

Факторы влияния на энергетическую эффективность экзотермических превращений при управляемом высоковольтном электрохимическом взрыве

А. И. Вовченко^{*,**}, Л. Ю. Демиденко, А. Д. Блащенко, И. Н. Старков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: dpte@ipt.com.ua, **e-mail: ipt@ipt.ua*

Поступила в редакцию 15.06.2021

После доработки 26.08.2021

Принята к публикации 30.08.2021

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований по влиянию изменений начальных условий на энергетические характеристики управляемого высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ), определены основные факторы воздействия на удельную энергетическую эффективность химических превращений водонаполненной экзотермической смеси (ВЭС) с 40% содержанием алюминия в его разрядном канале. Установлен диапазон рационального изменения основных факторов, в котором обеспечивается повышение удельной энергетической эффективности экзотермических превращений применяемой ВЭС в канале управляемого ВЭХВ. Это позволит снизить массогабаритные характеристики и энергопотребление генератора импульсных токов на обеспечение необходимых энергетических характеристик управляемого ВЭХВ, заданных конкретной разрядно-импульсной технологией.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, водонаполненная экзотермическая смесь, генератор импульсных токов, управляемый ввод энергии, канал разряда, экзотермическая химическая реакция, удельная энергетическая эффективность

УДК 532:537.528

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.52>

ВВЕДЕНИЕ

Электрогидроимпульсные системы (ЭГИС), как известно [1, 2], широко применяются в различных технологиях импульсной обработки материалов и сред. Их действие основано на процессе трансформации энергии электрического поля в механическую работу посредством импульсного ввода энергии в разрядный канал, который расширяется в плотной конденсированной среде (чаще всего в воде) и используется как источник импульсных давлений. В настоящее время наибольшее распространение получили следующие способы формирования импульсных давлений: с использованием подводного высоковольтного электрического разряда (ВЭР), электрического взрыва проводников (ЭВП) и высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) [1–6].

ВЭХВ реализуется при введении в зону канала ВЭР специально разработанных безопасных (в отношении детонации) алюминийсодержащих водонаполненных экзотермических смесей (ВЭС) [7], способных к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений, развиваемых в плазменном канале. В разрядно-импульсных технологиях (РИТ) на базе ВЭХВ до настоящего времени в качестве источника

электрической энергии используется традиционная одноконтурная схема генератора импульсных токов (ГИТ) с емкостным накопителем [4, 8]. Высвобождающаяся в результате экзотермических превращений энергия суммируется с электрической энергией, поступающей из емкостного накопителя, в результате чего общее количество энергии, выделяющейся в разрядном канале, существенно возрастает [9]. Важным преимуществом таких РИТ, наряду с увеличением общей энергоемкости комбинированного источника, является их управляемость. Эффективностью электровзрывного преобразования энергии и силовыми характеристиками, воздействующими на объект обработки, в разрядно-импульсных технологиях на базе ВЭХВ можно управлять в широких пределах за счет большого количества регулируемых начальных условий (параметров ГИТ, длины разрядного промежутка, массы, концентрации, дисперсности и соотношения ингредиентов ВЭС) комбинированного источника.

Вместе с тем проведенные исследования по использованию ВЭХВ как в неограниченном, так и ограниченном объемах показали, что традиционная схема управления на основе одноконтурного емкостного ГИТ не обеспечивает достаточной эффективности электровзрывного преобразования химической энергии вследствие

неполного сгорания ВЭС [10, 11]. Основной причиной этого является прекращение самоподдерживающейся экзотермической реакции вследствие нестационарности процесса из-за резкого (время – порядка 10^{-5} с) снижения давления в канале разряда ниже критического уровня, равного 22,5 МПа, при котором наблюдается самоподдерживающееся горение ВЭС в канале ВЭХВ.

В ИИПТ НАН Украины разработан способ повышения эффективности электровзрывного преобразования химической энергии ВЭС в разрядном канале ВЭХВ, основанный на управляемом вводе электрической энергии в канал, который получил название управляемый ВЭХВ [12]. Энергия ГИТ при управляемом ВЭХВ вводится в один межэлектродный промежуток последовательно из двух различных конденсаторных батарей с регулируемой временной задержкой между порциями энергий.

Обзор научно-технической литературы, посвященной изучению влияния условий реализации ВЭХВ на процессы преобразования энергии в разрядном канале, показал, что в настоящее время систематические экспериментальные исследования управляемого ВЭХВ отсутствуют. Некоторые результаты исследований энергетических характеристик управляемого ВЭХВ с применением двухконтурных емкостных ГИТ освещены в работах [10, 13] фрагментарно. Тем не менее полученные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности его применения в современных РИТ.

Для практического использования управляемого ВЭХВ в технологических производственных процессах важным и актуальным является обеспечение повышения энергетической эффективности экзотермических преобразований ВЭС, то есть выделение в разрядном канале ВЭХВ максимально возможного количества тепловой энергии из единицы массы используемой ВЭС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основное внимание в данной работе уделено экспериментальным исследованиям, направленным на изучение и выявление основных факторов, влияющих на энергетическую эффективность экзотермических химических превращений ВЭС в разрядном канале управляемого ВЭХВ, поскольку теоретически решить задачу, описывающую протекание экзотермических химических реакций в канале ВЭХВ с управляемым вводом электроэнергии, с учетом существенно нестационарных условий (термодинами-

ческих, гидродинамических) при воздействии электрических и магнитных полей на данный момент представляется чрезвычайно сложным.

Цель работы – на основе экспериментальных исследований влияния изменений начальных условий на энергетические характеристики управляемого ВЭХВ определить основные факторы воздействия на энергетическую эффективность экзотермических химических превращений ВЭС в его разрядном канале и установить рациональный диапазон изменения каждого из них, обеспечивающий повышение энергетической эффективности экзотермических превращений ВЭС.

При решении задачи управления энергетическими характеристиками ВЭХВ в неограниченном объеме при традиционной одноконтурной схеме ГИТ установлено [10], что для алюминий-содержащих ВЭС основными электрофизическими факторами (начальные и граничные условия), определяющими удельную энергетическую эффективность μ_0 , являются начальная напряженность электрического поля в разрядном промежутке E_0 и удельная электрическая энергия, выделившаяся в единице массы ВЭС w_τ .

При ВЭХВ в ограниченном объеме удельная эффективность экзотермических превращений μ_γ зависит не только от основных электрофизических факторов E_0 и w_τ , но и от безразмерного обобщенного параметра γ , учитывающего начальные параметры энергоисточника и основные характеристики (геометрические размеры) ограниченного объема [11].

Априори очевидно, что удельная энергетическая эффективность экзотермических превращений ВЭС в канале управляемого ВЭХВ будет зависеть от удельной электрической энергии w_τ , начальной напряженности электрического поля в разрядном промежутке E_0 , физико-химических свойств выбранной ВЭС, ее массы и режимов ввода электрической энергии, определяемых параметрами двухконтурного генератора импульсных токов.

Экспериментальные исследования влияния изменения начальных условий на энергетическую эффективность экзотермических химических превращений ВЭС в условиях реализации управляемого ВЭХВ проводились поэтапно.

На первом этапе велись исследования в неограниченном объеме с целью выявления основных факторов помимо электрофизических параметров: w_τ и E_0 , определяющих эффективность протекания экзотермических реакций ВЭС при управляемом ВЭХВ.

Таблица. Экспериментальное определение величины μ_0 для ВЭС с 40% содержанием алюминия для ВЭХВ при традиционной схеме ГИТ

W_0 , Дж	$M \times 10^3$, кг	T_n , мс	W_n , Дж	$\eta_n \times W_n$, Дж	ΔW_n , Дж	$w_\tau \times 10^{-6}$, Дж/кг	$\mu_0 \times 10^{-6}$, Дж/кг
750	0,3	17,1	333,6	109,6	224,0	2,50	0,75
750	0,2	16,2	299,6	109,6	190,0	3,75	0,95
750	0,1	15,9	268,2	109,6	158,6	7,50	1,59
600	0,3	15,8	263,2	89,2	174,0	2,00	0,58
450	0,1	14,7	212,0	76,1	135,9	4,50	1,36
450	0,3	14,8	226,1	76,1	150,0	1,50	0,50
900	0,3	17,6	363,8	129,8	234,0	3,00	0,78
900	0,2	17,3	345,5	129,8	215,7	4,50	1,08
1008	0,2	17,4	351,9	131,9	220,0	5,00	1,10
1008	0,2	17,8	376,3	131,9	244,4	5,00	1,22
810	0,3	17,2	339,5	125,1	214,4	2,70	0,71
810	0,2	17,3	347,8	125,1	222,8	4,05	1,20
400	0,2	14,4	209,7	93,7	116	2,00	0,58
600	0,4	16,5	300,3	101,3	199	1,5	0,5

На втором этапе исследовали влияние электрофизических факторов и режимов управляемого ввода электрической энергии (энергии суммарной и порционной, соотношения порций энергий, последовательно вводимых в канал ВЭХВ, а также временной задержки между ними t_s) на эффективность протекания экзотермических реакций ВЭС в его разрядном канале.

В данной работе ВЭХВ осуществлялся в технологическом баке объемом 1 м^3 , заполненном водой, с использованием ВЭС с 40% содержанием алюминия разной дисперсности (8% – ПАП-1, 32% – ПА-2), эффективность применения которой обоснована в работе [10]. Для этого диэлектрическая капсула, предварительно заполненная необходимой массой ВЭС, которая в экспериментах изменялась в диапазоне от $0,1 \times 10^{-3}$ до $0,4 \times 10^{-3}$ кг, устанавливалась в межэлектродный разрядный промежуток.

В качестве объективного критерия высвобождения химической энергии при ВЭХВ как в случае традиционного варианта его осуществления при одноконтурной схеме ГИТ, так и в условиях управляемого ввода электрической энергии в его разрядный канал использовалась величина удельной энергетической эффективности сгорания ВЭС $\mu = \Delta W/M$, Дж/кг (где ΔW – тепловая энергия, выделившаяся в канале разряда за счет химических экзотермических реакций, Дж; M – масса ВЭС, кг).

В экспериментах сначала определялась величина удельной энергетической эффективности сгорания ВЭС μ_0 для ВЭХВ при традиционной одноконтурной схеме ГИТ в зависимости от изменения начальных условий (энергия ГИТ, масса ВЭС) с использованием подхода, изложенного в работе [10] по экспериментально зарегистрированным данным периода пульсации

парогазовой полости (ППП). Величина запасенной энергии изменялась в интервале (400–1008) Дж за счет изменения емкости конденсаторов, при этом величина зарядного напряжения была неизменной и равна $U_0 = 30 \times 10^3$ кВ. Длина разрядного промежутка выбиралась из условия обеспечения начальной напряженности электрического поля в разрядном промежутке, равной критической ($E_{кр} = 10^6$ В/м) [10], при которой эффективность сгорания ВЭС максимальна, равна $l = 3 \times 10^{-2}$ м и на протяжении всех экспериментальных исследований не изменялась. Результаты расчетов определения величины удельной энергетической эффективности μ_0 приведены в таблице.

Зависимость $\mu_0 = f(w_\tau)$, построенная по экспериментальным данным таблицы, иллюстрируется рис. 1, здесь же приведена аппроксимация экспериментальных данных полиномиальной зависимостью третьей степени, выполненная с применением программного обеспечения Microsoft Excel и их стандартной функции – линии тренда.

Как следует из рис. 1, вначале с увеличением w_τ зависимость $\mu_0(w_\tau)$ возрастает, что свидетельствует о повышении эффективности сгорания ВЭС, затем примерно при значении $w_\tau \approx 10$ МДж/кг сменяется областью насыщения. Математическое выражение, описывающее данную зависимость, имеет вид:

$$\mu_0 = 0,0003w_\tau^3 - 0,0161w_\tau^2 + 0,2936w_\tau + 0,0924, \quad (1)$$

где μ_0 и w_τ выражены в МДж/кг, причем $15,0 \text{ МДж/кг} > w_\tau \geq 1,0 \text{ МДж/кг}$. Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,95$.

Таким образом, для выбранного фиксированного состава ВЭС при традиционной схеме

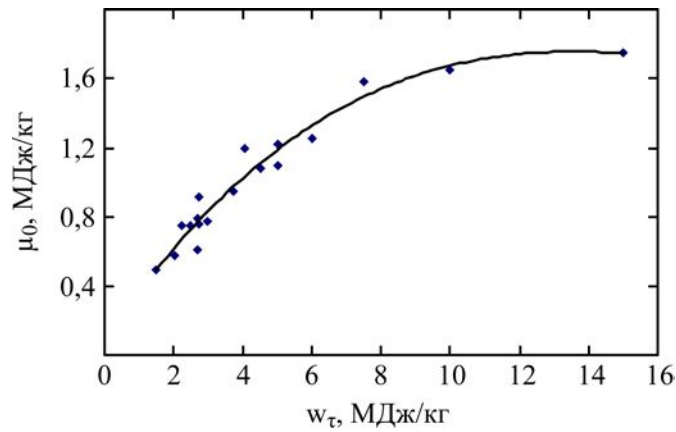


Рис. 1. Зависимость удельной энергетической эффективности ВЭС μ_0 от удельной электрической энергии w_t для ВЭС с 40% содержанием алюминия для ВЭХВ при традиционной схеме ГИТ при $E_0 = 10^6$ В/м: ■■■ – эксперимент; — – аппроксимация (1,1).

ВЭХВ для оптимально целесообразного значения напряженности электрического поля $E_0 = 10^6$ В/м полученная корреляция $\mu_0(w_t)$ (рис. 1) позволяет ограничиться уровнем удельной электрической энергии $w_t \approx 10$ МДж/кг, при котором функция $\mu_0(w_t)$ практически достигает насыщения $\mu_0(w_t) = \mu_n$.

Для определения удельной энергетической эффективности экзотермических реакций в условиях управляемого ВЭХВ при неизменной величине удельной электрической энергии из таблицы были выбраны по два режима:

– при $w_t = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг, для которых базовая величина удельной энергетической эффективности μ_0 одинакова ($\mu_0 = 0,58 \times 10^6$ Дж/кг): $W_0 = 400$ Дж ($M = 0,2 \times 10^{-3}$ кг) и $W_0 = 600$ Дж ($M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг);

– при $w_t = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг, соответственно величина $\mu_0 = 0,5 \times 10^6$ Дж/кг: $W_0 = 450$ Дж ($M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг) и $W_0 = 600$ Дж ($M = 0,4 \times 10^{-3}$ кг).

Параметры двухконтурного ГИТ подбирались так, чтобы в каждой серии экспериментов суммарная энергия двух контуров равнялась энергии традиционного одноконтурного ГИТ и регулировалась изменением емкости C_2 от 1,0 до 1,9 мкФ, соответственно величина соотношения энергий W_2/W_1 изменялась в интервале от 7,8 до 12,3. Учитывая многофакторность процесса управляемого ВЭХВ, в данной работе исследования проводились при неизменных величинах зарядных напряжений $U_1 = 30$ кВ и $U_2 = 25$ кВ. Индуктивности каждого из контуров L_1 и L_2 определялись по экспериментам короткого замыкания и не изменялись: $L_1 = 6,9 \times 10^{-6}$ Гн и $L_2 = 3,54 \times 10^{-6}$ Гн. На первом этапе исследований энергия первого импульса принималась равной $W_1 = 45$ Дж.

Результаты экспериментальных исследований влияния времени задержки t_3 между порциями энергии, вводимыми в канал разряда, на эффек-

тивность протекания экзотермических реакций ВЭС при управляемом ВЭХВ для $w_t = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг и $w_t = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг показаны на рис. 2 и 3 в виде зависимостей $\mu = f(t_3)$, там же приведена их аппроксимация полиномиальной зависимостью третьей степени. Достоверность аппроксимации R^2 приведена для каждой зависимости. Анализ полученных зависимостей $\mu = f(t_3)$ показывает, что на величину удельной энергетической эффективности μ при управляемом ВЭХВ и неизменном параметре w_t в отличие от традиционного варианта ВЭХВ влияют также величины суммарной энергии ГИТ, массы ВЭС и времени задержки t_3 .

Как видно из рис. 2 и 3, графики функциональной зависимости $\mu = f(t_3)$ для разных суммарных энергий и масс ВЭС имеют аналогичный вид, вначале с увеличением времени задержки эффективность преобразования химической энергии повышается, затем при достижении определенного значения t_3 наблюдается экстремум кривых $\mu = f(t_3)$ и дальнейшее увеличение времени задержки приводит к ее спаду. Причем с увеличением суммарной энергии ГИТ и массы ВЭС экстремум кривых $\mu = f(t_3)$ сдвигается в сторону больших значений времени задержки, что особенно выражено на рис. 3.

Сравнение графиков функциональных зависимостей $\mu_0 = f(t_3)$, приведенных на рис. 2 и 3, также показывает, что с увеличением удельной электрической энергии w_t энергетическая эффективность преобразования химической энергии, то есть высвобожденной тепловой энергии из единицы массы, используемой ВЭС при управляемом ВЭХВ, повышается, как и в случае традиционного ВЭХВ. Так, для массы ВЭС $M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг при $w_t = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг величина $\mu = 1,05 \times 10^6$ Дж/кг, а при $w_t = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг величина удельной энергетич-

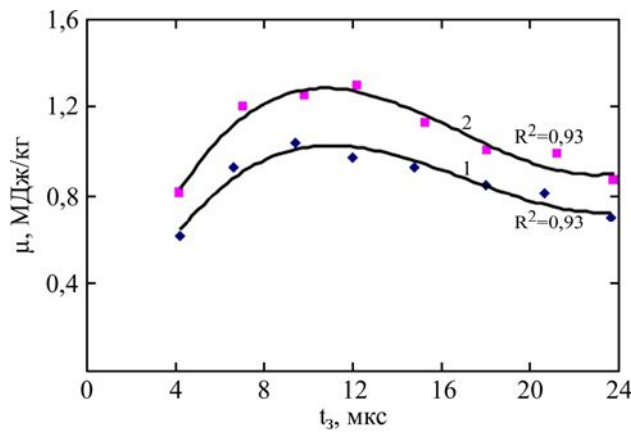


Рис. 2. Удельная энергетическая эффективность ВЭС μ в зависимости от времени задержки t_3 для управляемого ВЭХВ при $w_\tau = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг: 1 – $W_0 = 400$ Дж ($M = 0,2 \times 10^{-3}$ кг); 2 – $W_0 = 600$ Дж ($M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг).

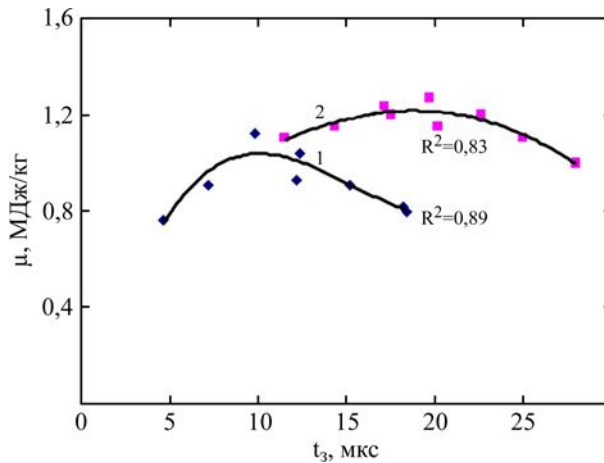


Рис. 3. Удельная энергетическая эффективность ВЭС μ в зависимости от времени задержки t_3 для управляемого ВЭХВ при $w_\tau = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг: 1 – $W_0 = 450$ Дж ($M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг); 2 – $W_0 = 600$ Дж ($M = 0,4 \times 10^{-3}$ кг).

ческой эффективности повышается до $\mu = 1,3 \times 10^6$ Дж/кг.

Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод, что для неограниченного объема при управляемом ВЭХВ в отличие от традиционного его варианта удельную энергетическую эффективность экзотермических химических реакций ВЭС определяют, наряду с двумя электро-физическими параметрами E_0 и w_τ , суммарная энергия ГИТ, масса ВЭС и время задержки t_3 между последовательно вводимыми порциями электрической энергии.

Влияние режимов ввода электрической энергии и удельной электрической энергии на энергетическую эффективность экзотермических превращений ВЭС в канале разряда проводили при изменении энергии двухконтурного ГИТ в интервале от 360 до 1008 Дж.

При этом на втором этапе исследований величины порций энергий, последовательно вводимых в разрядный канал, регулировались изменением емкостей: C_1 от 0,1 до 0,2 мкФ и C_2 от 1,0 до 3,23 мкФ, соответственно величина их соотношений W_2/W_1 изменялась в интервале от 3,4 до 21,4.

Для сравнения результатов экспериментов по влиянию разных режимов ввода электрической

энергии в канал ВЭХВ на величину удельной энергетической эффективности μ время задержки t_3 устанавливалось к характерному времени первого импульса $t_0 = \pi\sqrt{L_1 \times C_1}$ и представлялось относительной величиной:

$$\bar{\tau} = t_3 / t_0. \quad (2)$$

На рис. 4 представлены результаты исследований по влиянию параметра w_τ и режимов ввода энергии, изменяющихся посредством вариации соотношений энергий W_2/W_1 на эффективность сгорания ВЭС при неизменной величине энергии первого импульса, равной 45 Дж и массе ВЭС $M = 2 \times 10^{-4}$ кг.

Как видно из рис. 4, при массе ВЭС $M = 2 \times 10^{-4}$ кг с увеличением энергии второго импульса, а следовательно, и суммарной энергии накопителя в диапазоне от 400 до 1008 Дж, эффективность сгорания ВЭС возрастает приблизительно в 1,8 раза. При этом следует отметить, что с увеличением удельной электрической энергии с $4,05 \times 10^6$ до $5,0 \times 10^6$ Дж/кг эффективность сгорания ВЭС повышается несущественно, что свидетельствует о том, что для этой фиксированной массы зависимость $\mu = f(w_\tau)$ при управляемом вводе энергии в канал ВЭХВ

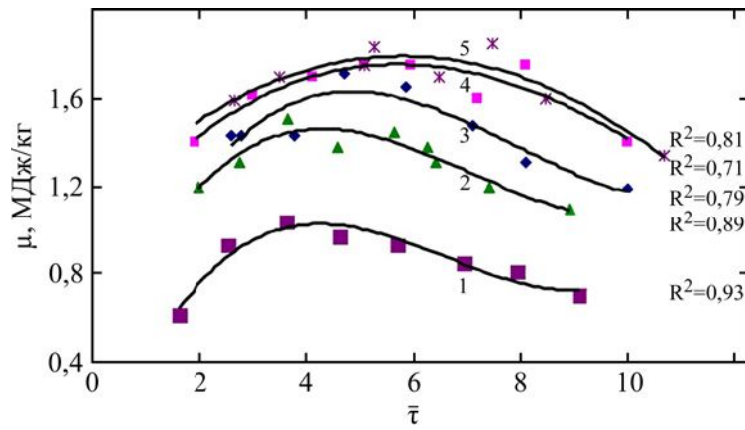


Рис. 4. Удельная энергетическая эффективность применяемой ВЭС μ в зависимости от параметра w_τ и величины $\bar{\tau}$ для управляемого ВЭХВ при $M = 2 \times 10^{-4}$ кг; $W_1 = 45$ Дж: 1 – $w_\tau = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 7,8$); 2 – $w_\tau = 2,75 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 11,2$); 3 – $w_\tau = 3,75 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 15,7$); 4 – $w_\tau = 4,05 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 17,0$); 5 – $w_\tau = 5,0 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 21,4$).

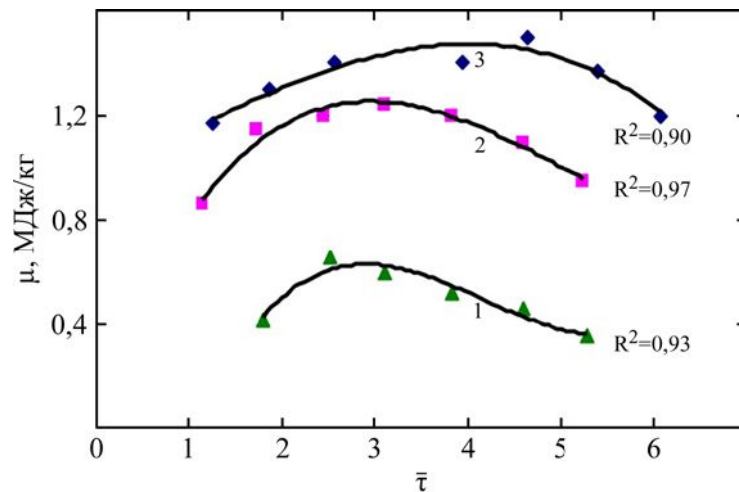


Рис. 5. Зависимость удельной энергетической эффективности ВЭС μ от параметра w_τ и величины $\bar{\tau}$ для управляемого ВЭХВ при $M = 2 \times 10^{-4}$ кг; $W_1 = 90$ Дж: 1 – $w_\tau = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 3,4$); 2 – $w_\tau = 3,75 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 7,3$); 3 – $w_\tau = 4,05 \times 10^6$ Дж/кг ($W_2/W_1 = 8,0$).

при неизменных прочих условиях выходит на насыщение.

При увеличении энергии первого импульса в два раза, то есть $W_1 = 90$ Дж, эффективность преобразования химической энергии ВЭС в условиях управляемого ВЭХВ при тех же значениях параметра w_τ понижается (рис. 5).

Анализ характера зависимости удельной энергетической эффективности ВЭС при управляемом ВЭХВ показывает, что с повышением энергии первого импульса и уменьшением величины удельной электрической энергии увеличивается градиент снижения величины μ . Так, с повышением энергии первого импульса вдвое при $w_\tau = 4,05 \times 10^6$ Дж/кг величина μ уменьшается примерно на 14 процентов, а при $w_\tau = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг уменьшение составляет уже более 40 процентов.

Из представленных на рис. 4 и 5 зависимостей $\mu = f(w_\tau)$ следует, что при неизменной массе ВЭС зависимости $\mu = f(\bar{\tau} \times w_\tau)$ при разных величинах энергии первого импульса имеют максимум, то есть с увеличением относительной

величины времени задержки $\bar{\tau}$ величина удельной энергетической эффективности возрастает до некоторого значения μ_{\max} и при дальнейшем изменении величины $\bar{\tau}$ происходит ее спад. Однако при большей энергии первого импульса максимум функции $\mu = f(\bar{\tau} \times w_\tau)$ сдвигается в сторону меньших значений времени задержки. Такая ситуация вызвана тем, что энергия второго импульса от накопителя C_2 в зависимости от энергии первого импульса W_1 при тех же временах задержки между импульсами вводится в различные объемы плазменного канала [13]. Чем больше энергия первого импульса, тем в больший объем плазменного канала происходит выделение энергии из емкости C_2 , и, как следствие, при меньших временах задержки между импульсами увеличение давления в канале ВЭХВ не достигает уровня критического давления (22,5 МПа), необходимого для протекания самоподдерживающихся экзотермических реакций ВЭС. В результате самоподдерживающиеся экзотермические реакции затухают,

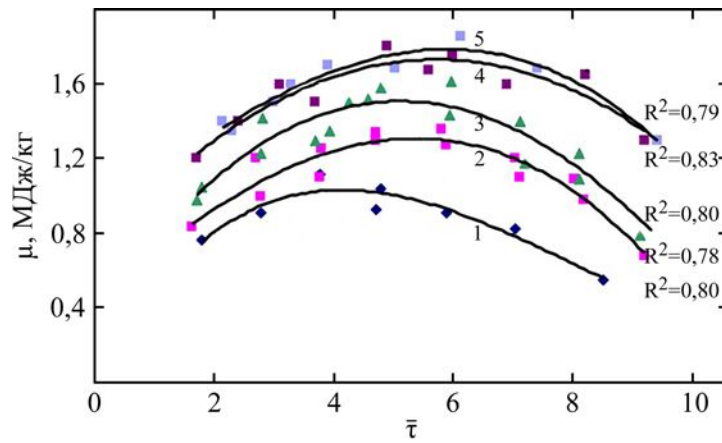


Рис. 6. Зависимость удельной энергетической эффективности μ ВЭС от параметра w_τ и величины $\bar{\tau}$ для управляемого ВЭХВ при $M = 3 \times 10^{-4}$ кг; $W_1 = 45$ Дж: 1 – $w_\tau = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг; 2 – $w_\tau = 2,0 \times 10^6$ Дж/кг; 3 – $w_\tau = 2,5 \times 10^6$ Дж/кг; 4 – $w_\tau = 2,7 \times 10^6$ Дж/кг; 5 – $w_\tau = 3,0 \times 10^6$ Дж/кг.

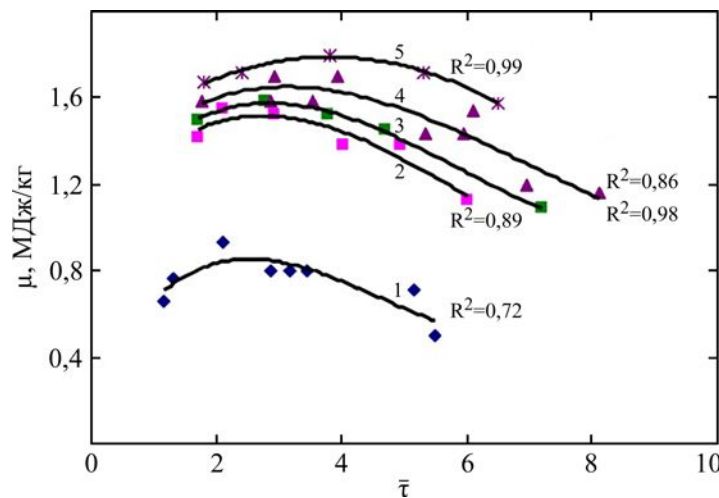


Рис. 7. Зависимость удельной энергетической эффективности μ ВЭС от параметра w_τ и величины $\bar{\tau}$ для управляемого ВЭХВ при $M = 1 \times 10^{-4}$ кг; $W_1 = 45$ Дж: 1 – $w_\tau = 3,6 \times 10^6$ Дж/кг; 2 – $w_\tau = 4,5 \times 10^6$ Дж/кг; 3 – $w_\tau = 6,0 \times 10^6$ Дж/кг; 4 – $w_\tau = 7,5 \times 10^6$ Дж/кг.

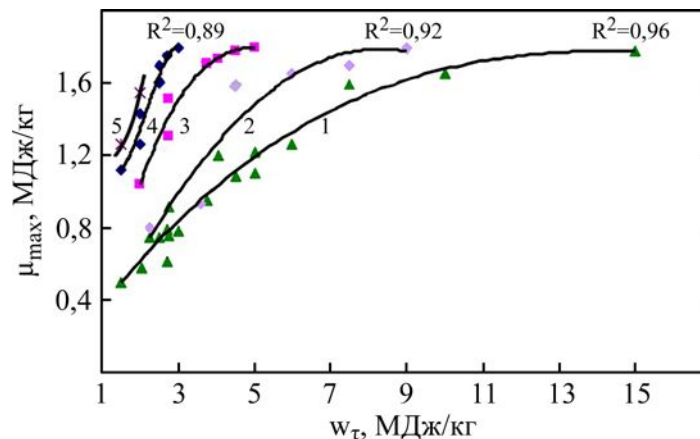


Рис. 8. Зависимости максимальной величины удельной энергетической эффективности μ_{\max} от массы ВЭС и параметра w_τ при управляемом ВЭХВ: 1 – $\mu_0 = f(w_\tau)$ при традиционном ВЭХВ; 2 – $M = 0,1 \times 10^{-3}$ кг; 3 – $M = 0,2 \times 10^{-3}$ кг; 4 – $M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг; 5 – $M = 0,4 \times 10^{-3}$ кг.

что приводит к уменьшению высвобождающейся при этом энергии.

Следует отметить, что со снижением энергии первого импульса до величины менее 45 Дж значительно повышается неустойчивость от разряда к разряду, то есть возрастает стохастич-

ность процесса ВЭХВ [14]. Следовательно, снижение энергии первого импульса до значения менее 45 Дж является нецелесообразным. Поэтому в дальнейшем, с точки зрения обеспечения эффективности и стабильности преобразования химической энергии ВЭС в канале управ-

ляемого ВЭХВ, минимально целесообразной величиной энергии первого импульса рекомендуется принять энергию, равную $W_1 = 45$ Дж.

Аналогичная тенденция наблюдалась и при других массах ВЭС в исследуемом диапазоне изменения суммарной энергии. Далее на рис. 6 и 7 приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию режимов ввода электрической энергии в канал ВЭХВ на эффективность протекания экзотермических химических реакций ВЭС массой $M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг и массой ВЭС $M = 0,1 \times 10^{-3}$ кг соответственно.

Сравнивая вид зависимостей, приведенных на рис. 4, 6 и 7, можно сделать вывод, что зависимость $\mu = \varphi(\bar{\tau})$ качественно аналогична для разных масс ВЭС: все имеют экстремум, когда обеспечивается наибольшая ее сгораемость в канале управляемого ВЭХВ.

Анализируя результаты экспериментов по влиянию параметра w_τ и режимов ввода энергии на удельную энергетическую эффективность ВЭС в канале управляемого ВЭХВ, можно сделать вывод, что при разных массах величина μ возрастает с увеличением параметра w_τ , что согласуется с результатами исследований ВЭХВ при традиционной одноконтурной схеме ГИТ для безграничного объема. При этом, однако, четко прослеживается наличие порогового значения параметра w_τ , зависящего от массы ВЭС, выше которого эффективность ее сгорания в канале ВЭХВ повышается несущественно. Причем с увеличением массы ВЭС пороговое значение параметра w_τ уменьшается. Так, если для ВЭС массой $M = 0,3 \times 10^{-3}$ кг пороговое значение параметра w_τ находится в диапазоне $2,7 \times 10^6$ Дж/кг $\leq w_\tau \leq 3,0 \times 10^6$ Дж/кг; для массы $M = 0,2 \times 10^{-3}$ кг – соответственно в интервале $4,05 \times 10^6$ Дж/кг $\leq w_\tau \leq 5,0 \times 10^6$ Дж/кг и для $M = 0,1 \times 10^{-3}$ кг – уже выше значения $9,0 \times 10^6$ Дж/кг.

Характерно, что для выбранной ВЭС, в случае достижения параметром w_τ своего порогового значения, максимальная величина удельной энергетической эффективности μ_{\max} в канале управляемого ВЭХВ практически остается неизменной, примерно равной $1,8 \times 10^6$ Дж/кг. Значение μ_{\max} полностью согласуется с величиной μ_n при традиционном ВЭХВ с одноконтурной схемой ГИТ, которая обеспечивается при величине удельной электрической энергии $w_\tau > 10$ МДж/кг.

На рис. 8 приведены зависимости максимальной величины удельной энергетической эффективности μ_{\max} при управляемом ВЭХВ от параметра w_τ (кривые 2, 3, 4, 5), построенные по экспериментальным данным (см. рис. 4, 6 и 7) при изменении величины $\bar{\tau}$ в

интервале от 3 до 5,5 в сравнении с μ_0 при традиционной одноконтурной схеме ГИТ (кривая 1).

Анализ кривых на рис. 8 свидетельствует, что управляемый ВЭХВ позволяет существенно повысить удельную энергетическую эффективность экзотермических превращений ВЭС в разрядном канале при меньших величинах удельной электрической энергии w_τ .

Подводя итоги результатов экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что наиболее рациональными режимами ввода электрической энергии в канал ВЭХВ в исследованных диапазонах изменения энергии ГИТ (суммарной и порционной), масс используемой ВЭС являются режимы, в которых время задержки между порциями энергии, вводимыми в канал разряда, находится в пределах величины $\bar{\tau}$ от 3,0 до 5,5, так как именно в них наблюдается экстремум удельной энергетической эффективности μ_{\max} .

Что касается выбора начальных электрофизических параметров, то наиболее рациональными являются значения параметра w_τ в диапазоне $2,5 \times 10^6$ Дж/кг $\leq w_\tau \leq 4,5 \times 10^6$ Дж/кг при $E_0 = 10^6$ В/м. Выбор рационального диапазона изменения основных факторов, определяющих энергетическую эффективность экзотермических превращений исследованной ВЭС в канале управляемого ВЭХВ, позволит снизить энергопотребление ГИТ на обеспечение необходимых энергетических характеристик управляемого ВЭХВ, заданных конкретной разрядно-импульсной технологией обработки материалов.

ВЫВОДЫ

1. Основными факторами, определяющими удельную энергетическую эффективность экзотермических превращений ВЭС с 40% содержанием алюминия в канале управляемого ВЭХВ, являются наряду с величинами E_0 и w_τ масса ВЭС и режимы ввода электрической энергии в его канал (энергии суммарная и порционная, соотношения порций энергий, последовательно вводимых в канал ВЭХВ, а также время задержки между ними t_3).

2. Зависимость $\mu = \varphi(\bar{\tau})$ в исследуемом диапазоне изменения масс, отношений энергий W_2/W_1 имеет экстремум, при котором достигается наибольшая сгораемость исследованной ВЭС в канале управляемого ВЭХВ. При этом как с ростом величины соотношения энергий W_2/W_1 , так и с увеличением массы ВЭС максимум зависимости $\mu = \varphi(\bar{\tau})$ сдвигается в сторону больших временных значений.

3. Впервые для ВЭС с 40% содержанием алюминия в исследованном диапазоне изменения ее массы установлено наличие порогового значения параметра w_t , при котором ее удельная энергетическая эффективность в канале управляемого ВЭХВ достигает максимума.

4. Экспериментально обосновано, что наиболее рациональными режимами ввода электрической энергии в канал ВЭХВ в исследованных диапазонах изменения энергий ГИТ (суммарной и порционной), масс используемой ВЭС являются режимы с временем задержки между порциями энергии, вводимыми в канал, изменяющимся в интервале $3,0 \geq \bar{\tau} \geq 5,5$, так как именно в нем наблюдается экстремум удельной энергетической эффективности μ_{\max} .

При этом обоснованы рациональный выбор величины первой порции энергии, равной 45 Дж, и наиболее рациональные начальные значения электрофизических параметров: величина w_t в диапазоне $2,5 \times 10^6 \text{ Дж/кг} \leq w_t \leq 4,5 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$ при $E_0 = 10^6 \text{ В/м}$. Это позволит сократить энергопотребление ГИТ на обеспечение необходимых энергетических характеристик ВЭХВ, заданных конкретной разрядно-импульсной технологией обработки материалов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гульий, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*, Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Ищенко, Ж.Н., Поздеев, В.А., *Деформирование и запрессовка труб электровзрывом*, Николаев: Атолл, 2003, 212 с.
3. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*, Киев: Наукова думка, 1986, 208 с.
4. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатный, Г.П., Импульсные электроразрядные технологии в строительстве, *Будівництво України*, 2008, № 10, с. 29.
5. Герасимов, Б.В., Поздеев, В.А., Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсной технологии запрессовки труб в трубных решетках, *Сборник научных трудов Ин-та импульсных процессов и технологий НАН Украины. Физико-технические аспекты электровзрывного преобразования энергии*, Киев: 1990. с. 85.
6. Uri Andres, Aggregate breakdown by high voltage electrical pulse. Patent G.B. 2421203, 2006.
7. Анников, В.Э., Кондриков, Б.Н., Гульий, Г.А., Вовченко, А.И., Иванов В.В., *Экзотермический состав для создания высоких и сверхвысоких*

давлений. Авторское свидетельство № 1280749, 1986.

8. Rizun, A.R., Posdeev V.A. and Golen', Yu.V., One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 263.
9. Кондриков, Б.Н., Вовченко, А.И., Анников, В.Э., Иванов, В.В., *Взрывные превращения электрической и химической энергий*, Киев: Наукова думка, 1987. 128 с.
10. Вовченко, А.И., Посохов А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*, Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
11. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Процессы преобразования энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 5, с. 41.
12. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Способ реализации высоковольтного электрохимического взрыва в жидкой среде. Украина, пат. 120558, 2019. Бюл. № 24.
13. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Блащенко, А.Д., Старков И.Н., Повышение эффективности высоковольтных электроразрядных установок, использующих экзотермические дисперсные среды, *Технічна електродинаміка*, 2019, № 5, с. 77.
14. Sergey Kozyrev, Control system of discharge-pulse installation with elements of artificial intelligence, *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON 2019. – Proceedings 8879816*, p. 513.

Summary

The analysis of the results of experimental studies of the influence of changes in the initial conditions on the energy characteristics of a controlled high-voltage electrochemical explosion (HVECE) is carried out, the main factors affecting the specific energy efficiency of chemical transformations of a water-filled exothermic medium (WFEM) in its discharge channel are determined. The range of rational changes in the main factors has been established in which an increase in the specific energy efficiency of exothermic transformations of the WFEM in the channel of the controlled HVECE is ensured. This will make it possible to reduce the weight and size characteristics and power consumption of the pulse current generator to ensure the necessary energy characteristics of the controlled HVECE, specified by a specific discharge-pulse technology.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, water-filled exothermic medium, pulse current generator, controlled energy input, discharge channel, exothermic chemical reaction, specific energy efficiency