

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2021.1\(484\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).8)
УДК 681.52:537.528:544.5

DETERMINATION OF THE INITIAL CONDITIONS OF THE CONTROL ALGORITHM FOR THE HIGH-VOLTAGE PULSE DISCHARGE IN AN EXOTHERMIC ENVIRONMENT

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ УМОВ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО РОЗРЯДУ В ЕКЗОТЕРМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Oleksandr I. Vovchenko¹

iipt@iipt.com.ua

ORCID: 0000-0002-5837-2208

Larysa Y. Demydenko¹

iipt@iipt.com.ua

ORCID: 0000-0003-3045-0419

Serhii S. Kozyrev²

skozyrev@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8995-131X

О. І. Вовченко¹,

докт. техн. наук, професор,

член-кореспондент

Національної академії наук України

Л. Ю. Демиденко¹,

С. С. Козирев²,

канд. техн. наук, доцент

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv*

²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

¹*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The aim of the study is to analyze high-voltage pulse discharge in condensed exothermic media as an object of control and determine the initial conditions of the control algorithm for dosed input of electrical energy into the discharge channel, ensuring the efficiency of exothermic energy conversion.

Method. To evaluate the efficiency of exothermic energy conversion, a method of experimental determination of the amount of chemical energy released in the discharge interval due to chemical exothermic transformations per mass of exothermic mixture was developed. Method uses mathematical modeling of processes in the discharge channel.

Results. It was revealed that modes of controlled electric energy introduction into discharge channel have significant influence on the efficiency of exothermic energy conversion. The relation between specific energy efficiency of the chemical energy release of the exothermic mixture and the distribution of total electrical energy between successive discharge pulses was obtained. Based on that the acceptable energy ratios and initial conditions of the control algorithm are determined.

Scientific novelty. A method for determining the initial conditions of the algorithm for controlling the dosed input of electrical energy into the channel of high-voltage pulsed discharge in exothermic environments was developed. The proposed method provides maximum efficiency of exothermic transformations with controlled input of electrical energy into the discharge channel.

Practical significance. The use of research results in the synthesis of control systems for dosed input of energy into the discharge channel will increase the amount of total energy released during high-voltage pulse discharge in an exothermic environment. Such increase can be achieved without increasing the amount of electricity stored in capacitor banks of pulse current generators. This will increase the efficiency of technological impact on the objects of processing.

Key words: high-voltage pulse discharge; exothermic medium; efficiency of exothermic energy conversion; pulse current generator; control algorithm; initial conditions.

Анотація. Метою дослідження є аналіз високовольтного імпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах як об'єкта керування й визначення початкових умов алгоритму керування дозованим введенням електричної енергії в канал розряду, що забезпечують ефективність екзотермічного перетворення енергії в режимі вибухового горіння.

Методика. Для оцінки ефективності екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду розроблено методику експериментального визначення кількості хімічної енергії, яка виділилася в розрядному проміжку за рахунок

екзотермічних перетворень, на масу екзотермічної суміші з використанням математичного моделювання процесів у каналі розряду.

Результати. Встановлено суттєву залежність ефективності перетворення енергії під час високовольтного імпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах від режимів керованого введення електричної енергії в канал розряду. Визначено вплив розподілу повної електричної енергії між послідовними розрядними імпульсами на питому енергетичну ефективність перетворення енергії екзотермічної суміші в каналі розряду, на основі чого визначаються прийнятні співвідношення енергій між послідовними розрядними імпульсами та початкові умови алгоритму керування режимом високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі.

Наукова новизна. Запропоновано методику визначення початкових умов алгоритму керування дозованим введенням електричної енергії в канал високовольтного імпульсного розряду в екзотермічних середовищах, що забезпечують максимальну енергетичну ефективність екзотермічних перетворень у разі керованого введення електричної енергії в канал розряду.

Практична значимість. Використання результатів досліджень під час синтезу систем керування дозованим введенням енергії в канал розряду дозволить збільшити кількість виділеної сумарної енергії під час високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі без збільшення витрат електроенергії, накопиченої в конденсаторних батареях генераторів імпульсних струмів, що підвищить ефективність технологічного впливу на об'єкти оброблення.

Ключові слова: високовольтний імпульсний розряд; екзотермічне середовище; ефективність екзотермічного перетворення енергії; генератор імпульсних струмів; алгоритм керування; початкові умови.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У технологіях розрядноімпульсного руйнування природних і штучних негабаритів, розпушування міцних донних ґрунтів широко використовують високовольтний імпульсний електричний розряд у хімічно активних конденсованих середовищах, здатних до екзотермічних перетворень у режимі вибухового горіння під дією високих температур і тисків, створюваних у каналі розряду електророзрядною плазмою. Енергія, що вивільняється під час екзотермічних перетворень хімічно активного середовища, підсумовується з електричною енергією розряду, накопиченою на обкладинках конденсаторних батарей генератора імпульсних струмів. У результаті такого підсумовування енергія руйнування зростає в кілька разів без збільшення накопиченої енергії в батареї конденсаторів [1; 2; 3].

Важливою перевагою розрядно-імпульсних технологій, що використовують високовольтний розряд в екзотермічному середовищі для руйнування негабаритів, є керованість, на відміну від технологій, які використовують вибухові речовини. Тому розроблення систем керування режимом високовольтного імпульсного розряду в хімічно активних конденсованих середовищах є актуальним завданням, розв'язання якого потребує вивчення високовольтного розряду в екзотермічному середовищі як об'єкта керування, розроблення алгоритму керування та визначення початкових умов, що забезпечують енергетичну ефективність екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проведені раніше дослідження показали, що використання високовольтного імпульсного розряду

в екзотермічному середовищі дозволяє розширити сферу застосування технологій імпульсної обробки матеріалів. Зумовлено це тим, що за ідентичних характеристик генераторів імпульсних струмів, які застосовуються в розрядно-імпульсних установках, під час використання розряду в хімічно активних конденсованих середовищах, здатних до екзотермічних перетворень, зростають амплітуда і тривалість генерованого імпульсу тиску. У роботі [4] аналізуються профілі тиску, отримані з урахуванням випромінювання, викликаного реакцією екзотермічних добавок. Проведений розрахунок силового впливу на оброблюваний об'єкт підтверджує зростання амплітуди і тривалості генерованого імпульсу тиску під час розряду в екзотермічному середовищі.

Важливим під час технологічного використання розряду в екзотермічному середовищі є забезпечення енергетичної ефективності. У роботах [5; 6] досліджується одноімпульсний режим введення енергії в канал розряду, за якого реакція горіння екзотермічної суміші припиняється протягом декількох десятків мікросекунд, що призводить до неповного згорання використовуваних екзотермічних сумішей та втрати потенційної хімічної енергії. Це зумовлює недостатню ефективність одноімпульсного введення енергії під час використання одноконтурної схеми генератора імпульсних струмів через короткочасність імпульсу тиску, що генерується високовольтним розрядом.

Аналіз результатів дослідження введення електричної енергії в канал підводного іскрового розряду [7; 8] показав, що на базі багатоконтурних генераторів імпульсних струмів можна формувати імпульси тиску з декількома послідовними пульсаціями, число яких дорівнює числу пульсацій електричної потужності. Кожен імпульс забезпечує збільшення амплітуди

і тривалості імпульсу тиску. Проаналізовані літературні джерела аргументовано показують переваги багатоімпульсного введення енергії в канал розряду.

Для реалізації багатоімпульсного введення енергії з метою отримання хвиль тиску необхідної форми для конкретної технології використовуються багатоконтурні генератори імпульсних струмів у складі розрядноімпульсних установок [9; 10]. Ємнісні накопичувачі кожного контуру генератора мають різні ємності, які можуть заряджатися до різної напруги, та систему комутації, що дозволяє реалізувати незалежне включення кожного контуру.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що залишається відкритим питання керування подачею імпульсів для забезпечення ефективності екзотермічних перетворень під час кожної реалізації високовольтного багатоімпульсного розряду в екзотермічному середовищі. Багатоімпульсне дозоване введення енергії вимагає розроблення алгоритму керування введенням енергії в канал розряду та визначення початкових умов, а саме розподілу повної електричної енергії між послідовними розрядними імпульсами, що забезпечить енергетичну ефективність екзотермічних перетворень у каналі розряду.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз високовольтного імпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах як об'єкта керування й визначення початкових умов алгоритму керування дозованим багатоімпульсним введенням електричної енергії в канал розряду, що забезпечують ефективність екзотермічного перетворення енергії, тобто виділення в розрядному проміжку максимально можливої кількості хімічної енергії на масу екзотермічної суміші.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі завдання:

- проведення експериментальних досліджень з метою визначення кількості хімічної енергії, яка виділилася в розрядному проміжку за рахунок хімічних екзотермічних перетворень, на масу екзотермічної суміші з використанням математичного моделювання процесів у каналі розряду;

- дослідження режимів керованого дозованого введення електричної енергії в канал розряду з метою виявлення його впливу на питому енергетичну ефективність екзотермічного перетворення енергії;

- визначення початкових умов алгоритму керування двоконтурним генератором імпульсних струмів, що здійснює дозоване багатоімпульсне введення електричної енергії в канал розряду, які забезпечують ефективність екзотермічного перетворення енергії.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Ефективність екзотермічного перетворення енергії під час високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі визначається повнотою зго-

рання маси екзотермічної суміші. У разі повного згорання величина хімічної енергії, що вивільняється, дорівнює потенційній енергії екзотермічної суміші. Проте в разі некерованого одноімпульсного введення енергії в канал розряду в реакцію вступає біля 20% загальної кількості екзотермічної суміші, введеної в розрядний проміжок. Головною причиною цього є швидке припинення екзотермічної самопідтримної реакції через різке зниження тиску в каналі розряду від сотень МПа до менш ніж $P_{\min}=23$ МПа – мінімального рівня тиску, необхідного для протікання екзотермічної самопідтримної реакції [11]. Тому актуальним є дослідження режимів керованого введення електричної енергії в канал розряду з метою подовження екзотермічної самопідтримної реакції і підвищення ефективності екзотермічного перетворення енергії під час кожної реалізації розряду, що зрештою визначає ефективність технологічної дії на об'єкти обробки.

Для підвищення ефективності вивільнення хімічної енергії екзотермічної суміші необхідна підтримка рівня тиску в каналі розряду вище мінімального рівня більш тривалий час. На підставі аналізу фізичних процесів, що протікають під час високовольтного розряду в екзотермічному середовищі, запропоновано метод підвищення ефективності екзотермічних перетворень за кожної реалізації розряду. Метод оснований на послідовному, дозованому введенні електричної енергії в канал розряду за заданим алгоритмом за використання двоконтурного генератора імпульсних струмів з поточним непрямим контролем рівня тиску в каналі розряду з метою запобігання згасання самопідтримної екзотермічної реакції [12].

Реалізація запропонованого алгоритму керування потребує визначення оптимальних початкових умов, що забезпечують виділення в розрядному проміжку максимально можливої кількості хімічної енергії на масу екзотермічної суміші.

Для визначення оптимальних початкових умов алгоритму керування необхідно встановити основні фактори, що впливають на ефективність екзотермічного перетворення. Під час проведення експериментальних досліджень, спрямованих на вирішення цього завдання, важливим методичним моментом було визначення енергії, що виділилася в каналі розряду через хімічні екзотермічні перетворення. Потенційна енергія екзотермічної суміші може бути розрахована досить точно. Але оскільки повного згорання суміші в каналі розряду не відбувається, то сумарна енергія, що виділилася в каналі розряду, буде менша, ніж сума потенційних енергій, накопичених у конденсаторній батареї та масі екзотермічної суміші.

Під час високовольтного розряду в екзотермічному середовищі сумарна енергія складається з електричної енергії W_e і теплової хімічної енергії ΔW_x , що вивільняється під час окислення екзотермічної суміші. Ця енергія витрачається на зміну агрегатного

і термодинамічного стану речовини в каналі розряду, розширення каналу, а також на теплові та інші втрати. У процесі розширення каналу розряду випромінюється хвиля тиску, і формується післярозрядна парогозова порожнина (далі – ПГП) з енергією W_n , яка йде на обробку технологічних об'єктів. З метою визначення ефективності екзотермічного перетворення під час реалізації керованого розряду необхідно визначити внесок хімічної енергії ΔW_x . Для поділу вкладів у загальний енергетичний баланс електричної та хімічної енергії використовуємо вираз [11]:

$$\Delta W_x = W_n - \eta_n \cdot W_\tau, \quad (1)$$

де W_n – повна енергія ПГП, Дж; η_n – коефіцієнт перетворення введеної в канал розряду електричної енергії W_τ в енергію ПГП.

Енергія післярозрядної парогозової порожнини W_n може бути розрахована з використанням відомої формули Вілліса по періоду її пульсації T_n [11]:

$$T_n = \frac{1,14 \rho^2 W_n^{1/3}}{P_0^6}, \quad (2)$$

де P_0 – гідростатичний тиск на глибині пульсації ПГП, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; T_n – період пульсації ПГП, с.

Під час проведення експериментальних досліджень кількість виділеної енергії в ПГП W_n визначали за періодом пульсації ПГП T_n – інтервал часу між піками тиску. Профіль хвилі тиску в середовищі $P(t)$ в екваторіальній площині на відстані 0,3 м від каналу розряду вимірювали за допомогою п'єзокерамічного датчика тиску і фіксували на запам'ятовуючому осцилографі TDS 2024B.

Величина коефіцієнта перетворення електричної енергії в каналі розряду η_n визначалась з емпіричного виразу [11]:

$$\eta_n = 0,26 \exp(-2 / 3\beta) + 0,14, \quad (3)$$

де $\beta = l^{-1} (W_\tau / P_0)^{1/3}$ – коефіцієнт форми ПГП; l – довжина міжелектродного проміжку, м.

Об'єктивним критерієм ефективності виділення потенційної хімічної енергії екзотермічної суміші може бути величина μ – питома енергетична ефективність екзотермічного перетворення, Дж/кг:

$$\mu = \frac{\Delta W_x}{M}, \quad (4)$$

де ΔW_x – хімічна енергія, Дж; M – маса екзотермічної суміші, кг.

Для визначення величини μ за формулою (4) спочатку визначалась по експериментально реєстрованому періоду пульсації ПГП T_n повна енергія ПГП W_n за формулою (2). Використовуючи електричні характеристики $I(t)$ і $U(t)$, визначали електричну енергію W_τ . Коефіцієнт її перетворення η_n визначався за формулою (3). Потім за формулою (1) визначалась кількість хімічної енергії ΔW_x .

Під час експериментальних досліджень у процесі кожного розряду одночасно реєстрували напругу на розрядному проміжку $U(t)$, струм розряду $I(t)$, профіль хвилі тиску, що розповсюджується в середовищі $P(t)$, і період пульсацій післярозрядної парогозової порожнини T_n . Як датчики використовувалися дільник напруги ДН-50 з діапазоном вимірювання від 0 до 50 кВ, шунт Ш-100 з діапазоном вимірювання від 0 до 100 кА, а також п'єзокерамічний датчик тиску. Сигнали з датчиків фіксували на запам'ятовуючому осцилографі TDS 2024B.

Оскільки процеси пробою, виділення енергії в каналі розряду і генерування хвиль тиску носять стохастичний характер [1], то для збільшення ступеня достовірності та оцінки статистичного розкиду одержуваних результатів число дослідів у серії експериментів, що характеризуються фіксованими умовами проведення, залежало від розкиду реєстрованих параметрів розряду. Мінімальне значення було вибрано рівним п'яти. За отриманими вибірками обчислювалися оцінки середніх значень:

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{n}. \quad (5)$$

Під час керованого двохімпульсного введення електричної енергії в канал високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі необхідно визначити початковий розподіл енергії між першим і другим імпульсами, що забезпечує максимальну питому енергетичну ефективність екзотермічного перетворення μ . Використовуючи запропоновану методику визначення μ , було проведено дослідження впливу співвідношення енергій другого і першого імпульсів W_2/W_1 на ефективність виділення потенційної хімічної енергії екзотермічної суміші.

Експериментальні дослідження проводилися в технологічному баку об'ємом 1 м³, заповненому водою з фіксованим екзотермічним складом, що містить 40% порошку алюмінію у водному розчині окислювача, ефективність застосування якого обґрунтована [11]. Для введення екзотермічної суміші в зону плазмового каналу її попередньо поміщали в діелектричні капсули, в торцях яких установлювалися струмопровідні електроди з міді. Потім така капсула з екзотермічною сумішшю встановлювалася у водний міжелектродний проміжок. Довжина капсули l , що відповідає довжині розрядного проміжку, визначалася з умови забезпечення початкової напруженості електричного поля E_0 , необхідної для утворення каналу наскрізної провідності.

Для вибраного типу екзотермічної суміші $E_0 \geq 10^6$ В/м, $l = 3 \cdot 10^{-2}$ м [11]. Сумарна енергія двоконтурного генератора імпульсних струмів W_τ змінювалася від 400 Дж до 750 Дж. Діапазон енергій під час проведення експериментальних досліджень

був вибраний виходячи з вимог технології руйнування негабаритів. За інших розрядноімпульсних технологій можлива зміна енергетичного діапазону, що вимагатиме проведення додаткових досліджень з метою визначення початкових умов алгоритму керування.

Зміна режимів керованого введення енергії забезпечувалася варіюванням енергій W_1 і W_2 контурів генератора імпульсних струмів шляхом зміни початкових напруг U_1 , U_2 на накопичувачах енергії і зміни ємностей конденсаторних батарей C_1 і C_2 . Величина співвідношення енергій W_2/W_1 змінювалася в інтервалі від 2,0 до 23,0. Власні індуктивності кожного з розрядних контурів L_1 і L_2 визначалися з досліду короткого замикання і протягом експериментів не змінювалися: $L_1=6,8 \cdot 10^{-6}$ Гн, $L_2=3,54 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Для порівняння результатів експериментальних досліджень за різних режимів уведення електричної енергії величина питомої енергетичної ефективності μ була пронормована до значення μ_0 під час одноімпульсного введення енергії і представлена відносною величиною:

$$\bar{\mu} = \mu / \mu_0, \quad (6)$$

де μ_0 – ефективність згорання в каналі розряду одиниці маси екзотермічної суміші за традиційного одноімпульсного введення енергії, Дж/кг; μ – ефективність згорання в каналі розряду одиниці маси екзотермічної суміші під час розряду з керованим двоімпульсним введенням енергії, Дж/кг.

Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 1 у вигляді залежностей $\bar{\mu} = f\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$, побудованих на основі експериментальних даних (позначені точками) для трьох значень сумарної введеної електроенергії W_{Σ} . Там же наведено їх апроксимацію поліноміальною залежністю третього ступеня, що виконана за допомогою стандартної функції – лінії

тренда програмного забезпечення Microsoft Excel (на рисунку позначені суцільними лініями).

Як видно із залежностей $\bar{\mu} = f\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$ величина співвідношення енергій W_2/W_1 істотно впливає на ефективність протікання екзотермічної хімічної реакції в умовах керованого введення енергії. Залежності $\bar{\mu} = f\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$ для кожного значення W_{Σ} мають максимуми, що відповідає максимальній ефективності перетворення хімічної енергії, які зсуваються в бік збільшення під час зростання повної енергії. Обмеження зростання в разі подальшого збільшення відношення W_2/W_1 пояснюється тим, що енергія першого імпульсу повинна забезпечити умови займання екзотермічної суміші, тобто для кожного складу й обсягу екзотермічної суміші існує своє мінімальне значення W_1 , подальше зменшення якого є неприйнятним.

Аналіз отриманих результатів показав, що за різних значень повної введеної електроенергії W_{Σ} і різних співвідношень енергій в імпульсах W_2/W_1 тепла енергія екзотермічного перетворення екзотермічної суміші збільшується в межах від 1,2 до 1,7 разів. Це забезпечує підвищення сумарної енергії без збільшення долі електричної енергії, а тільки за рахунок зростання вкладу енергії, що виділяється в результаті більшої інтенсивності екзотермічної реакції окислення екзотермічної суміші. Таким чином, результати досліджень показали, що, змінюючи співвідношення між величинами електричної енергії в імпульсах, а за постійних значень ємності батарей генератора імпульсних струмів, змінюючи співвідношення між величинами зарядних напруг конденсаторів, можна цілеспрямовано керувати ефективністю екзотермічних перетворень у каналі розряду.

Повна енергія парогазової порожнини W_{Σ} , яка необхідна для здійснення заданих технологічних операцій, визначається за результатами технологічних випробувань. Максимальна енергія екзотермічного

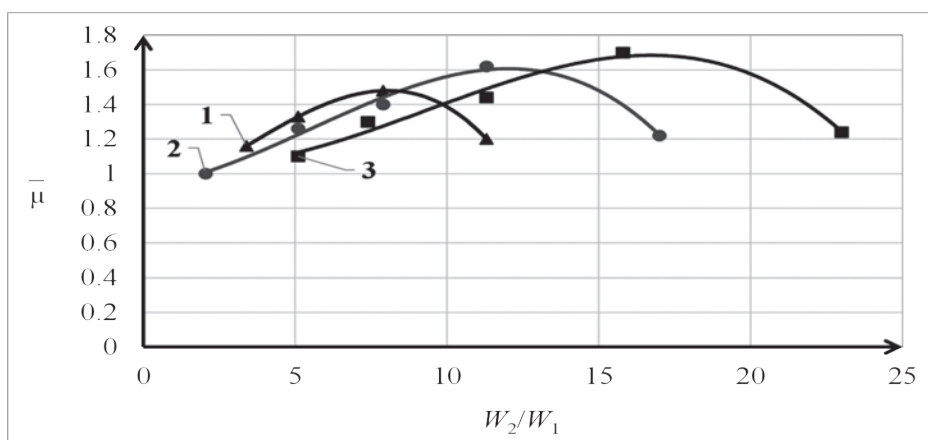


Рис. 1. Залежність питомої енергетичної ефективності $\bar{\mu}$ від співвідношення енергій W_2/W_1 за різних значень повної електроенергії W_{Σ} : 1 – 400 Дж, 2 – 550 Дж, 3 – 750 Дж

перетворення ΔW_x визначається кількістю і складом екзотермічної суміші. Повна введена в канал розряду електрична енергія, що забезпечить виконання заданих технологічних завдань, визначається за виразом $W_\tau = \frac{W_n - \Delta W_x}{\eta_n}$. Використовуючи отримані в результаті проведених досліджень залежності $\bar{\mu} = f\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$, визначають оптимальні співвідношення енергій в імпульсах W_2/W_1 за певного визначеного значення W_τ .

За відомих значень енергій W_n й ΔW_x , що задаються вимогами технології та типом екзотермічної суміші, й визначеному розподілі повної електричної енергії W_τ між послідовними імпульсами зі співвідношення W_2/W_1 можна отримати значення початкових умов алгоритму керування високовольтним імпульсним розрядом у конденсованих екзотермічних середовищах у вигляді початкових значень напруги на конденсаторах генератора імпульсних струмів U_1, U_2 , що забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії, користуючись виразами:

$$W_\tau = \frac{W_n - \Delta W_x}{\eta_n}; \quad W_\tau = W_1 + W_2; \quad W_{1,2} = \frac{C_{1,2} U_{1,2}^2}{2}. \quad (7)$$

Алгоритм керування дозованим введенням електричної енергії в канал розряду під час використання двоконтурного генератора імпульсних струмів з поточним непрямим контролем рівня тиску в каналі розряду [12] запобігає згасанню самопідтримної екзотермічної реакції в разі випадкового зниження тиску через стохастичність процесів, але без визначення початкових умов оптимального розподілу повної електричної енергії між імпульсами не забезпечить максимальної ефективності виділення хімічної енергії під час згорання в каналі розряду екзотермічної суміші.

Отримані результати досліджень дозволяють за запропонованою методикою визначити початкові умови алгоритму керування двоконтурним генератором імпульсних струмів, що здійснює дозоване бага-

тоімпульсне введення електричної енергії в канал розряду, які забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії під час високовольтного імпульсного розряду в конденсованому екзотермічному середовищі.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику експериментального визначення кількості хімічної енергії, яка виділилася в розрядному проміжку за рахунок хімічних екзотермічних перетворень, на масу екзотермічної суміші, що дає змогу оцінити енергетичну ефективність екзотермічного перетворення енергії в каналі високовольтного імпульсного розряду в конденсованому екзотермічному середовищі.

Визначено залежність питомої ефективності виділення енергії екзотермічної суміші в каналі розряду від співвідношення доз електричної енергії, що вводяться в канал розряду послідовними розрядними імпульсами. На основі цього визначається оптимальний розподіл повної електричної енергії, введеної в канал розряду, та необхідні параметри контурів генератора імпульсних струмів, що забезпечує необхідний розподіл енергії між послідовними розрядними імпульсами.

Запропоновано методику визначення початкових умов алгоритму керування двоконтурним генератором імпульсних струмів, що здійснює дозоване багатоімпульсне введення електричної енергії в канал розряду, які забезпечують максимальну питому ефективність екзотермічного перетворення енергії. Це дозволить збільшити кількість виділеної сумарної енергії під час високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі без збільшення витрат електроенергії, накопиченої в конденсаторних батареях генераторів імпульсних струмів, що підвищить ефективність технологічного впливу на об'єкти обробки.

REFERENCES

- [1] Guliy, G. A. (1990). *Nauchnye osnovy razryadnoimpul'snykh tekhnologiy*. Kyiv: Naukova dumka, 208. [in Russian]
- [2] Rizun, A. R., Golen', Yu. V., Denisyuk, T. D. (2008). Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 44 (3), 240–242. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375508030125>.
- [3] Rytov, S. A. (2010). *Effektivnost' primeneniya elektrorazryadnykh tekhnologiy dlya ustroystva geotekhnicheskikh konstruksiy. Zhilishchnoe stroitel'stvo*, (5), 47–50. [in Russian]
- [4] Krutikov, V. S., Rizun, A. R., Golen', Yu. V. (2014). Metod otsenki poley davleniy pri vysokovol'tnom elektrohimicheskom vzryve v zakrytykh obemah. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 50 (5), 84–87. [in Russian]
- [5] Rizun, A. R., Posdeev, V. A., Golen', Yu. V. (2010). One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46 (3), 263–265. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375510030129>.
- [6] Rizun, A. R., Golen', Yu. V., Denisyuk, T. D. (2007). Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 43 (2), 116–118. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375507020093>.
- [7] Barbashova, G. A., Shomko, V. V. (2007). Cyclicity effect of the electrical energy input in a channel of the underwater spark discharge. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 43 (2), 110–115. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375507020081>.

- [8] Barbashova, G. A. (2010). Restoration of the characteristics of the cavity formed upon explosion of a microconductor according to the specified two-pulse temperature dependence of the pressure at a point in a liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46 (1), 53–56. doi [https:// doi.org/10.3103/s1068375510010096](https://doi.org/10.3103/s1068375510010096).
- [9] Tertilov, R. V. (2011). Optimization of discharge technologies on applying base of pulse current generator with two discharge circuits. *Tekhnichna elektrodynamika*, 3, 67–72. [in Russian]
- [10] Blashchenko, A. D., Polovinka, V. D., Tertilov, R. V. (2013). Dvuhkonturniy generator impul'snyh tokov s reguliruemym vkladyeniem konturov. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 49 (1), 97–101. [in Russian]
- [11] Vovchenko, A. I., Posohov, A. A. (1992). *Upravlyaemye elektrovzryvnye protsessy preobrazovaniya energii v kondensirovannyh sredah*. Kyiv: Naukova dumka, 168. [in Russian]
- [12] Vovchenko, A. I., Demydenko, L. Yu., Kozhyrev, S. S. (2019). *Sposib zdiisnennia elektrokhimichnykh vybukhiv u ridkomu seredovyshchi* (Ukrainskyi patent № 137928). Ministerstvo rozvytku ekonomiky, torhivli ta silskoho hospodarstva Ukrainy. [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Гулый, Г. А. (1990). *Научные основы разрядноимпульсных технологий*. Киев : Наук. Думка. 208 с.
- [2] Rizun, A. R., Golen', Yu. V., Denisyuk, T. D. (2008). Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 44(3). 240–242. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375508030125>
- [3] Рытов, С. А. (2010). Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций. *Жилищное строительство*. № 5. С. 47–50.
- [4] Крутиков, В. С., Ризун, А. Р., Голень, Ю. В. (2014). Метод оценки полей давлений при высоковольтном электрохимическом взрыве в закрытых объемах. *Электронная обработка материалов*. № 50(5). С. 84–87.
- [5] Rizun, A. R., Posdeev, V. A., Golen', Yu. V. (2010). One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 46(3). 263–265.
- [6] Rizun, A. R., Golen', Yu. V., Denisyuk, T. D. (2007). Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 43(2). 116–118.
- [7] Barbashova, G. A., Shomko, V. V. (2007). Cyclicity effect of the electrical energy input in a channel of the underwater spark discharge. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 43(2). 110–115.
- [8] Barbashova, G. A. (2010). Restoration of the Characteristics of the Cavity Formed upon Explosion of a Microconductor According to the Specified Two Pulse Temperature Dependence of the Pressure at a Point in a Liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 46(1). 53–56.
- [9] Тертилов, Р. В. (2011). Оптимизация разрядноимпульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов. *Технічна електродинаміка*. № 3. С. 67–72.
- [10] Блащенко, А. Д., Половинка, В. Д., Тертилов, Р. В. (2013). Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров. *Электронная обработка материалов*. № 49(1). С. 97–101.
- [11] Вовченко, А. И., Посохов, А. А. (1992). *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев : Наук. Думка. 168 с.
- [12] Вовченко, А. И., Демиденко, Л. Ю., Козирев, С. С. (2019). *Спосіб здійснення електрохімічних вибухів у рідкому середовищі* (Український патент № 137928). Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України.

© Вовченко О. І., Демиденко Л. Ю., Козирев С. С.
Дата надходження статті до редакції: 12.03.2021
Дата затвердження статті до друку: 25.03.2021