

Параметры высоковольтного электрохимического взрыва в условиях управляемого ввода электрической энергии

^{*,**} А. И. Вовченко, Л. Ю. Демиденко

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

Поступила 19.11.2019

После доработки 05.12.2019

Принята к публикации 18.02.2020

Экспериментально в условиях управляемого ввода электрической энергии в разрядный канал высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) исследована эффективность протекающих в нем экзотермических реакций. Уточнены основные факторы, влияющие на эффективность экзотермических превращений в разрядном канале и определяющие интегральные энергетические параметры ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии. Впервые обосновано, что эффективность протекания экзотермических реакций в разрядном канале ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии определяют, наряду с двумя электрофизическими величинами: напряженностью электрического поля в разрядном промежутке и удельной электрической энергией, суммарная энергия генератора импульсных токов и масса экзотермического состава. Установлено, что рациональный выбор удельной электрической энергии, режимов ввода энергии и массы экзотермического состава позволяет более чем в 2,5 раза повысить эффективность экзотермических превращений в разрядном канале ВЭХВ по сравнению с традиционным энерговодом.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, разрядный канал, экзотермический состав, генератор импульсных токов, экзотермическая реакция, удельная электрическая энергия, эффективность

УДК 532:537

DOI: 10.5281/zenodo.3747849

ВВЕДЕНИЕ

Высокопроизводительные технологические процессы с использованием взрывного преобразования энергии находят в настоящее время все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Одним из источников для реализации взрывных технологий является высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ). Этому физическому явлению, которое реализуется при введении в плазменный подводный канал высоковольтного электро-разряда (ВЭР) экзотермических составов, химическое превращение которых происходит в режиме горения и увеличивает интегральную энергию в канале ВЭХВ, посвящено в настоящее время значительное число научных публикаций [1–9].

Анализ используемых гомогенных и гетерогенных экзотермических составов (ЭС) для реализации ВЭХВ показал, что наиболее рациональными со всех точек зрения (взрывобезопасность, доступность, простота изготовления, стоимость, потенциальная энергоемкость и т.п.) являются водонаполненные алюминийсодержащие гетерогенные составы [1]. На практике в основном применяются ЭС с 40 и более процентным содержанием алюминия разной дисперсности [9, 10], обеспечивающие наибольшее дополнительное энерговыделение за

счет химических превращений по сравнению с ЭС, содержащими меньший процент горючего металла. Кроме того, для ЭС, содержащих более 40% алюминия, минимальный уровень внешнего давления (критическое давление), при котором наблюдается самоподдерживающееся горение ЭС, практически остается постоянным и равным порядка 23 МПа [1].

Анализ технической реализации известных разрядно-импульсных технологий (РИТ), использующих ВЭХВ либо в открытых камерах больших объемов (условно назван безграничным объемом) либо в ограниченных замкнутых или даже малых объемах жидкости (скважины, шпур и т.п.), показал, что до настоящего времени в них применяется традиционная одно-контурная схема генератора импульсных токов (ГИТ) с емкостным накопителем энергии [1–3, 8, 9]. При этом максимально возможное выделение тепловой энергии за счет химических превращений ЭС в безграничном объеме составляет не более 20% [1], а в ограниченных объемах – до 35% от потенциально возможной химической энергии [10]. Неполнота сгорания в канале ВЭХВ алюминий содержащих ЭС обусловлена тем, что их окисление протекает сравнительно медленно, в режиме взрывного горения [1], а время существования необходимых термодинамических условий горения (в первую очередь давления) ограничено (время

порядка 10^{-5} с) вследствие нестационарности процесса (быстрое расширение канала ВЭХВ). При резком падении давления в канале разряда ниже критического значения экзотермические реакции прекращаются, что приводит к уменьшению высвобождающейся при этом тепловой энергии.

Одним из перспективных и достаточно простых способов повышения эффективности преобразования химической энергии в канале ВЭХВ является увеличение времени поддержания в канале ВЭХВ давления на уровне критического за счет управляемого ввода электрической энергии в канал разряда на базе многоконтурных ГИТ [1, 11–13]. При таком способе энергия ГИТ вводится в канал разряда последовательными импульсами с регулируемой временной задержкой между ними. Некоторые результаты исследований параметров ВЭХВ на основе применения, например, двухконтурных емкостных ГИТ, подтверждающие перспективность этого способа, приведены в работе [13]. В этой связи представляет научный и практический интерес проведение целенаправленных исследований, в первую очередь энергетических характеристик ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ранее экспериментально установлено [1], что при реализации ВЭХВ в безграничном объеме с использованием традиционной одноконтурной схемы ГИТ удельная эффективность экзотермических превращений $\mu_0 = W_x/M$ (где W_x – тепловая энергия химических превращений, Дж; M – масса ЭС, вводимых в разрядный промежуток, кг) определяется двумя электрофизическими факторами:

– начальной напряженностью E_0 электрического поля в разрядном промежутке:

$$E_0 = U/l \text{ (В/м)}, \quad (1)$$

где U – напряжение, приложенное к разрядному промежутку, В; l – длина разрядного промежутка, м;

– удельной электрической энергией w_τ :

$$w_\tau = \frac{W_\tau}{M}, \quad (2)$$

где W_τ – электрическая энергия, выделившаяся в канале ВЭХВ, Дж.

При ВЭХВ в ограниченном объеме удельная эффективность экзотермических превращений μ зависит не только от основных электрофизических факторов E_0 и w_τ , но и от безразмерного обобщенного параметра y , учитывающего

начальные параметры энергоисточника и основные характеристики (геометрические размеры) ограниченного объема [10].

Цель данной работы – исследовать энергетические характеристики ВЭХВ в зависимости от режимов ввода электрической энергии и массы ЭС, вводимых в межэлектродный промежуток, для уточнения основных факторов, определяющих эффективность протекания экзотермических реакций, и увеличения эффективности экзотермических превращений в разрядном канале.

Экспериментальные исследования проводились в технологическом баке объемом 1 м^3 , заполненном водой. Для ввода ЭС в зону плазменного канала его предварительно помещали в диэлектрические капсулы, в торцах которых устанавливались токопроводящие электроды из меди. Затем такая капсула с ЭС устанавливалась в водный межэлектродный промежуток. Для экспериментов в работе, исходя из сравнительного анализа кислородного баланса, удельной проводимости и теоретических оценок теплового эффекта химических превращений с использованием закона Гесса разных ЭС, был выбран состав с 40% содержанием алюминия разной дисперсности. Масса ЭС варьировалась в диапазоне $(0,1-0,3) \cdot 10^{-3}$ кг, а суммарная энергия двухконтурного ГИТ W_0 изменялась от 400 до 810 Дж. При этом широкий диапазон изменения режимов управляемого ввода энергии обеспечивался варьированием энергий W_1 и W_2 путем изменения емкости накопителей энергии C_1 и C_2 , а также регулируемой задержки времени t_z подключения C_2 в разрядный контур по отношению к моменту включения C_1 . Собственные индуктивности каждого из контуров L_1 и L_2 определялись из опытов короткого замыкания и на протяжении экспериментов не изменялись: $L_1 = 6,8 \cdot 10^{-6}$ Гн и $L_2 = 3,54 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Параметры управляемого ГИТ выставлялись так, чтобы в каждой серии экспериментов суммарная энергия двух контуров равнялась энергии традиционного одноконтурного ГИТ, и регулировались изменением емкостей C_1 от 0,1 до 0,4 мкФ и C_2 от 1,23 до 6,53 мкФ. Соответственно величина соотношения энергий W_2/W_1 изменялась в интервале от 2,0 до 17,0; зарядные напряжения составляли $U_1 = 30 \cdot 10^3$ В и $U_2 = 25 \cdot 10^3$ В. Учитывая многофакторность процесса, все исследования проводились при неизменной длине межэлектродного промежутка $l = 3 \cdot 10^{-2}$ м, которая определялась из условия обеспечения начальной напряженности электрического поля в разрядном промежутке с максимальной эффективностью сгорания ЭС [1].

В экспериментах в процессе одного разряда регистрировались временные зависимости падения напряжения на разрядном промежутке $U(t)$, тока разряда $i(t)$, профиля волны давления в среде $P(t)$ в экваториальной плоскости на расстоянии 300 мм от канала разряда и периода пульсации T_p послеразрядной парогазовой полости (ПГП). Величина T_p определялась как интервал времени между пиками давления, формирующимися при ударном расширении канала разряда и первом схлопывании – расширении ПГП. Влияние режимов ввода электрической энергии на эффективность экзотермических превращений оценивалась путем сравнения с режимами традиционного одноконтурного ГИТ. При этом в качестве объективного критерия высвобождения химической энергии ЭС использовалась величина удельной энергетической эффективности сгорания μ , определение которой осуществлялось согласно методологии, приведенной в работе [1].

На первом этапе при неизменных величине удельной электрической энергии w_τ и массе ЭС исследовали влияние соотношений энергий W_2/W_1 , последовательно вводимых в канал разряда, и временного интервала между ними t_z на эффективность протекания экзотермических химических реакций.

На втором этапе проводились исследования влияния удельной электрической энергии w_τ , массы ЭС и режимов ввода электрической энергии на эффективность экзотермических превращений при ВЭХВ. Для удобства сравнения результатов эффективности преобразования химической энергии при разных режимах ввода электрической энергии в данной работе величины удельной энергетической эффективности μ , время задержки t_z были приведены в соответствие со значениями μ_0 , $t_0 = \pi \cdot (L_1 \cdot C_1)^{1/2}$ и представлены относительными величинами:

$$\bar{\mu} = \mu / \mu_0, \quad (3)$$

где μ_0 – эффективность сгорания в канале разряда единицы массы ЭС при традиционном варианте ВЭХВ, Дж/кг; μ – эффективность сгорания в канале разряда единицы массы ЭС при ВЭХВ с управляемым вводом энергии, Дж/кг:

$$\bar{\tau} = t_z / t_0, \quad (4)$$

где $t_0 = \pi (L_1 \cdot C_1)^{1/2}$ – характерное время первого импульса, мкс.

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований по влиянию режимов ввода электрической энергии на эффективность протекания экзотер-

мических реакций при ВЭХВ при постоянных величинах $w_\tau = 2,0 \cdot 10^6$ Дж/кг, массе $M = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг и напряжении $U_2 = 25$ кВ приведены на рис. 1 в виде зависимостей $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$, построенных на основе экспериментальных данных (обозначены точками) для двух соотношений энергии. Там же показана их аппроксимация полиномиальной зависимостью третьей степени, выполненная с помощью стандартной функции – линии тренда программного обеспечения Microsoft Excel, достоверность аппроксимации R^2 приведена для каждой кривой. Как видно (рис. 1), зависимости $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$ для разных соотношений энергий W_2/W_1 имеют аналогичный вид, есть экстремум кривых $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$. Причем с ростом величины соотношения энергий W_2/W_1 экстремум сдвигается в сторону больших временных значений. Величина соотношения энергий W_2/W_1 так же, как и временная задержка t_z , оказывают существенное влияние на эффективность протекания экзотермической химической реакции в условиях управляемого ввода энергии. Так, при соотношении $W_2/W_1 = 3,4$ повысить эффективность сгорания ЭС в условиях управляемого ввода энергии по сравнению с традиционным вариантом удастся незначительно. Однако при увеличении соотношения W_2/W_1 до 7,9 эффективность преобразования химической энергии в условиях управляемого ввода энергии повышается по сравнению с традиционным вариантом более чем в 1,5 раза. При этом следует отметить, что с ростом величины соотношения энергий W_2/W_1 значительно расширяется диапазон временного интервала задержки t_z , в котором эффективность протекания экзотермической химической реакции в условиях управляемого ввода энергии превышает ее значение по сравнению с традиционным вариантом. Такая же тенденция наблюдалась и при других величинах удельной электрической энергии в пределах исследуемого диапазона суммарной энергии ГИТ.

Анализ результатов экспериментов по влиянию суммарной энергии ГИТ и режимов ввода электрической энергии, изменяющихся посредством вариации соотношений энергий W_2/W_1 , показал, что эффективность преобразования химической энергии в канале ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии существенно зависит от величины энергии первого импульса W_1 . Экспериментально установлено, что при величине энергии первого импульса, равной 45 Дж ($\leq 0,1 W_0$), эффективность преобразования химической энергии в условиях управляемого ввода

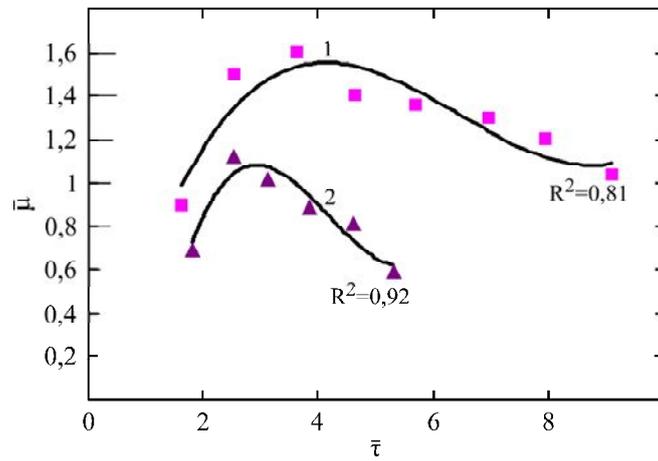


Рис. 1. Зависимость относительной величины удельной энергетической эффективности $\bar{\mu}$ при ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии от относительной величины времени задержки $\bar{\tau}$ при $w_{\tau} = 2,0 \cdot 10^6$ Дж/кг; $W_0 = 400$ Дж; $U_2 = 25 \cdot 10^3$ В. 1 – $W_2/W_1 = 7,9$; 2 – $W_2/W_1 = 3,4$.

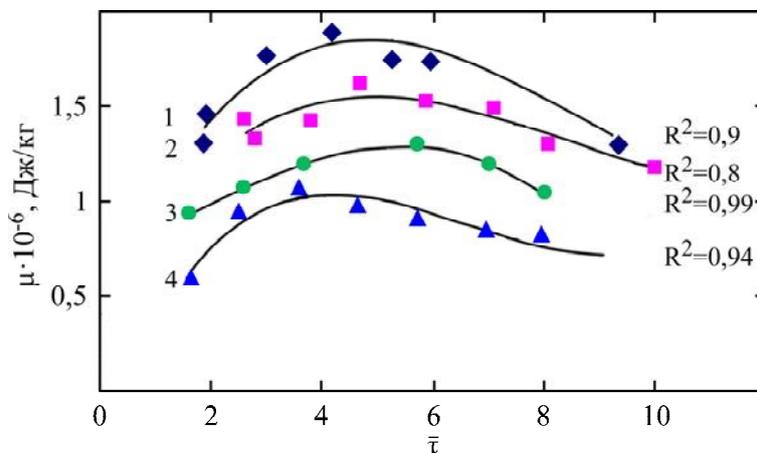


Рис. 2. Зависимость удельной энергетической эффективности μ при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии от относительной величины времени задержки $\bar{\tau}$ для $M = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг и $W_1 = 45$ Дж. 1 – $w_{\tau} = 4,05 \cdot 10^6$ Дж/кг; 2 – $w_{\tau} = 3,75 \cdot 10^6$ Дж/кг; 3 – $w_{\tau} = 2,75 \cdot 10^6$ Дж/кг; 4 – $w_{\tau} = 2,0 \cdot 10^6$ Дж/кг.

энергии наибольшая. Поэтому во всех дальнейших экспериментах энергия первого импульса была принята постоянной $W_1 = 45$ Дж, при этом соотношение W_2/W_1 изменялось в интервале от 9 до 17.

При постоянной массе ЭС влияние удельной электрической энергии w_{τ} в исследуемом диапазоне изменения суммарной энергии ГИТ на эффективность экзотермических превращений при ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии иллюстрирует рис. 2. Из представленных зависимостей $\mu = f(\bar{\tau})$ следует, что удельная энергетическая эффективность μ возрастает с увеличением w_{τ} . Это согласуется с результатами исследований ВЭХВ при традиционной одноконтурной схеме ГИТ для безграничного объема и может служить косвенным подтверждением гипотезы относительно механизма влияния величины w_{τ} на μ , связанного с возрастанием температуры и давления в канале и улучшением условий для эффективного протекания экзотермической реакции окисления ЭС.

Из характера изменения зависимостей $\mu = f(\bar{\tau})$ (рис. 2) видно, что вначале при разных величинах удельной энергии с увеличением времени задержки эффективность преобразования химической энергии повышается, затем при определенном времени задержки достигает максимума, при котором обеспечивается наибольшая сгораемость ЭС при ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии и дальнейшее увеличение времени задержки становится неэффективным. Обусловлено это, как отмечено в работе [13], изменениями давления в канале разряда, величина которого до определенного времени задержки подключения емкости C_2 поддерживается на уровне, превышающем 23 МПа, обеспечивая протекание самоподдерживающейся химической реакции за счет ввода второй порции энергии. Чем на более поздних стадиях после начала разряда происходит выделение энергии из C_2 , тем больше объем плазменного канала, вследствие чего снижается давление в нем ниже

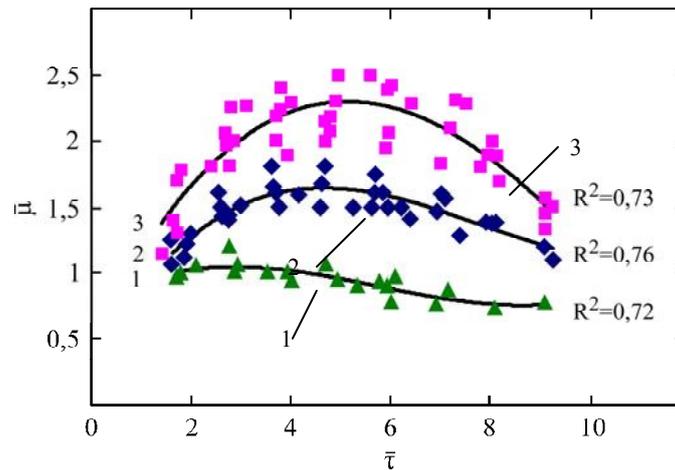


Рис. 3. Обобщенная зависимость относительной величины удельной энергетической эффективности $\bar{\mu}$ при ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии от относительной величины времени задержки $\bar{\tau}$ при $W_1 = 45$ Дж и $450 \text{ Дж} \leq W_0 \leq 810$ Дж. 1 – $M = 0,1$ г; 2 – $M = 0,2$ г; 3 – $M = 0,3$ г.

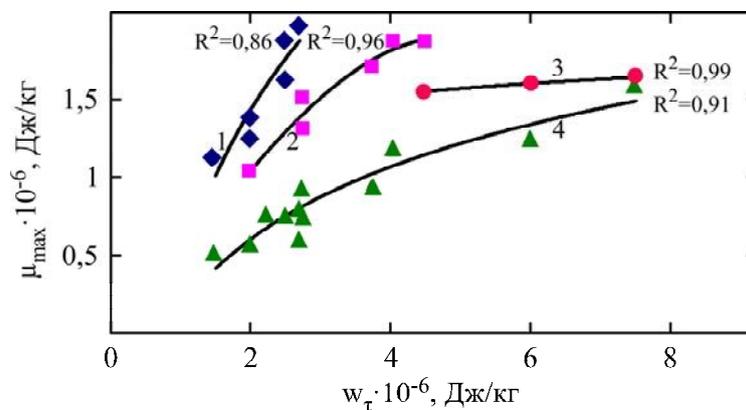


Рис. 4. Зависимости максимальной удельной энергетической эффективности μ_{\max} при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии от удельной электрической энергии w_{τ} . 1 – $M = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кг; 2 – $M = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг; 3 – $M = 0,1 \cdot 10^{-3}$ кг; 4 – $\mu_0 = f(w_{\tau})$ при традиционном варианте ВЭХВ.

критического уровня, В результате самоподдерживающиеся экзотермические реакции затухают, что приводит к уменьшению высвобождающейся при этом энергии. Аналогичная тенденция наблюдалась и при других массах ЭС в пределах исследуемого диапазона суммарной энергии ГИТ.

По результатам экспериментальных исследований влияния изменения энергии управляемого ГИТ в исследуемом диапазоне и разных режимов ввода энергии на эффективность преобразования химической энергии ЭС в канале ВЭХВ построены обобщенные аппроксимированные по экспериментальным данным зависимости $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$ для трех разных масс ЭС, приведенные на рис. 3. Как следует из результатов исследований, представленных на рис. 1 и 3, в характере изменения зависимостей $\bar{\mu} = \varphi(\bar{\tau})$ наблюдается качественное сходство: во всех случаях при увеличении $\bar{\tau}$ эффективность экзотермических превращений возрастает и достигает своего максимального значения.

При этом с ростом величины соотношения энергий W_2/W_1 и увеличением массы ЭС экстремум сдвигается в сторону больших временных значений. Из представленных результатов (рис. 3) следует, что при ВЭХВ в условиях управляемого ввода электрической энергии за счет изменения в исследуемом диапазоне суммарной энергии ГИТ, массы ЭС и режимов ввода электрической энергии удельную энергетическую эффективность можно повысить примерно в 2,5 раза по сравнению с традиционным вариантом. При этом следует отметить, что с увеличением массы ЭС возрастает нестабильность относительной величины удельной энергетической эффективности от разряда к разряду, как и в случае традиционного ВЭХВ.

На рис. 4 приведены зависимости максимальной величины удельной энергетической эффективности μ_{\max} при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии от удельной электрической энергии w_{τ} (кривые 1, 2, 3) при изменении $\bar{\tau}$ в интервале от 3 до 5,5 в сравнении с μ_0 при традиционной одноконтурной схеме ГИТ (кривая 4).

Анализируя данные рис. 4, можно констатировать, что ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии позволяет при той же величине удельной энергии существенно повысить эффективность экзотермических превращений. Рациональнее при этом выбирать небольшие значения w_τ , так как, с одной стороны, с ростом величины w_τ градиент зависимости $\mu_{\max} = f(w_\tau)$ снижается (рис. 4, кривая 3), а с другой – увеличение w_τ связано с возрастанием энергоемкости ГИТ и соответственно с повышением энергопотребления. Судя по зависимостям $\mu_{\max} = f(w_\tau)$ и $\mu_0 = f(w_\tau)$ (рис. 4), видно, что для обеспечения удельной энергетической эффективности μ , равной $1,5 \cdot 10^6$ Дж/кг при ВЭХВ по традиционному варианту, необходимая величина удельной энергии w_τ должна быть на уровне $9 \cdot 10^6$ Дж/кг. А при реализации ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии величину w_τ можно уменьшить в 3 и более раз в зависимости от массы ЭС.

Подводя итоги результатов экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что в отличие от реализации ВЭХВ при традиционной одноконтурной схеме ГИТ удельная энергетическая эффективность μ при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в безграничном объеме определяется не только двумя электрофизическими факторами: E_0 и w_τ , но и суммарной энергией двухконтурного ГИТ (W_0) и массой (M) экзотермического состава.

ВЫВОДЫ

1. Впервые обосновано, что для безграничного объема при управляемом вводе электрической энергии в канал ВЭХВ, в отличие от традиционного варианта энерговода, эффективность протекания экзотермических химических реакций в разрядном канале определяют наряду с двумя электрофизическими факторами: E_0 и w_τ , суммарная энергия ГИТ W_0 и масса M экзотермического состава, помещенного в разрядный промежуток.

2. Показано, что рациональный выбор режима ввода электрической энергии (W_0 , W_2/W_1 , t_z), величины удельной энергии w_τ и массы M экзотермического состава позволяет более чем в 2,5 раза повысить эффективность экзотермических превращений в канале ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии по сравнению с традиционным его вариантом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность ведущим инженерам Института импульсных процессов и технологий НАН Украины А.Д. Блащенко, Н.А. Онацкой и младшему научному сотруднику

И.Н. Старкову за участие в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
2. Ризун А.Р., Поздеев В.А., Голень Ю.В. *ЭОМ*. 2010, (3), 78–81.
3. Герасимов Б.В., Поздеев В.А. *Физико-технические аспекты электровзрывного преобразования энергии*: сб. науч. трудов. Киев, 1990. С. 85–89.
4. Рытов С.А. *Устройство буроньекционных свай с применением электроразрядной технологии в различных грунтовых условиях*. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: НИИ им. Н.М. Герсеева, 2009. 21 с.
5. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. *ЭОМ*. 2007, (2), 49–51.
6. Коростовенко В.В., Коростовенко Л.П., Стрекалова Т.А., Стрекалова В.А. *Международный журнал экспериментального образования*. 2013, (10, ч. 1), 129–132.
7. Рытов С.А. *Жилищное строительство*. 2010, (5), 47–50.
8. Крутиков В.С., Ризун А.Р., Голень Ю.В. *ЭОМ*. 2014, **50**(5), 84–87.
9. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. *ЭОМ*. 2008, (3), 89–91.
10. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. *ЭОМ*. 2017, **53**(5), 41–47.
11. Тевтилов Р.В. *Техническая электродинамика*. 2011, (3), 67–72.
12. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. *Способ реализации высоковольтного электрохимического взрыва в жидкой среде*. Украина, пат. 129672, 2018. Бюл. № 21. 4 с.
13. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Блащенко А.Д., Старков И.Н. *Техническая электродинамика*. 2019, (5), 77–82.

Summary

Experimentally, under the conditions of a controlled input of electric energy into the discharge channel of a high-voltage electrochemical explosion (HVECHE), the efficiency of ongoing exothermic reactions was studied. The main factors affecting the efficiency of exothermic transformations in the discharge channel and determining the integral energy parameters of the HVECHE in the conditions of a controlled input of electric energy are specified. For the first time, it has been substantiated that the efficiency of exothermic reactions in the discharge channel HVECHE in the conditions of controlled input of electric energy is determined along with two electro physical quantities: electric field strength in the discharge gap and specific electric energy, the total energy of the pulse current generator and the mass of the exothermic composition. It was established that a rational choice of the specific electric energy, the modes of energy input and the mass of exothermic composition allows a more than 2.5 times increase in the efficiency of exothermic transformations in the discharge channel HVECHE in comparison with that of the traditional energy input.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, discharge channel, exothermic composition, pulse current generator, exothermic reaction, specific electric energy, efficiency, controlled input of energy