



Serhii S. Kozyrev
Козирев Сергій
Сергійович

УДК 537.528+621.3.011.74

RESEARCH OF THE POWER CHARACTERISTICS OF A HIGH-VOLTAGE ELECTROCHEMICAL EXPLOSION IN A CONDENSED MEDIUM

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ВИБУХУ В КОНДЕНСОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.2\(19\).03](https://doi.org/10.15589/smi2024.2(19).03)

Serhii S. Kozyrev

Козирев Сергій Сергійович,
канд. техн. наук, доц.
skozyrev@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8995-131X.

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 purpose* of the work is to research the dependence of the force effect of a high-voltage electrochemical explosion in a condensed medium on the energy characteristics and to determine the conditions for ensuring the maximum force effect on the object of processing when designing discharge-pulse technologies based on the use of a high-voltage electrochemical explosion, which are used for the destruction of strong rocks at carrying out works on the reconstruction of existing port facilities and the construction of new terminals for handling transport vessels of increased tonnage. *Method.* When studying the power characteristics of a high-voltage electrochemical explosion, methods of diagnosing electrophysical processes in the discharge channel were used. The estimation of chemical energy was carried out using the developed method of experimental determination of the amount of chemical energy released due to exothermic transformations in the discharge channel. *The results.* The dependence of the amplitude and impulse of the generated pressure wave on the energy characteristics of the high-voltage electrochemical explosion, such as the electric energy of the energy source, the mass of the exothermic mixture, and the specific electric energy, was studied. The significant influence of the specific electrical energy introduced into the discharge channel on the processes of exothermic energy conversion and the mechanisms of pressure pulse generation in the condensed medium was revealed. The conditions that ensure the maximum force impact on the processing object are determined. *Scientific novelty.* The conducted research extended and deepened the development of the theory of electro-explosive energy conversion, made it possible to establish the optimal value of the specific electrical energy, which ensures the generation of the maximum pressure pulse during a high-voltage electrochemical explosion in a condensed medium. *Practical significance.* The use of the determined optimal value of the specific electric energy in the synthesis of combined energy sources for discharge-pulse technologies based on high-voltage electrochemical explosion will make it possible to generate the maximum pressure pulse for power action on the processing object, which will significantly increase the productivity of discharge-pulse technologies used for dredging during the construction and recon-

struction of sea and river ports, various hydrotechnical structures, terminals for handling transport vessels of increased displacement, which will ensure an increase in the volume of sea transportation.

Key words: high-voltage electrochemical explosion; specific electrical energy; energy source; discharge-pulse technologies; dredging works; port facilities.

Анотація. Мета роботи – дослідження залежності силового впливу високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі від енергетичних характеристик та визначення умов забезпечення максимального силового впливу на об'єкт обробки при проектуванні розрядно-імпульсних технологій на основі використання високовольтного електрохімічного вибуху, що застосовуються для руйнування міцних порід при проведенні робіт з реконструкції існуючих портових споруд та будівництві нових терміналів для обробки транспортних суден підвищеної водотоннажності. **Методика.** При дослідженні силових характеристик високовольтного електрохімічного вибуху використано методи діагностики електрофізичних процесів в каналі розряду. Оцінка хімічної енергії проводилась за допомогою розробленої методики експериментального визначення кількості хімічної енергії, яка виділилась за рахунок екзотермічних перетворень в каналі розряду. **Результати.** Досліджено залежність амплітуди та імпульсу генерованої хвилі тиску від енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху, таких як електрична енергія енергоджерела, маса екзотермічної суміші, питома електрична енергія. Виявлено суттєвий вплив питомої електричної енергії, введеної в канал розряду, на процеси екзотермічного перетворення енергії та механізми генерування імпульсу тиску в конденсованому середовищі. **Наукова новизна.** Проведені дослідження поглибили розвиток теорії електровибухового перетворення енергії, дали змогу встановити оптимальне значення питомої електричної енергії, що забезпечує генерування максимального імпульсу тиску при високовольтному електрохімічному вибуху в конденсованому середовищі. **Практична значимість.** Використання визначеного оптимального значення питомої електричної енергії при синтезі комбінованих енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій на основі високовольтного електрохімічного вибуху дасть змогу генерувати максимальний імпульс тиску для силового впливу на об'єкт обробки, що значно підвищить продуктивність розрядно-імпульсних технологій, які використовуються для днопоглиблювальних робіт при будівництві й реконструкції морських та річкових портів, різноманітних гідротехнічних споруд, терміналів для обробки транспортних суден підвищеної водотоннажності, що забезпечить збільшення обсягів морських перевезень.

Ключові слова: високовольтний електрохімічний вибух; питома електрична енергія; енергоджерело, розрядно-імпульсні технології; днопоглиблювальні роботи; портові споруди.

References

- [1] Hulyi, H.A. (1990). *Nauchni osnovy rozriadnoimpulsnykh tekhnologii* [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). Impulsni elektrorozriadni tekhnologii v budivnytstvi [Impulse electric discharge technologies in construction]. *Budivnytstvo Ukrainy*, no.10, pp. 39–43. [in Ukrainian].
- [3] Denysiuk, T., Rachkov, O., & Starkov, I. (2023). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti pererobky vidk-hodiv zbahachennia rud elektrorozriadnym metodom [Increasing the energy efficiency of waste processing of ore beneficiation using the electric discharge method]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, 4(18), 98–105. Retrieved from: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.04.14> [in Ukrainian].
- [4] Khvoshchan, O.V., & Smirnov, O.P. (2022). Zalezhnist enerhetychnykh protsesiv vysokovoltnykh elektrorozriadnykh sverdlovynnykh kompleksiv “Skif” vid kharakterystyk navantazhennia [Dependence of energy processes of high-voltage electric discharge well complexes “Skif” on load characteristics]. *Tekhnichna elektrodynamika*, № 1, 58–66. Retrieved from: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058> [in Ukrainian].
- [5] Vovchenko, O. I., & Posokhov, A. A. (1992). *Kerovani elektroybyukhovi protsesy peretvorennia enerhii v kondensovanykh seredovyshchakh* [Controlled electroexplosive processes of energy conversion in condensed media]. K.: Nauk. Dumka. [in Ukrainian].

- [6] Vovchenko, O. I., Demydenko, L. Yu., Kozyriev, S. S., & Ovchynnikova, L. E. (2022). High Voltage Electrochemical Explosion in Discharge-Pulse Technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 58, No. 6, P. 731–738. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.3103/S106837552206014X>
- [7] Kompleks dlia elektrohidroimpulsnoho ruinuвання mitsnykh monolitnykh ob'ektiv pid vodoiu [Complex for electro-hydropulse destruction of strong monolithic objects under water]. Pat. 76299 Ukraina: MPK6 E21C37/18, E21C50/00. № 20040806566; zaiavl. 05.08.2004; opubl. 17.07.2006, Biul. № 7/2006. 3 s. [in Ukrainian]. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/389033/>
- [8] 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*, Vol. 44, No. 3, P. 240. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375508030125>.
- [9] 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*, Vol. 43, No. 2, P. 116. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375507020093>.
- [10] Kozyriev, S.S. (2024). Doslidzhennia enerhetychnykh kharakterystyk vysokovoltного електрохімічного вибуху [Research of the energy characteristics of a high-voltage electrochemical explosion]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiralа Makarova*, № 3 (496), 75–79. Retrieved from: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).11](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).11) [in Ukrainian].
- [11] Vovchenko, O. I., Demydenko, L. Yu., Blashchenko, O. D., & Starkov, I. M. (2019). Pidvyschennia efektyvnosti vysokovoltnykh elektrorozriadnykh ustanovok, shcho vykorystovuiut ekzotermichni dyspersni seredovyscha [Increasing the efficiency of high-voltage electric discharge installations using exothermic dispersed media]. *Tekhnichna elektrodynamika*, № 5, 77–82. [in Ukrainian]. Retrieved from: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/544>
- [12] Vovchenko, A.I., Demidenko, L.Y., Blashchenko, A.D., & Starkov, I.N. (2023). Factors Affecting the Energy Efficiency of Exothermic Transformations during a Controlled High-Voltage Electrochemical Explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 59, P. 140–147. Retrieved from: <https://doi.org/10.3103/S1068375523020175>

Постанова задачі. Розрядно-імпульсні технології (РІТ), які ґрунтуються на використанні високовольтного імпульсного електричного розряду в конденсованому середовищі як джерела концентрованої дії з високими питомими енергетичними показниками, поширені в різних галузях промисловості для руйнування та диспергування неметалічних матеріалів, деформування металів, інтенсифікації процесів у водних та нафтових свердловинах, у тому числі у суднобудуванні для штампування великогабаритних деталей корпусів суден, а також для очищення корпусів суден від продуктів корозії, обростань водоростями та морськими організмами [1 – 4].

Особливо важливою сферою використання таких РІТ є роботи з реконструкції існуючих портових споруд та будівництва нових терміналів для обробки транспортних суден підвищеної водотоннажності з метою збільшення обсягів морських перевезень.

Вирішення цих завдань пов'язане з великими обсягами як гідротехнічних робіт (днопоглиблення, руйнування фундаментів причальних та інших споруд), так і робіт з руйнування скельних масивів берегової зони для підготовки будівельних майданчиків наземних споруд. Традиційні методи руйнування міцних ґрунтів під водою – механічне розпушування та руйнування з використанням вибухових речовин мають значні недоліки. Застосування механічного розпушування для порід підвищеної та високої міцності (осадових та скельних порід) малоефективне, а в більшості випадків просто неможливе. Підводне руйнування з використанням вибухових речовин при виконанні днопоглиблювальних робіт має суттєві обмеження в застосуванні поблизу гідротехнічних та берегових споруд, у місцях прокладання кабелів, трубопроводів. Під час вибухів також можливе масове знищення фауни. Крім того для забезпечення

підводних підризних робіт необхідне виконання великого обсягу організаційних заходів та водолазних робіт. Все це обумовлює необхідність використання нових, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій, до яких відносяться розрядно-імпульсні технології на основі імпульсного високовольтного розряду в конденсованому середовищі [1].

З метою підвищення силового впливу на об'єкти обробки, чого вимагає застосування РІТ для руйнування міцних ґрунтів та скельних порід, перспективним є використання високовольтного електрохімічного вибуху (ВЕХВ) в конденсованому середовищі як комбінованого енергоджерела, яке дає можливість посилити рівень силового та енергетичного впливу на об'єкт обробки без підвищення енергоспоживання й без збільшення вартості електрообладнання. Реалізується така РІТ на основі ВЕХВ шляхом введення в плазмовий підводний канал високовольтного електричного розряду (ВЕР) екзотермічних сумішей (ЕС), хімічне перетворення яких відбувається в режимі вибухового горіння під дією високих температур і тисків в каналі розряду, та значно, в декілька разів, збільшує виділену інтегральну енергію. В якості хімічно активних конденсованих середовищ застосовуються спеціально розроблені алюмінієвмісні водонаповнені екзотермічні суміші, які не відносяться до вибухових речовин, не потребують спеціальних заходів захисту та не забруднюють навколишнє середовище. Виділена енергія в такому випадку складається з електричної енергії, накопиченої на обкладинках конденсаторних батарей генератора імпульсних струмів (ГІС), та хімічної енергії, яка вивільняється при екзотермічних перетвореннях хімічно активного середовища, що значно підвищує ефективність технологічного впливу на об'єкт обробки при ідентичних, порівняно з високовольтним розрядом в рідині, витратах електроенергії [5, 6].

Важливим при технологічному використанні високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі для руйнування міцних ґрунтів та скельних по-

рід є забезпечення максимального силового впливу на об'єкт обробки, що потребує поглибленого дослідження характеристик хвиль тиску, генерованих ВЕХВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. РІТ на основі ВЕХВ показала ефективність при використанні для руйнування донних порід практично будь-якої міцності. Вона дає унікальну можливість виконувати роботи на діючих акваторіях портів у безпосередній близькості від причалів і суден, що дозволяє суттєво спростити організацію проведення днопоглиблювальних робіт, зменшити витрати на будівництво та реконструкцію морських та річкових портів, різноманітних гідротехнічних споруд [7]. Все це підтверджує актуальність досліджень ВЕХВ з метою підвищення ефективності силового впливу на об'єкти обробки, що дозволить збільшити продуктивність даних РІТ на основі ВЕХВ.

На даний час при розробці РІТ на основі високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі остаточні значення параметрів силового впливу на об'єкт обробки зазвичай визначаються при експериментальному налагоджуванні технологічних режимів, що значно ускладнює процес впровадження цих технологій [8, 9]. Тому виникає необхідність дослідження силових параметрів ВЕХВ з метою забезпечення на етапі проєктування технологічних режимів з максимально можливим силовим впливом на об'єкт обробки. В роботах [10 – 12] розглядаються енергетичні характеристики ВЕХВ та шляхи підвищення ефективності високовольтних електророзрядних установок з точки зору енергоспоживання без дослідження силових впливів на об'єкти обробки.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Раніше проведені дослідження охоплювали незначний діапазон енергетичних параметрів ВЕХВ, що не дозволяло зробити узагальнення [3, 5, 8]. Результати дослідження енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі [6, 10, 11, 12] дають можливість оптимізувати параметри енергоджерела, але не

дозволяють оцінити просторово-часову силову дію на об'єкти обробки.

Для забезпечення технологічних вимог щодо силового впливу на об'єкти обробки необхідне проведення досліджень залежності функцій силового впливу від енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху.

Мета дослідження. Метою роботи є проведення цільових досліджень залежності функцій силового впливу ВЕХВ у певних точках хвильової зони технологічного об'єму, заданих технологічними потребами, від енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі. А також за результатами проведених досліджень визначення умов забезпечення максимального силового впливу на об'єкт обробки, які можуть бути використані при проектуванні комбінованих енергоджерел для РІТ на основі ВЕХВ, що використовуються при проведенні робіт з реконструкції існуючих портових споруд та будівництва нових терміналів для обробки транспортних суден підвищеної водотоннажності, з метою підвищення їх ефективності.

Основний матеріал. Силовий вплив на об'єкт обробки забезпечується хвилею тиску $P(t)$, що розповсюджується в робочому середовищі. В процесі експерименту досліджувалась хвиля тиску $P(t)$, що поширюється в конденсованому середовищі, в точці на відстані 0,3 м в екваторіальній площині

по відношенню до каналу розряду, при цьому аналізувалися наступні параметри хвилі тиску:

– амплітуда хвилі тиску, $P_{\max}$, Па;

– імпульс хвилі тиску J , Па·с, який визначався за виразом:

$$J = \int_0^{\tau} P(t) dt$$

Експериментальні дослідження силового впливу високовольтного електрохімічного вибуху на об'єкт обробки, який забезпечується хвилею тиску $P(t)$, що розповсюджується в робочому середовищі, проводилися у відкритому об'ємі, заповненому водою, шляхом варіювання W_E енергії генератора імпульсних струмів з ємнісним накопичувачем (ГІТ) і маси екзотермічної суміші M , що вводиться в зону розряду. Електрична енергія ГІТ W_E визначалася за значеннями електричних характеристик $I(t)$ та $U(t)$ в процесі розряду. При проведенні експериментальних досліджень визначення енергії ΔW_x , що виділилася в каналі розряду за рахунок хімічних екзотермічних перетворень, проводилось за розробленою для цього методикою, наведеною в [3]. Тиск в конденсованому середовищі $P(t)$ вимірювали за допомогою п'єзокерамічного датчика тиску і фіксували на запам'ятовуючому осцилографі TDS 2024B. Результати експериментальних досліджень наведено у таблиці.

Результати експериментальних досліджень залежності $P_{\max} = f(M)$ амплітуди хви-

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові дані

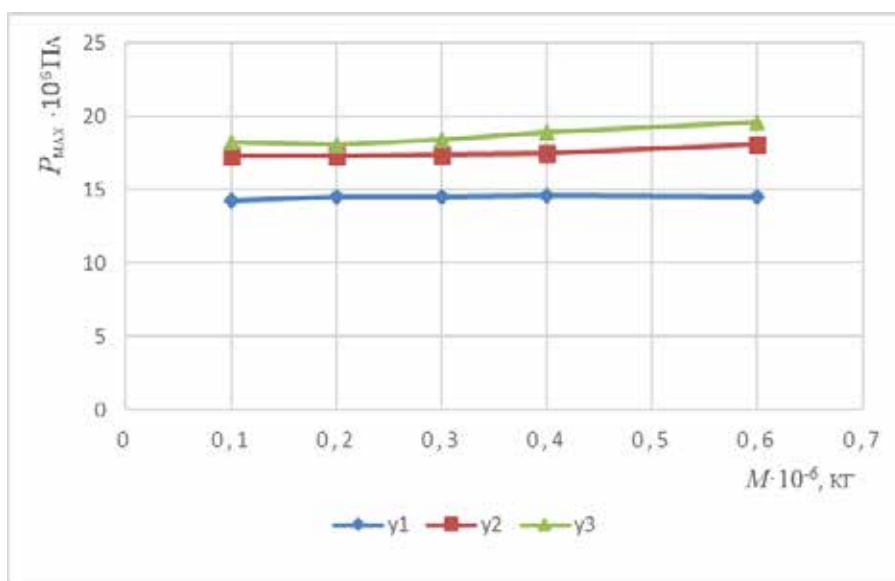
W_E , Дж	$M \cdot 10^{-6}$, кг	$P_{\max}$, МПа	J , Па·с	ΔW_x , Дж	$w_E \cdot 10^6$, Дж/кг
312,5	0,1	14,3	170,0	84,0	3,13
312,5	0,2	14,5	250,8	130,0	1,56
312,5	0,3	14,5	243,5	120,0	1,04
312,5	0,4	14,6	221,9	115,0	0,78
312,5	0,6	14,5	210,3	109,0	0,52
450	0,1	17,3	230,9	115,0	4,50
450	0,2	17,3	250,2	182,0	2,25
450	0,3	17,4	274,6	208,0	1,50
450	0,4	17,5	260,1	181,0	1,13
450	0,6	18,1	250,1	179,0	0,75
625	0,1	18,2	250,0	179,0	6,25
625	0,2	18,1	266,7	201,0	3,12
625	0,3	18,4	310,2	220,0	2,08
625	0,4	18,9	349,4	282,0	1,56
625	0,6	19,6	305,0	229,0	1,04

лі тиску $P_{\max}$, генерованої високовольтним електрохімічним вибухом в конденсованому середовищі від маси екзотермічної суміші M , введеної в зону розряду, при різних значеннях енергії ГІТ W_E представлені у вигляді точкової діаграми на рисунку 1.

Аналіз залежності $P_{\max}=f(M)$ при різних значеннях енергії ГІТ W_E показав, що амплітуда тиску при підвищенні енергії ГІТ у дослідженому діапазоні збільшується. Але при незмінній величині енергії ГІТ амплітуда тиску практично не залежить від маси екзотермічної суміші M .

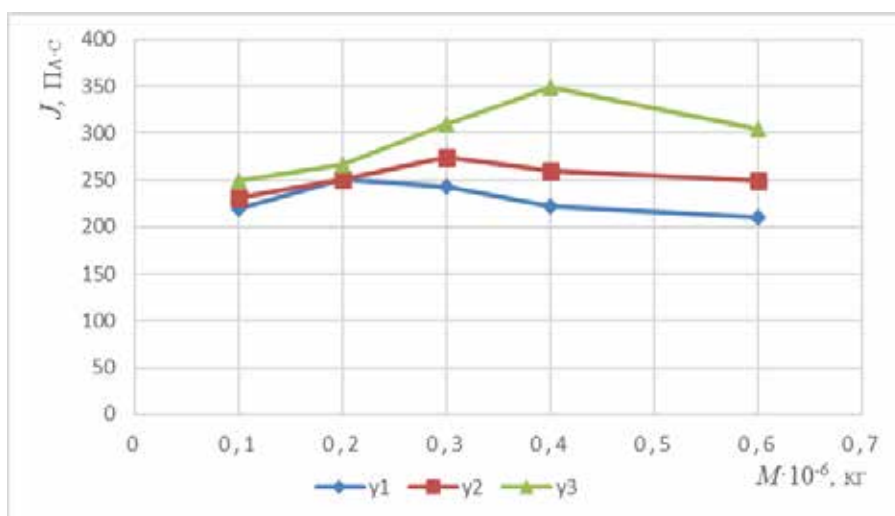
Результати експериментальних досліджень залежності $J=f(M)$ імпульсу хвилі тиску J , генерованої високовольтним електрохімічним вибухом у конденсованому середовищі від маси екзотермічної суміші M , введеної в зону розряду, при різних значеннях енергії ГІТ W_E представлені у вигляді точкової діаграми на рисунку 2.

Аналіз залежності $J=f(M)$ при різних значеннях енергії ГІТ W_E показав, що з підвищенні енергії ГІТ спостерігається зростання імпульсу тиску. При варіюванні маси екзотермічної суміші та фіксованій енергії ГІТ



$y1 - W_E = 312,5 \text{ Дж}; y2 - W_E = 450 \text{ Дж}; y3 - W_E = 625 \text{ Дж}$

Рис. 1. Залежність $P_{\max}=f(M)$ при різних значеннях енергії ГІТ W_E



$y1 - W_E = 312,5 \text{ Дж}; y2 - W_E = 450 \text{ Дж}; y3 - W_E = 625 \text{ Дж}$

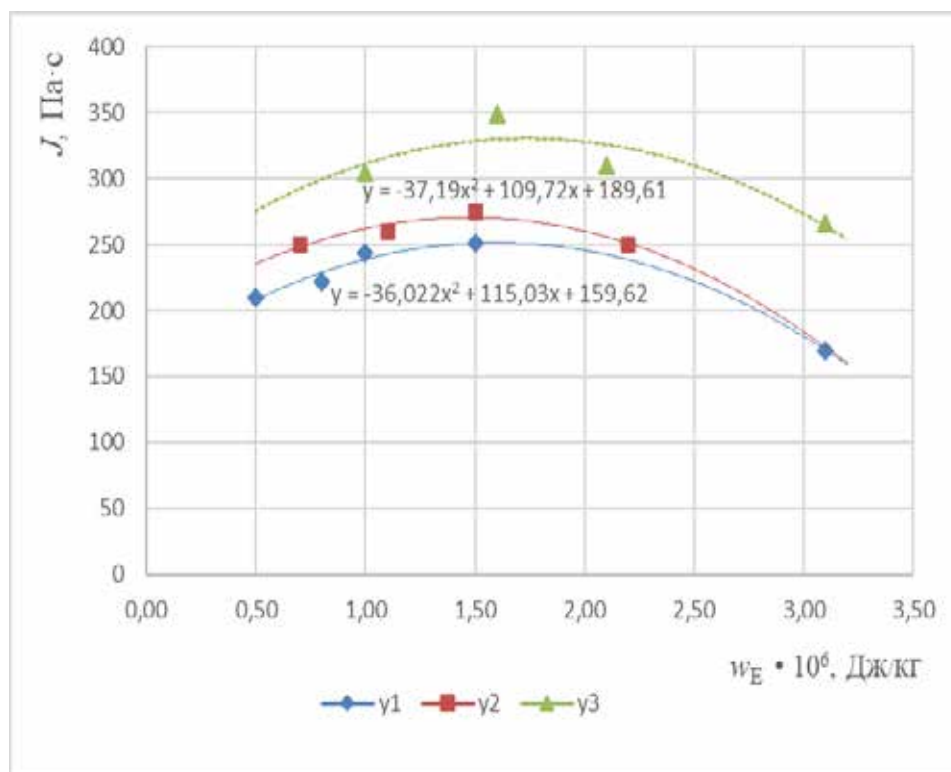
Рис. 2. Залежність $J=f(M)$ при різних значеннях енергії ГІТ W_E

залежності $J=f(M)$ мають екстремум, який зміщується у бік більших значень мас при підвищенні енергії ГІТ. Імпульс тиску J , який поширюється у рідині на стадії інтенсивного розширення каналу розряду, є інтегральною характеристикою впливу на об'єкт обробки і тому корелює з енергетичними характеристиками, зокрема з кількістю додатково виділеної хімічної енергії ΔW_x .

Результати експериментальних досліджень залежності $J=f(w_E)$ імпульсу хвилі тиску J , генерованої високовольтним електрохімічним вибухом у конденсованому середовищі, від питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$, введеної в канал розряду, для різних значень електричної енергії ГІТ W_E представлені у вигляді точкової діаграми на рисунку 3.

Аналіз залежностей $J=f(w_E)$ імпульсу хвилі тиску J від питомої електричної енергії w_E при різних значеннях електричної енергії W_E показує, що у певній зоні значень координат існують максимуми функцій. Для визначення координат максимумів проведено апроксимацію цих залежностей

у діапазоні координат $w_E = (0,5-4,0) \cdot 10^6$ Дж/кг, де ймовірно знаходяться максимуми, поліноміальними функціями другого ступеня за допомогою стандартної функції – лінії тренду програмного забезпечення Microsoft Excel (рис. 3). Дослідження функцій апроксимації залежностей $J=f(w_E)$ на екстремум дозволило визначити координати максимумів функцій $J=f(w_E)$ при різних значеннях електричної енергії W_E . Зі зростанням енергії ГІТ W_E збільшується імпульс тиску в рідині J , а максимуми функцій $J=f(w_E)$ при різних значеннях електричної енергії W_E спостерігаються приблизно при одному і тому ж значенні питомої електричної енергії $w_E \approx (1,50 \pm 0,05) \cdot 10^6$ Дж/кг. Це підтверджує визначальне значення питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$, що вводиться в канал розряду, для процесів екзотермічних реакцій в каналі розряду, що забезпечують виділення додаткової хімічної енергії ΔW_x , а також має визначальне значення для формування інтегрального силового впливу на об'єкт обробки у вигляді імпульсу тиску J .



$$y_1 - W_E = 312,5 \text{ Дж}; y_2 - W_E = 450 \text{ Дж}; y_3 - W_E = 625 \text{ Дж}$$

Рис. 3. Залежність $J=f(w_E)$ при різних значеннях енергії ГІТ W_E

Обговорення отриманих результатів.

Проведений аналіз результатів експериментальних досліджень силових характеристик високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі показав, що у дослідженому діапазоні змін параметрів спостерігаються такі закономірності:

- амплітуда хвилі тиску $P_{\max}$, генерованої високовольтним електрохімічним вибухом у конденсованому середовищі, визначається електричною енергією W_E , що вводиться в канал розряду, і не залежить від маси екзотермічної суміші M ;

- залежності $J=f(w_E)$ імпульсу хвилі тиску J від питомої електричної енергії $w_E=W_E/M$ (введена в канал розряду електрична енергія на одиницю маси екзотермічної суміші) при фіксованих значеннях електричної енергії W_E мають максимум, причому максимумами спостерігаються при одному і тому ж значенні питомої електричної енергії $w_E \approx (1,50 \pm 0,05) \cdot 10^6$ Дж/кг.

Порівняльний аналіз залежностей $\Delta W_X=f(w_E)$, отриманих в [10], та залежностей $J=f(w_E)$, отриманих в даному дослідженні, показує, що вони якісно схожі. Зі зростанням енергії ГТ збільшується як додаткова енергія ΔW_X , що виділилася в каналі розряду за рахунок хімічних екзотермічних реакцій, так і імпульс тиску в рідині J . При цьому екстремуми функцій $\Delta W_X=f(w_E)$ та $J=f(w_E)$ для різних значень електричної енергії W_E в дослідженому діапазоні її зміни спостерігаються приблизно при тому самому значенні питомої електричної енергії, а саме $w_E \approx (1,5 \pm 0,05) \cdot 10^6$ Дж/кг. Це пояснюється тим, що імпульс тиску J , який поширюється в рідині на стадії інтенсивного розширення каналу розряду, є інтегральною характеристикою силового впливу на об'єкт обробки і тому корелює з енергетичними характерис-

тиками, зокрема, з кількістю додатково виділеної хімічної енергії ΔW_X в каналі розряду.

Висновки. За результатами аналізу досліджень силових характеристик високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі виявлено суттєвий вплив питомої електричної енергії $w_E=W_E/M$, введеної в канал розряду, на процеси екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду, а також на процеси генерування імпульсу тиску J в конденсованому середовищі. Встановлено оптимальне значення питомої електричної енергії $w_E \approx (1,50 \pm 0,05) \cdot 10^6$ Дж/кг, що забезпечує генерування максимального імпульсу тиску J , Па·с при високовольтному електрохімічному вибуху в конденсованому середовищі.

Використання оптимального значення питомої електричної енергії, отриманого за результатами проведених досліджень, при синтезі комбінованих енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій на основі ВЕХВ дасть змогу генерувати максимальний імпульс тиску для силового впливу на об'єкт обробки, що значно підвищить продуктивність РІТ, дозволить суттєво зменшити споживання електроенергії за рахунок додавання максимально можливої величини хімічної енергії при реалізації технологічних операцій з використанням високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованому середовищі. Це в свою чергу дозволить збільшити масштаби використання РІТ на основі ВЕХВ для днопоглиблювальних робіт та зменшити витрати на будівництво й реконструкцію морських та річкових портів, різноманітних гідротехнічних споруд, терміналів для обробки транспортних суден підвищеної водотоннажності, що забезпечить збільшення обсягів морських перевезень.

Список літератури

- [1] Гулий Г. А. *Научні основи розрядноімпульсних технологій*. 1990. К: Наукова думка.
- [2] Різун А. Р., Голень Ю. В., Денисюк Т. Д., Муштатний Г. П. Імпульсні електророзрядні технології в будівництві. *Будівництво України*, 2008. 10, 39–43.
- [3] Денисюк Т., Рачков О., Старков І. Підвищення енергоефективності переробки відходів збагачення руд електророзрядним методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, 2023, 4(18), 98–105. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.04.14/>

- [4] Хвощан О. В., Смірнов О. П. Залежність енергетичних процесів високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів «Скіф» від характеристик навантаження. *Технічна електродинаміка*, 2022, № 1, 58–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
- [5] Вовченко О. І., Посохов А. А. *Керовані електровибухові процеси перетворення енергії в конденсованих середовищах*. 1992. К.: Наук. Думка.
- [6] Vovchenko O. I., Demydenko L. Yu., Kozyriev S. S., Ovchynnikova L. E. High Voltage Electrochemical Explosion in Discharge-Pulse Technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2022. Vol. 58, No. 6, P. 731–738. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S106837552206014X>.
- [7] Комплекс для електрогідроімпульсного руйнування міцних монолітних об'єктів під водою. Пат. 76299 Україна: МПК6 E21C37/18, E21C50/00. № 20040806566; заявл. 05.08.2004; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7/2006. 3 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/389033/>
- [8] Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisyuk T. D. Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, Vol. 44, No. 3, P. 240. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375508030125>.
- [9] Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisyuk T. D. Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007, Vol. 43, No. 2, P. 116. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375507020093>.
- [10] Козирев С. С. Дослідження енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 2024, № 3 (496), 75–79. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).11](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).11)
- [11] Вовченко О. І., Демиденко Л. Ю., Блащенко О. Д., Старков І. М. Підвищення ефективності високовольтних електророзрядних установок, що використовують екзотермічні дисперсні середовища. *Технічна електродинаміка*, 2019. № 5, 77–82. doi: 10.15407/techned2019.05.077. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/544>
- [12] Vovchenko A. I., Demidenko L. Y., Blashchenko A. D., Starkov I. N. Factors Affecting the Energy Efficiency of Exothermic Transformations during a Controlled High-Voltage Electrochemical Explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2023, Vol. 59, P. 140–147. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068375523020175>

© Козирев С. С.

Дата надходження статті до редакції: 24.09.2024

Дата затвердження статті до друку: 14.10.2024