньями генератора и электрическими параметрами разрядной камеры. При обработке водного раствора метиленовой сини с начальной концентрацией 50 мг/л энергетический выход импульсного барьерного разряда при 50% разложении примеси достигал 75 г/квт·час, а энергоэффективность комплекса в целом – 22 г/квт·час. Библ. 10, рис. 9.

Ключевые слова: импульсный барьерный разряд, потери энергии, обработка воды, энергетический выход.

DEVELOPMENT OF COMPLEX FOR WATER TREATMENT WITH PULSE BARRIER DISCHARGE

I.V. Bozhko¹, **A.M. Karlov**¹, **I.P. Kondratenko**¹, **D.V. Charnyi**²

¹ - Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ws77@ukr.net

² - Institute of water problems and melioration NAAN Ukraine,

str. Vasylykivska, 37, Kyiv, 03022, Ukraine.

Complex for direct processing of contaminated water with pulse dielectric barrier discharge is researched. It consists from a pulse generator and a discharge chamber. The generator is built on the principles of magnetic pulse compression and using of inductive energy storage device, which is switching with the diode with a small time interrupting reverse current (~40 ns). The generator provides short (~100 ns) high-voltage (up to 30 kV) pulses with the energy up to 0.3 J. Pulses acted on the surface of the water, which flowed a thin film (~0.15 mm) on the surface of the inner electrode of coaxial chamber. In order to obtain the maximum efficiency of water treatment investigated ways of harmonizing the work of all units of the complex. The analysis of the energy loss in transmission from an external source to the load let to conclude that the basic parts of them are linking with the pulse transformer and end section generator connected with chamber. They are requiring careful coordination with other links generator and electrical parameters of the chamber. A processing an aqueous solution methylene blue with an initial concentration of 50 mg/l showed energy yield pulse dielectric barrier discharge at 50% due to impurities up to 75 g/kWh, and for complex as a whole – 22 g/kWh. Referenses. 10, figures 9.

Keywords: pulse dielectric barrier discharge, treatment of water, loss of energy, energy yield.

1. Bozhko I.V., Kobylchak V.V. Water treatment in the state of drops by pulse barrier discharge // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2015. – No 5. – Pp. 60–66. (Ukr)
2. Bozhko I.V., Zozuljov V.I., Kobylchak V.V. SOS- generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2016. – No 2. – Pp. 63–68. (Ukr)
3. Samoilovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. Physical chemistry of barrier discharge. – Moskva: Moskovskii Gosudarstvennyi Universitet, 1989. – 176 p. (Rus)
4. Biljana P. Dojchinovich, Goran M. Roglich, Bratislav M. Obradovich, Milorad M. Kuraicaca, Mirjana M. Kostich, Jelena Nesich, Dragan D. Manojlovich. Decolorization of reactive textile dyes using water falling film dielectric barrier discharge // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – No 192. – Pp. 763–771.
5. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater // *Chemical Engineering Journal*. – 2014. – No 236. – Pp. 348–363.
6. Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Plastinina N.A., Rybkin V.V. Application of Dielectric Barrier Discharge for Waste Water Purification // *Plasma Chem Plasma Process*. – 2011. – No 31. – Pp. 573–583.
7. Malik M.A. Synergistic effect of plasmacatalyst and ozone in a pulsed corona discharge reactor on the decomposition of organic pollutants in water // *Plasma Sources Sci. Technol*. – 2003. – No 12. – Pp. 526–532.
8. Monica Magureanu, Daniela Piroi, Nicolae Bogdan Mandache, Vasile Parvulescu. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – No 104. – Pp. 103306-1 – 103306-7.
9. Taichi Sugai, Akira Tokuchi, Weihua Jiang, Yasushi Minamitani. Investigation for Optimization of an Inductive Energy Storage Circuit for Electrical Discharge Water Treatment // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2014. – Vol. 42. – Issue 10. – Pp. 3101 – 3108.
10. Shuhai Liu, Manfred Neiger. Excitation of dielectric barrier discharges by unipolar submicrosecond square pulses // *J. Phys. D: Appl. Phys*. – 2001. – No 34. – Pp. 1632–1638.

Надійшла 24.03.2017
Остаточний варіант 26.04.2017