

УДК 537.528+621.3.011.74
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).11](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).11)

RESEARCH OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A HIGH-VOLTAGE ELECTROCHEMICAL EXPLOSION

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ВИБУХУ

Serhii S. Kozyrev
skozyrev@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8995-131X

С. С. Козирєв,
канд. техн. наук, доц.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv,
Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

Abstract. *The aim* of the work is to determine the values of the energy characteristics of a high-voltage electrochemical explosion, which ensure the maximum efficiency of exothermic energy conversion and the maximum release of chemical energy in the mode of explosive combustion of the exothermic mixture in the high-voltage discharge channel. *Method.* The evaluation of the efficiency of exothermic energy conversion in the high-voltage discharge channel is carried out using the developed method of experimental determination of the amount of chemical energy released due to exothermic transformations, using mathematical modeling of processes in the discharge channel.

Results. It was studied the effect on the efficiency of energy conversion of the following three figures: amount of electrical energy, introduced into the discharge channel; mass of exothermic mixture; specific electrical energy. The conditions that ensure the maximum release of chemical energy during a high-voltage electrochemical explosion are determined.

Scientific novelty. Based on the analysis of the results of experimental studies of the influence of the energy characteristics of a high-voltage electrochemical explosion on the efficiency of electroexplosive energy conversion, the optimal value of the specific electrical energy was established, which ensures the maximum release of chemical energy during a high-voltage impulse discharge in condensed exothermic environments.

Practical significance. The use of the conditions defined in this paper, which ensure the release of the maximum amount of chemical energy, for the synthesis of combined energy sources of discharge-pulse technologies based on a high-voltage electrochemical explosion makes it possible to significantly reduce energy consumption due to the maximum of additional chemical energy released as a result of exothermic reactions in the discharge channel, and minimize the costs of exothermic mixtures when implementing technological operations using high-voltage electrochemical explosion.

Key words: high-voltage electrochemical explosion; electro-explosive energy conversion; specific electrical energy; exothermic mixture; chemical energy; energy source; discharge-pulse technologies.

Анотація. *Метою* роботи є визначення значень енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху, які забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії та максимальне виділення хімічної енергії в режимі вибухового горіння екзотермічної суміші в каналі високовольтного розряду. *Методика.* Оцінка ефективності екзотермічного перетворення енергії в каналі високовольтного розряду проводиться з використанням розробленої методики експериментального визначення кількості хімічної енергії, яка виділилась за рахунок екзотермічних перетворень, з використанням математичного моделювання процесів в каналі розряду.

Результати. Досліджено вплив величини електричної енергії, що вводиться в канал розряду; маси екзотермічної суміші; питомої електричної енергії на ефективність перетворення енергії при високовольтному імпульсному розряді в конденсованих екзотермічних середовищах та визначено умови, які забезпечують максимальне виділення хімічної енергії при високовольтному електрохімічному вибуху.

Наукова новизна. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень впливу енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху на ефективність електровибухового перетворення енергії встановлено оптимальне значення питомої електричної енергії, що забезпечує максимальне виділення хімічної енергії при високовольтному імпульсному розряді в конденсованих екзотермічних середовищах.

Практична значимість. Використання визначених в даній роботі умов, що забезпечують виділення максимальної кількості хімічної енергії, для синтезу комбінованих енергоджерел розрядно-імпульсних технологій на основі високовольтного електрохімічного вибуху дає змогу суттєво зменшивши енергозатрати за рахунок максимуму додаткової хімічної енергії, що виділяється в результаті екзотермічних реакцій в каналі розряду, та мінімізувати витрати екзотермічних сумішей при реалізації технологічних операцій з використанням високовольтного електрохімічного вибуху.

Ключові слова: високовольтний електрохімічний вибух; електровибухове перетворення енергії; питома електрична енергія; екзотермічна суміш; хімічна енергія; енергоджерело; розрядно-імпульсні технології.

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Розрядно-імпульсні технології (РІТ), в яких використовується високовольтний електричний розряд (ВЕР) у конденсованих середовищах як джерело концентрованої, дозованої дії з високими питомими енергетичними показниками, набули широкого застосування в різних галузях промисловості для обробки матеріалів та виробів (очищення виливків, штампування, запресування труб у теплообмінних апаратах, вплив на структуру металів у рідкому стані, інтенсифікація хімічних процесів та ін.) [1]. Ці технології характеризуються високою продуктивністю, простотою в реалізації, екологічністю та низькими енерговитратами. Але в деяких розрядно-імпульсних технологіях, таких як руйнування природних і штучних негабаритів; розпушування міцних донних ґрунтів; інтенсифікації процесів у водяних, нафтових і газових свердловинах (обробка призабійних зон свердловин); ущільнення й потовщення бурильних паль у будівництві [1, 2], виникає необхідність посилення енергетичного та силового впливу на об'єкти обробки. Тому останнім часом значна увага приділяється розробці наукових основ та практичному застосуванню РІТ на основі об'єднання традиційного високовольтного електричного розряду в рідині та вибуху хімічних конденсованих речовин. Такий варіант дозволяє значно посилити рівень силового й енергетичного впливу на об'єкт обробки при ідентичних, порівняно з високовольтним розрядом в рідині, витратах електроенергії, та зменшити вартість і габарити електророзрядного обладнання. Найбільш перспективним варіантом реалізації такого поєднання є застосування високовольтного електричного розряду в хімічно активних конденсованих середовищах, що не належать до вибухових речовин у традиційному розумінні, які здатні до екзотермічних перетворень у режимі вибухового горіння лише під дією високих температур та тисків, що розвиваються в електророзрядній плазмі каналу високовольтного розряду. При цьому як енергоджерело використовується ємнісний накопичувач у складі генератора імпульсних струмів (ГІС). Енергія, яка виділяється при протіканні екзотермічних реакцій, підсумовується з електричною енергією, яка надходить з ємнісного накопичувача ГІС, що істотно збільшує загальну енергію, яка виділилася в каналі розряду. Це комплексне фізико-хімічне явище названо високовольтним електрохімічним вибухом (ВЕХВ) [3]. У РІТ на основі ВЕХВ в якості хімічно активних конденсованих середовищ

застосовуються спеціально розроблені алюмінієвмісні водонаповнені екзотермічні суміші (ЕС) [3].

Для визначення умов, які забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії та максимальне виділення хімічної енергії ΔW_x в режимі вибухового горіння екзотермічної суміші в каналі високовольтного розряду, необхідно проведення експериментальних досліджень енергетичних характеристик ВЕХВ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний час при розробці РІТ на основі ВЕХВ [2, 3] остаточно значення енергетичних параметрів енергоджерела та необхідна маса екзотермічної суміші визначались при експериментальному налагодженні технологічних режимів, що призводило до завищених енергетичних витрат, значно значно ускладнювало процес впровадження цих технологій. Раніше проведені дослідження ВЕХВ [3] охоплювали незначний діапазон енергетичних параметрів, що не дозволяло зробити узагальнення. В даній роботі значно розширено обсяг проведених експериментів та діапазон зміни параметрів, так значення питомої електричної енергії змінювалось в діапазоні $(0,52-6,25) \cdot 10^6$ Дж/кг, що дає змогу визначити координати оптимальних режимів екзотермічного перетворення енергії при ВЕХВ.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення за результатами дослідження енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху (ВЕХВ) умов, що забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії та максимальне виділення хімічної енергії ΔW_x в режимі вибухового горіння екзотермічної суміші в каналі високовольтного розряду, які можуть бути використані при проектуванні енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій на основі ВЕХВ з метою підвищення їх енергоефективності.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Ефективність екзотермічного перетворення енергії при високовольтному імпульсному розряді в екзотермічному середовищі визначається повнотою згорання маси M екзотермічної суміші, тобто величиною додаткової хімічної (теплової) енергії ΔW_x , що виділяється в каналі високовольтного розряду в результаті її згорання. З метою визначення яким чином впливають енергетичні характеристики ВЕХВ на величину вивільненої додаткової хімічної

енергії ΔW_X були проведені експериментальні дослідження її залежності $\Delta W_X = f(M)$ від маси екзотермічної суміші M , введеної в зону розряду, при різних значеннях електричної енергії W_E , введеної в канал розряду, та її залежності від питомої електричної енергії $\Delta W_X = f(w_E)$. Ці дослідження дадуть змогу визначити умови забезпечення максимальної ефективності екзотермічного перетворення енергії, тому представляють практичний та науковий інтерес, враховуючи перспективи прикладного використання ВЕХВ у різних РІТ.

Експериментальні дослідження проводилися шляхом варіювання енергії W_E генератора імпульсних струмів з ємнісним накопичувачем енергії (ГІС), який використовується в якості енергоджерела, та маси ЕС M , що вводиться в зону розряду. Електрична енергія ГІС W_E визначалась за значеннями електричних характеристик $I(t)$ і $U(t)$. При проведенні експериментальних досліджень важливим методичним моментом було визначення енергії ΔW_X , що виділилася в каналі розряду за рахунок хімічних екзотермічних перетворень. Для визначення хімічної енергії ΔW_X застосовуємо методику, яка використовувалась раніше [4]. При високовольтному розряді в екзотермічному середовищі сумарна енергія складається з електричної енергії енергоджерела (ГІС) W_E і теплової хімічної енергії ΔW_X , що вивільняється при згоранні екзотермічної суміші в каналі високовольтного розряду. Сумарну енергію в каналі розряду можна визначити за значенням енергії W_n післярозрядної парогазової порожнини (ПГВ), яка формується у процесі розширення каналу розряду. Для розподілу загальної енергії на електричну W_E та хімічну ΔW_X складові використовуємо вираз:

$$\Delta W_X = W_n - \eta_n \cdot W_E, \quad (1)$$

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

Енергія післярозрядної парогазової порожнини W_n розраховувалась з використанням формули Вілліса по періоду її пульсації T_n [3]:

$$T_n = \frac{1,14 \rho^{\frac{1}{2}} W_n^{\frac{1}{3}}}{P_0^{\frac{5}{6}}}, \quad (2)$$

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

Кількість виділеної енергії в ПГП W_n визначалась за періодом пульсацій ПГП T_n , тобто за інтервалом часу між піками тиску. Тиск в конденсованому 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 [3]:

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

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

Експериментальні дослідження проводили з використанням екзотермічної суміші з 60% вмістом алюмінію, так як, відповідно до даних роботи [3], цей склад найбільш ефективний з точки зору додаткового енерговиділення хімічної енергії.

Процеси пробою та виділення енергії в каналі розряду носять стохастичний характер [5], тому для збільшення ступеня достовірності число дослідів в серії експериментів, що характеризуються фіксованими умовами проведення, вибиралось в залежності від розкиду реєстрованих параметрів розряду. Мінімальне значення було вибрано рівним п'яти. За отриманими вибірками обчислювалися оцінки середніх значень:

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

В експериментах маса ЕС M варіювалась в діапазоні $(0,1 - 0,6) \cdot 10^{-3}$ кг. Енергія ГІС W_E змінювалась в інтервалі від 300 Дж до 625 Дж шляхом варіювання ємності батареї конденсаторів C в діапазоні $(1,0 - 2,0) \cdot 10^{-6}$ Ф, величина зарядної напруги U_0 при цьому залишалась постійною, та дорівнювала $U_0 = 25 \cdot 10^3$ В, що обумовлено необхідністю підтримки постійної напруженості електричного поля для забезпечення пробою ЕС. Величина питомої електричної енергії змінювалась в широкому діапазоні $(0,52 - 6,25) \cdot 10^6$ Дж/кг.

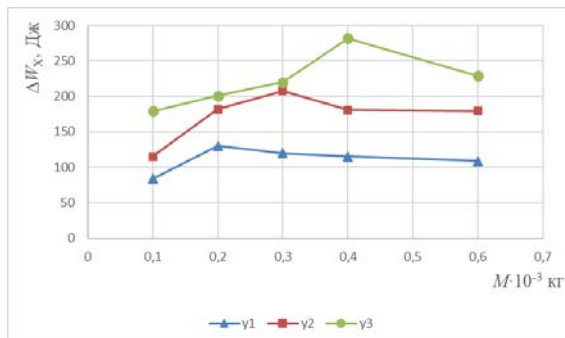
Експериментальні дані та результати розрахунків величини додаткової хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, наведено в таблиці 1.

Результати експериментальних досліджень залежності величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові дані

W_E , Дж	$M \cdot 10^{-3}$, кг	T_n , мс	W_n , Дж	η_n , Дж	ΔW_X , Дж	$w_E \cdot 10^6$, Дж/кг
312,5	0,1	13,00	138,3	54,3	84,0	3,13
312,5	0,2	13,78	180,0	50,0	130,0	1,56
312,5	0,3	13,89	183,7	54,0	120,0	1,04
312,5	0,4	13,74	175,1	60,1	115,0	0,78
312,5	0,6	13,43	163,5	54,5	109,0	0,52
450	0,1	13,92	182,1	67,1	115,0	4,50
450	0,2	15,05	249,5	67,5	182,0	2,25
450	0,3	15,98	275,4	67,4	208,0	1,50
450	0,4	15,45	248,9	68,9	181,0	1,13
450	0,6	15,40	246,5	67,5	179,0	0,75
625	0,1	15,18	236,1	57,1	179,0	6,25
625	0,2	15,65	258,7	57,7	201,0	3,12
625	0,3	15,92	277,3	57,3	220,0	2,08
625	0,4	17,15	340,5	58,5	282,0	1,56
625	0,6	16,28	291,2	62,2	229,0	1,04

перетворень, від маси екзотермічної суміші M , що вводиться в розрядний проміжок, $\Delta W_X = f(M)$ для різних значень електричної енергії ГПС W_E представлені у вигляді точкової діаграми на рис. 1.



$y_1 - W_E = 312,5$ Дж; $y_2 - W_E = 450$ Дж; $y_3 - W_E = 625$ Дж

Рис. 1. Залежність $\Delta W_X = f(M)$ величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ, від маси екзотермічної суміші M для різних значень електричної енергії ГПС W_E

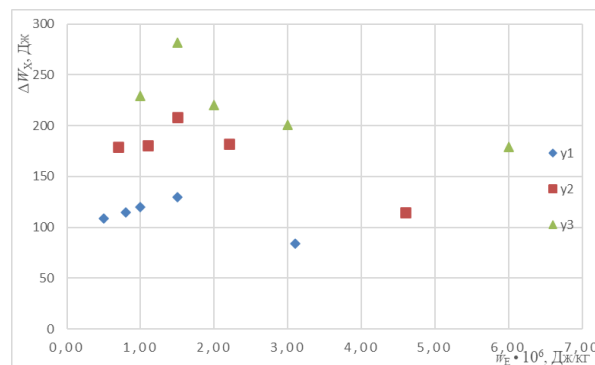
Аналіз отриманих експериментальних результатів показує, що для фіксованих значень електричної енергії ГПС W_E , що вводиться в канал розряду, спостерігається максимум хімічної енергії ΔW_X , яка виділяється в каналі розряду за рахунок екзотермічних реакцій. Причому зі зростанням енергії ГПС W_E максимум хімічної енергії ΔW_X зрушується у бік більших значень мас. Так, максимум залежності $\Delta W_X = f(M)$ спостерігається відповідно для $W_E = 312,5$ Дж при масі ЕС $M = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг, для $W_E = 450,0$ Дж при масі ЕС $M = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кг, для $W_E = 625$ Дж при масі ЕС $M = 0,4 \cdot 10^{-3}$ кг. Це пояснюється тим, що при фіксованій величині енергії ГПС W_E та значному збільшенні маси ЕС M зменшується питома електрична енергія, що призводить до згасання екзотермічної реакції та зменшенню кількості виділеної хімічної енергії.

З наведених результатів випливає, що для кожного фіксованого значення енергії ГПС W_E існує оптимальна величина маси ЕС M , при якій енергія, що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних хімічних перетворень ΔW_X , максимальна. При цьому величина питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$, введеної в канал розряду на одиницю маси ЕС, приблизно однакова, та лежить в межах $(1,50 - 1,56) \cdot 10^6$ Дж/кг.

Результати експериментальних досліджень залежності величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, від питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$, введеної в канал розряду, $\Delta W_X = f(w_E)$ для різних значень електричної енергії ГПС W_E представлені у вигляді точкової діаграми на рис. 2.

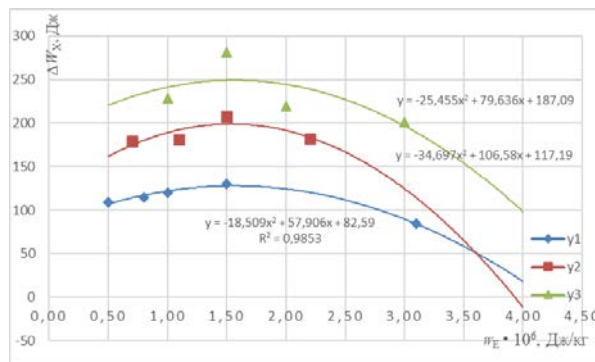
Аналіз розташування експериментальних точок на точковій діаграмі залежностей $\Delta W_X = f(w_E)$ при різних значеннях електричної енергії W_E (рис. 2) показує, що в певній зоні координат існують максимуми

функцій. Для більш детального аналізу та визначення координат максимумів проведено апроксимацію цих залежностей в діапазоні координат ймовірних максимумів $w_E = (0,5 - 4,0) \cdot 10^6$ Дж/кг поліноміальною функцією другого ступеня за допомогою стандартної функції – лінії тренда програмного забезпечення Microsoft Excel (Рис. 3).



$y_1 - W_E = 312,5$ Дж; $y_2 - W_E = 450$ Дж; $y_3 - W_E = 625$ Дж

Рис. 2. Залежності $\Delta W_X = f(w_E)$ величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ, від питомої електричної енергії w_E для різних значень електричної енергії ГПС W_E



$y_1 - W_E = 312,5$ Дж; $y_2 - W_E = 450$ Дж; $y_3 - W_E = 625$ Дж

Рис. 3. Апроксимація залежностей $\Delta W_X = f(w_E)$ величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ, від питомої електричної енергії w_E для різних значень електричної енергії ГПС W_E

Дослідження функцій апроксимації залежностей $\Delta W_X = f(w_E)$ (див. рис. 3) на екстремум дозволило визначити координати максимумів ($w_{E1} = 1,564 \cdot 10^6$ Дж/кг, $w_{E2} = 1,536 \cdot 10^6$ Дж/кг, $w_{E3} = 1,564 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Аналізуючи результати експериментальних досліджень, які представлені на рисунках 2, 3, можна констатувати, що зі зростанням енергії ГПС збільшується додаткова енергія, яка виділяється в каналі ВЕХВ за рахунок хімічних екзотермічних перетворень, при цьому екстремуми функцій $\Delta W_X = f(w_E)$ для різних значень енергії ГПС W_E спостерігаються приблизно при одному і тому ж значенні питомої енергії, а саме $w_{Еонт} \approx 1,55 \cdot 10^6$ Дж/кг. Тобто для отримання

максимального значення додаткової хімічної енергії ΔW_x за рахунок екзотермічних перетворень ЕС в канал високовольтного розряду необхідно забезпечувати оптимальне значення питомої електричної енергії $w_{\text{Еонт}}$ що вводиться в канал розряду.

ВИСНОВКИ

За результатами аналізу отриманих експериментальних даних при дослідженні енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху можна дійти висновку, що у дослідженому діапазоні змін параметрів, спостерігаються наступні закономірності:

– при варіюванні маси ЕС M та фіксованій енергії ГІС W_E спостерігається максимум хімічної енергії ΔW_x , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, який зростає зі збільшенням введеної електричної енергії W_E , накопиченої в ГІС. Причому зі зростанням енергії ГІС максимум хімічної енергії ΔW_x зсувається у бік більших значень мас ЕС M ;

– для кожного фіксованого значення електричної енергії ГІС W_E , введеної в канал розряду, існує оптимальна величина маси ЕС M , при якій виділена хімічна енергія ΔW_x досягає максимальних значень;

– максимум додаткової хімічної енергії ΔW_x , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, забезпечується при оптимальному значенні питомої електричної енергії, введеної в канал розряду, $w_{\text{Еонт}} \approx 1,55 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Використання визначених за результатами експериментальних досліджень ВЕХВ умов забезпечення виділення максимальної кількості додаткової хімічної енергії при синтезі комбінованих енергоджерел на основі ВЕХВ для розрядно-імпульсних технологій дасть змогу заощаджувати електроенергію, суттєво зменшивши енергозатрати за рахунок додавання максимально можливої величини хімічної енергії, що виділилась в результаті екзотермічних реакцій, та мінімізувати витрати екзотермічних сумішей при реалізації технологічних операцій з використанням високовольтного електрохімічного вибуху.

REFERENCES

- [1] Hulyi, H.A. (1990). *Nauchni osnovy rozriadnoimpul'snykh tekhnologiy* [Scientific foundations of discharge-pulse technologies]. K: *Naukova dumka*. [in Ukrainian].
- [2] Rizun, A.R., Holen, Yu.V., Denysiuk, T.D., Mushtatnyi, H.P. (2008). Impul'sni elektrorozriadni tekhnologiyi v budivnytstvi [Impulse electric discharge technologies in construction]. *Budivnytstvo Ukrainy*, no.10, pp. 39 – 43. [in Ukrainian].
- [3] Vovchenko, O. I., Posokhov, A. A. (1992). *Kerovani elektrovibukhovyi protsesy peretvorennia enerhii v kondensovanykh seredovishchakh* [Controlled electroexplosive processes of energy conversion in condensed media]. K.: *Nauk. Dumka*. [in Ukrainian].
- [4] Vovchenko, O. I., Demydenko, L. Yu., Kozyriyev, S. S. (2021) Vyznachennia pochatkovykh umov alhorytmu keruvannia rezhymom vysokovoltного impulsного rozriadu v ekzotermichnomu seredovishchi [Determination of the initial conditions of the high-voltage impulse discharge mode control algorithm in an exothermic environment]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiralа Makarova*, no. 1 (484), pp. 61-67. Retrieved from: [https://doi.org/10.15589/znp2021.1\(484\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).8). [in Ukrainian].
- [5] Kozyrev S., Nazarova N., Vinnychenko D. (2018). Adaptive Filter of Input Information Signal for Discharge Pulse Installation Control System. *Conference proceedings IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 343–346. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8559558>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Гулий, Г.А. (1990). *Научні основи розрядноімпульсних технологій*. К: Наукова думка.
- [2] Різун, А. Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатний, Г.П. (2008). Імпульсні електророзрядні технології в будівництві. *Будівництво України*, 10, 39 – 43.
- [3] Вовченко, О. І., Посохов, А. А. (1992). *Керовані електровибухові процеси перетворення енергії в конденсованих середовищах*. К.: Наук. Думка.
- [4] Вовченко, О. І., Демиденко, Л. Ю., Козирев, С. С. (2021) Визначення початкових умов алгоритму керування режимом високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 1 (484), 61-67. URL: [https://doi.org/10.15589/znp2021.1\(484\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).8).
- [5] Kozyrev S., Nazarova N., Vinnychenko D. (2018). Adaptive Filter of Input Information Signal for Discharge Pulse Installation Control System. *Conference proceedings IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 343–346. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8559558>.

© Козирев С. С.

Дата надходження статті до редакції: 25.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 15.07.2024