

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ДИСПЕРСНЫЕ СРЕДЫ**

**Вовченко А.И.\***, Демиденко Л.Ю.\*\***,** Блащенко А.Д.\*\*\***,** Старков И.Н.\*\*\*\*

**Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Богоявленский, 43-А, Николаев, 54018, Украина.**

**E-mail: [dpte@iippt.com.ua](mailto:dpte@iippt.com.ua), [iippt@iippt.com.ua](mailto:iippt@iippt.com.ua)**

*В работе показано, что применение в высоковольтных электроразрядных установках двухконтурных емкостных генераторов импульсных токов вместо традиционных одноконтурных, а также регулировки накопленной в них энергии путем изменения емкостей и/или напряжений их заряда и моментов ввода этой энергии в межэлектродный промежуток, заполненный экзотермической дисперсной средой, позволяет повысить более, чем в 1,5 раза энергоэффективность этих установок. Такой подход особо эффективен при использовании экзотермических сред, содержащих в качестве горючего алюминий различной дисперсности. В этом случае повышение энергетических характеристик электроразрядных установок обеспечивается за счет увеличения длительности экзотермических процессов, т.е. полноты сгорания алюминия в канале электроразряда. Причем одним из наиболее важных условий повышения энергетических характеристик таких установок является поддержание в канале давления выше критического значения (~ 22,5 МПа), необходимого для протекания самоподдерживающихся экзотермических реакций. Библиограф. 10, рис. 5.*

**Ключевые слова:** электроразряд, высоковольтная установка, межэлектродный промежуток, управляемый ввод энергии, канал разряда, экзотермическая среда, давление, энергоэффективность.

**Введение.** Электроразрядные установки (ЭРУ) широко применяются в современных электрогидравлических, магнитоимпульсных, электроэрозионных, лазерных и других технологиях, использующих кратковременную (на протяжении  $10^{-5} - 10^{-6}$  с) реализацию в плотной конденсированной среде (чаще всего в воде) плотности энергии  $10^{14} - 10^{15}$  Дж/м<sup>3</sup> [1–3], что сравнимо с взрывом традиционных взрывчатых веществ. Обычно технологическая эффективность ЭРУ определяется величиной энергии, выделившейся в разрядном канале, скоростью нарастания, амплитудой и длительностью разрядного тока. Наиболее простым путем повышения энергии, накопленной в конденсаторах, является повышение напряжения их заряда, на практике обычно (10-50) кВ [4, 5]. При необходимости формирования разрядных токов сложной формы в ЭРУ применяют многоконтурные системы, имеющие две [6] и более [7] батареи накопительных конденсаторов, заряжаемые до разных напряжений и разряжаемые на одну нагрузку в разные моменты времени. Энергоэффективность таких ЭРУ может быть существенно повышена, если в них применять нелинейные так называемые "суперконденсаторы", емкость которых увеличивается при повышении напряжения на их обкладках [8].

Другой возможностью повышения энергии, выделяемой в разрядном плазменном канале межэлектродного промежутка (МЭП), и создания сверхвысоких давлений в канале и окружающей его среде при разряде через него емкостных накопителей является применение экзотермических дисперсных составов (ЭДС), использующих в качестве горючего алюминий различной дисперсности. [1, 4]. Экспериментальные исследования [9, 10] подтверждают, что при этом возрастают не только энергетические характеристики установок, но и импульсные давления в рабочей среде, гидротоки жидкости и т.п.

В таких ЭРУ удельная эффективность экзотермических превращений в канале разряда  $\mu_0 = \Delta W/M$  (где  $\Delta W$  – тепловая энергия химических превращений, Дж;  $M$  – масса ЭДС, вводимого в МЭП, кг) определяется двумя факторами [1]: средней напряженностью электрического поля в МЭП  $E_0=U/l$  (где  $U$  – приложенное к МЭП напряжение, В;  $l$  – его длина, м) и удельной электрической энергией  $w_\tau = W_\tau/M$  (где  $W_\tau$  – тепловая энергия в канале МЭП от протекающего тока, Дж). При этом выделение

© Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Блащенко А.Д., Старков И.Н., 2019

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0002-5837-2208> ; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-3045-0419> ;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-1778-5065> ;\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-9740-3468>

тепловой энергии за счет экзотермических реакций обычно не превышает 20% от потенциально возможной, поскольку экзотермическая реакция быстро затухает из-за резкого падения давления в канале в десятки раз. А для протекания самоподдерживающихся экзотермических реакций необходимое давление должно быть не менее 22,5 МПа [1].

На рис. 1, а показано изменение давления в разрядном канале одноконтурной ЭРУ с емкостным накопителем энергии, а на рис. 1, б – двухконтурной ЭРУ, которым подтверждается возможность поддержания давления в канале разряда выше критического более длительное время.

**Цель работы** – обоснование целесообразности применения многоконтурных генераторов импульсных токов (ГИТ) для целенаправленного управления вводом энергии в разрядный канал с целью увеличения эффективности протекающих экзотермических реакций и соответственно повышения интегральной энергии в канале разряда ЭРУ.

Регулирование энергии, выделяемой в разрядном канале, обеспечивалось изменением энергий  $W_1$  и  $W_2$  двух контуров, напряжений их заряда  $U_1$  и  $U_2$ , а также интервала  $t_3$  между началами их разряда на МЭП.

Для исследования электродинамических, гидродинамических и энергетических характеристик ЭРУ при управляемом вводе электрической энергии в канал разряда использовали лабораторный экспериментальный стенд на базе двухконтурной схемы, показанной на рис. 2.

Емкостные накопители  $C_1$  и  $C_2$  разрядных контуров подключались к МЭП, в который помещали ЭДС, с помощью управляемых разрядников  $F_1$  и  $F_2$ , которые запускались блоками поджига БП-1 и БП-2. Собственные индуктивности контуров были  $L_1 \approx 6,8 \cdot 10^{-6}$  Гн и  $L_2 \approx 3,5 \cdot 10^{-6}$  Гн. Управление блоками поджига осуществлялось с пульта управления (ПУ). МЭП располагался в технологическом баке (ТБ) объемом  $1\text{ м}^3$ , заполненном водой. В схеме применялся электроразъединитель ЭР для более раннего от-

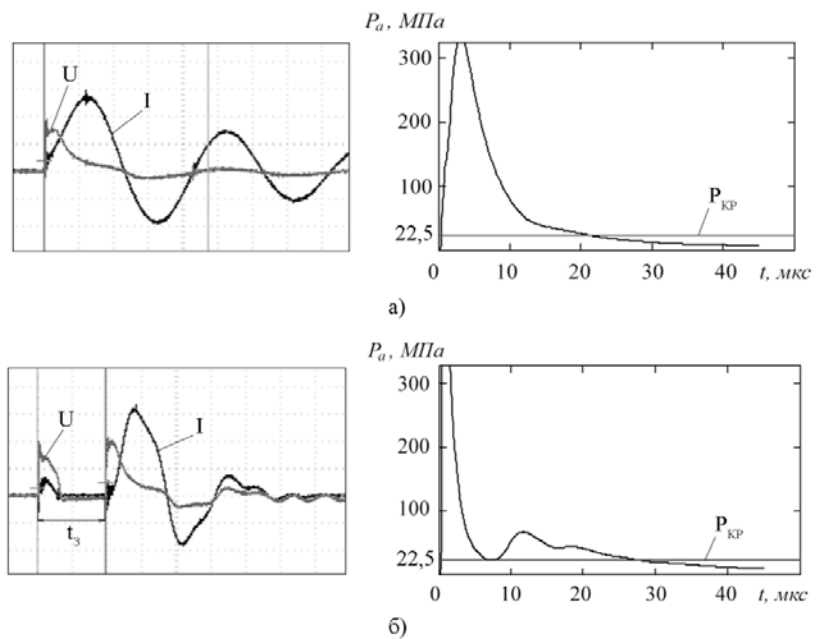


Рис. 1

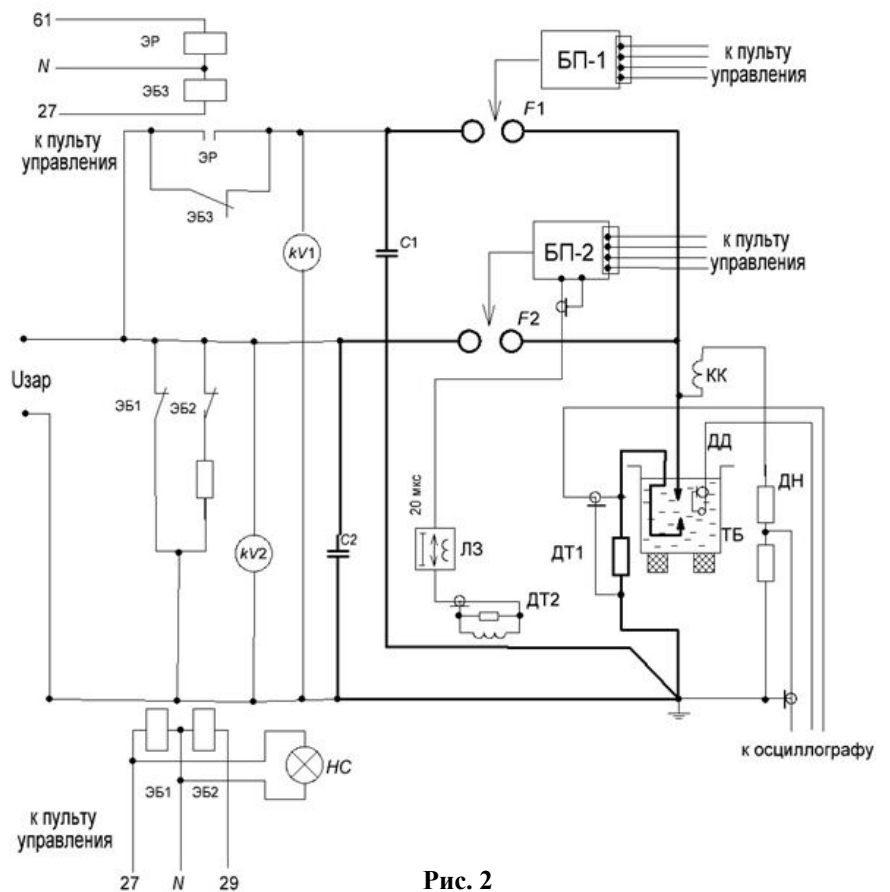


Рис. 2

ключения заряда одного из емкостных накопителей энергии.

По достижении заданных зарядных напряжений на накопителях  $C_1$  и  $C_2$  с ПУ запускался блок поджига БП-1 для разряда конденсатора  $C_1$  на МЭП, а через определенное время запускался БП-2 для разряда конденсатора  $C_2$ , формируя ветви цепи с МЭП и требуемым импульсом тока.

Экспериментальный стенд позволял в процессе одного разряда регистрировать временные зависимости падения напряжения на МЭП  $U(t)$ , тока  $i(t)$  протекающего через него, профиля волны давления  $P(t)$  в среде и периода пульсации  $T_n$  послеразрядной парогазовой полости (ПГП). При вводе электрической энергии величина  $T_n$  определялась как интервал времени между пиками давления при ударном расширении канала разряда и при первом схлопывании послеразрядной расширяющейся парогазовой полости. При неизменной величине удельной электрической энергии  $w_t$  исследовали влияние соотношений энергий  $W_2/W_1$ , последовательно вводимых в канал разряда, и временного интервала между ними  $t_3$  на эффективность протекания экзотермических реакций ЭДС. Изменение режимов ввода энергии обеспечивалось варьированием емкостей накопителей энергии  $C_1$  и  $C_2$  и временной задержки  $t_3$  между их подключениями.

Учитывая многофакторность процесса, на первом этапе исследования проводились при неизменных массе ЭДС  $M = 2 \cdot 10^{-4}$  кг, зарядных напряжениях  $U_1$  и  $U_2$  и длине МЭП  $l = 3 \cdot 10^{-2}$  м. Параметры управляемой ЭРУ изменялись так, чтобы суммарная запасаемая накопителями энергия двух контуров равнялась энергии традиционной одноконтурной установки  $W_0 = 553$  Дж и регулировалась изменением емкостей  $C_1$  от 0,1 до 0,4 мкФ и  $C_2$  – от 2,24 до 6,53 Ф, а их зарядные напряжения составляли  $U_1 = 30$  кВ и  $U_2 = 15$  кВ.

Влияние режимов ввода электрической энергии на величину выделяемой химической энергии оценивалось путем сравнения с режимами традиционной одноконтурной ЭРУ. Для традиционной и управляемой ЭРУ критерием эффективности режима была удельная величина  $\mu$  сгорания ЭДС. Эта величина, а также время задержки  $t_3$  и длительность давления в канале  $\tau_{Pa}$  выше критического значения 22,5 МПа нормировались к соответствующим значениям  $\mu_0$ ,  $t_0 = \pi (L_1 \cdot C_1)^{1/2}$  и  $\tau_{Pa0}$  и представлялись относительными величинами  $\bar{\mu} = \mu / \mu_0$ ,  $\bar{\tau} = t_3 / t_0$  и  $\bar{\tau}_P = \tau_{Pa} / \tau_{Pa0}$ , где  $\mu_0$  [Дж/кг] – эффективность сгорания в канале единицы массы ЭДС,  $t_0 = \pi (L_1 \cdot C_1)^{1/2}$  [мкс] и  $\tau_{Pa0}$  [мкс] – длительности первого импульса и давления в канале разряда, когда оно выше критического значения 22,5 МПа для традиционной ЭРУ.

Результаты исследований влияния режимов ввода электроэнергии на эффективность экзотермических реакций при постоянных значениях  $w_t = 2,8 \cdot 10^6$  Дж/кг и  $U_2 = 15$  кВ показаны на рис. 3 в виде зависимостей  $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$ , построенных на основе экспериментальных данных, обозначенных точками для трех соотношений энергии:  $W_2/W_1 = 2,0$  (кривая 1),  $W_2/W_1 = 5,1$  (кривая 2),  $W_2/W_1 = 11,3$  (кривая 3). Их аппроксимация представлена полиномиальной зависимостью третьей степени, достоверность которой  $R^2$  приведена для каждой кривой.

Из рис. 3 видно, что зависимости  $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$  для всех соотношений энергий  $W_2/W_1$  аналогичны и имеет экстремум, который подтверждает, что дальнейшее увеличение времени задержки неэффективно. С ростом величины соотношения энергий  $W_2/W_1$  экстремум сдвигается в сторону больших временных значений. Видно, что соотношение  $W_2/W_1$  и временная задержка  $t_3$  оказывают существенное влияние на эффективность протекания экзотермической химической реакции, так при соотношении  $W_2/W_1 = 2,0$  повысить эффективность сгорания ЭДС в условиях управляемого ввода электроэнергии по сравнению с традиционным вариантом практически не удастся. Однако при увеличении соотношения  $W_2/W_1$  более 5,0 эффективность преобразования химической энергии повышается по сравнению с традиционным вариантом, достигая наибольшего увеличения эффективности сгорания ЭДС при соотношении  $W_2/W_1 = 11,3$  (примерно 38%). Отметим, что с ростом величины  $W_2/W_1$  расширяется диапазон временного интервала задержки, в котором эффективность протекания экзотермических химических реакций повышается. Так, при  $W_2/W_1 = 5,1$  относительный временной интервал задержки более эффективного преобразования химической изменяется от 1,5 до 4 (рис.3,

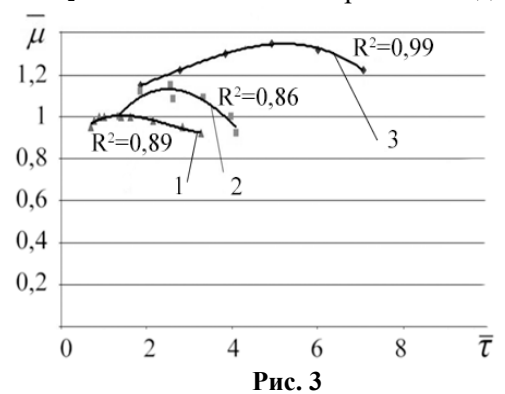


Рис. 3

кривая 2), а при  $W_2/W_1=11,3$  – он увеличивается более, чем в 3 раза (рис.3, кривая 3). Такая же тенденция наблюдается и при других величинах удельной электрической энергии.

На рис. 4 показаны зависимости  $\bar{\mu}=\varphi(\bar{\tau})$  при  $w_\tau=3,75 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $U_{02}=20$  кВ для соотношений энергий  $W_2/W_1=7,4$  (кривая 1) и  $W_2/W_1=15,8$  (кривая 2). Параметры управляемой ЭРУ выбирались такими, чтобы общая энергия в двух разрядных контурах равнялась энергии в традиционной схеме  $W_0=750$  Дж. Параметры управляемого ГИТ при этом изменялись: емкость  $C_1$  от 0,1 до 0,2 мкФ и  $C_2$  от 2,24 до 3,51 мкФ при зарядных напряжениях  $U_1=30$  кВ и  $U_2=20$  кВ;

Анализ результатов на рис. 3 и 4 показывает, что при увеличении удельной электрической энергии эффективность преобразования химической энергии в условиях ее управляемого ввода повышается, достигая при  $w_\tau=3,75 \cdot 10^6$  Дж/кг по сравнению с базовым вариантом увеличения примерно в 1,7 раза.

Характер зависимостей  $\bar{\mu}=\varphi(\bar{\tau})$  при разных величинах удельной электрической энергии аналогичен: все имеют экстремум. Вначале с увеличением времени задержки эффективность преобразования химической энергии ЭДС повышается, а при достижении определенного значения  $\bar{\tau}$  наблюдается экстремум на кривых  $\bar{\mu}=\varphi(\bar{\tau})$ , и дальнейшее увеличение времени задержки становится неэффективным. Это обусловлено изменением давления в канале разряда, величина которого до определенной времени задержки подключения второго накопителя поддерживается на уровне, превышающем 22,5 МПа, обеспечивающем протекание самоподдерживающейся химической реакции. Затем, чем на более поздних стадиях после начала разряда происходит выделение энергии из  $C_2$  в больший объем плазменного канала, происходит снижение давления в канале ниже уровня критического давления. В результате самоподдерживающиеся экзотермические реакции затухают, что приводит к уменьшению высвобождающейся при этом энергии.

На рис. 5 показаны зависимости относительной длительности давления в канале, величина которого превышает критическое значение (22,5 МПа), от величины  $\bar{\tau}$  при  $w_\tau=3,75 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $U_2=20$  кВ для двух значений соотношений энергий  $W_2/W_1=7,4$  (кривая 1) и  $W_2/W_1=15,8$  (кривая 2).

Анализ зависимостей  $\bar{\mu}(\bar{\tau})$  и  $\bar{\tau}_p=f(\bar{\tau})$  на рис. 4 и 5 показывает, что с увеличением длительности давления в канале, величина которого превышает критический уровень, возрастает величина  $\bar{\mu}$ . Наибольшее значение  $\bar{\mu}$  соответствует максимуму длительности давления в канале, превышающего значение 22,5 МПа, при котором протекает самоподдерживающаяся химическая реакция.

#### Выводы.

1. Впервые обосновано, что применение двухконтурного ГИТ с управляемым вводом электрической энергии в разрядный канал МЭП позволяет более, чем в 1,5 раза повысить эффективность экзотермических реакций по сравнению с режимами традиционных одноконтурных ЭРУ.

2. Обосновано, что, варьируя величиной удельной электрической энергии  $w_\tau$  и режимами ввода электрической энергии ( $W_1$  и  $W_2$ ;  $W_2/W_1$ ;  $t_3$ ) в разрядный канал, можно целенаправленно управлять эффективностью экзотермических реакций в ЭРУ.

3. Подтверждено, что основным физическим фактором, определяющим эффективность протекания экзотермических реакций в ЭРУ с управляемым вводом электрической энергии в разрядный канал МЭП, является длительность давления в канале разряда, величина которого превышает критический уровень, равный 22,5 МПа.

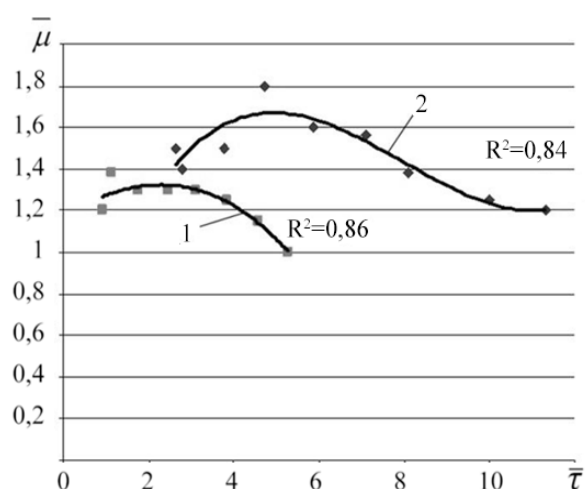


Рис. 4

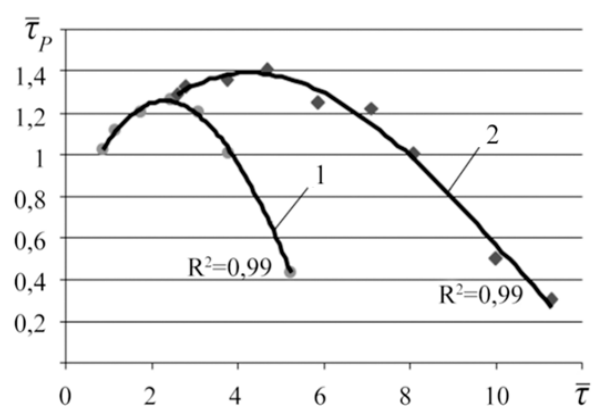


Рис. 5

1. Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. К.: Наук. думка, 1992. 168 с
2. Ризун, А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д., Муштатный Г.П. Импульсные электроразрядные технологии в строительстве. *Будівництво України*. 2008. № 10. С. 29–31.
3. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118.
4. Герасимов Б.В., Поздеев В.А. Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядноимпульсной технологии запрессовки труб в трубных решетках. Сборник научных трудов Ин-та импульсных процессов и технологий НАН Украины. Физико-технические аспекты электровзрывного преобразования энергии. К. 1990. С. 85-89.
5. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp 581–588.
6. Тертилов Р.В. Оптимизация разрядноимпульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 67–72.
7. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.
8. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 3–11.
9. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. Процессы преобразования энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах. *Електронна обробка матеріалів*. 2017. Т. 53. № 5. С. 41-47.
10. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. Алгоритм расчета параметров комбинированного электроразрядного источника энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах. *Електронна обробка матеріалів*. 2018. Т. 54. № 3. С. 69-73.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ЕКЗОТЕРМІЧНІ ДИСПЕРСНІ СЕРЕДОВИЩА

**Вовченко О.І., Демиденко Л.Ю., Блащенко О.Д., Старков І.М.**  
**Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,**  
**пр. Богоявленський, 43-А, Миколаїв, 54018, Україна.**  
**E-mail: [dpte@iip.com.ua](mailto:dpte@iip.com.ua), [iip@iip.com.ua](mailto:iip@iip.com.ua)**

*У роботі показано, що застосування у високовольтних електророзрядних установках двоконтурних ємнісних генераторів імпульсних струмів замість традиційних одноконтурних та регулювання накопиченої у них енергії зміненням ємностей і/або напруг їхнього заряду і моментів введення цих енергій в міжелектродний проміжок, заповнений екзотермічним дисперсним середовищем, дає змогу підвищити більш, ніж в 1,5 рази енергоефективність таких установок. Цей підхід особливо ефективний при використанні екзотермічних середовищ, що містять як палне алюмінію різної дисперсності. У цьому випадку підвищення енергетичних характеристик електророзрядних установок забезпечується за рахунок збільшення тривалості екзотермічних процесів, тобто повноти згорання алюмінію в каналі електричного розряду. Причому одним із найбільш важливих умов підвищення енергетичних характеристик таких установок є підтримка в каналі тиску вище критичного значення (~ 22,5 МПа), необхідного для протікання самопідтримуючої екзотермічної реакції. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** електророзряд, високовольтна установка, міжелектродний проміжок, кероване введення енергії, канал розряду, екзотермічне середовище, тиск, енергоефективність.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS WHICH USE EXOTHERMAL DISPERSED MEDIA

**Vovchenko O.I., Demydenko L. Yu., Blashchenko O.D., Starkov I.M.**  
**Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**Bohoiavlenskii Avenue, 43-A, Mykolaiv, 54018, Ukraine.**  
**E-mail: [dpte@iip.com.ua](mailto:dpte@iip.com.ua), [iip@iip.com.ua](mailto:iip@iip.com.ua)**

*The article shows that the use of high-voltage electrical discharge installations, instead of traditional single-circuit capacitive double-circuit pulse generators, as well as control of the energy accumulated in them (by changing the ca-*

capacitances and / or voltages of their charge) and the moment of energy input into the interelectrode gap filled with exothermic dispersed medium, allows to increase more than 1.5 times the energy efficiency of such facilities. This approach is especially effective when using exothermic medium containing aluminum with different dispersity as a fuel. In this case, the increase in the energy characteristics of the electric-discharge installations is ensured by increasing the duration of the exothermic processes. Moreover, one of the most important conditions for increasing the energy characteristics of such facilities is to maintain the pressure in the channel above the critical value (~ 22.5 MPa), which is necessary for the flow of self-sustaining exothermic reactions. References 10, figures 5.

**Keywords:** electric discharge, high-voltage installation, interelectrode gap, controlled introduction of energy, channel of discharge, exothermic medium, pressure, energy efficiency.

1. Vovchenko O.I., Posokhov A.A. Controlled electric explosion processes of energy conversion in condensed media. Kyiv: Naukova dumka, 1992. 168 p. (Rus.)
2. Rizun, A.R., Golen. Yu.V., Denisyuk T.D., Mushtatny G.P. Pulsed electric discharge technologies in construction. *Budivnytstvo Ukrainy*. 2008. No 10. Pp. 29 - 31. (Rus.)
3. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118.
4. Gerasimov B.V., Pozdeev V.A. High-voltage electrochemical explosion in the discharge-pulse technology of fitting the tubes in tube sheets. Collection of scientific works of In-that pulse processes and technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Physical and technical aspects of electric energy conversion. Kyiv. 1990. Pp. 85-89. (Rus.)
5. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp 581–588.
6. Tertilov R.V. Optimization of discharge-pulse technologies based on the use of dual-circuit pulse current generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011. No 3. Pp. 67-72. (Rus.)
7. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2007. No 6. Pp. 70–75. (Rus.)
8. Suprunovska N.I., Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Beletsky O.A. Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2015. No 5. Pp. 3–11. (Rus.)
9. Vovchenko O.I., Demidenko L.Yu., Starkov I.M. The processes of energy conversion in high-voltage electrochemical explosion in limited quantities. *Elektronnaia obrabotka materialov*. 2017, No 53 (5). Pp. 41-47. (Rus.)
10. Vovchenko O.I., Demidenko L.Yu., Starkov I.M. Algorithms for calculating the parameters of the combined electric discharge source of energy in the high-voltage electrochemical explosion (hvee) in confined volumes. *Elektronnaia obrabotka materialov*. 2018. No 54 (3). Pp. 69-73. (Rus.)

Надійшла 02.01.2019  
Остаточний варіант 11.06.2019