

# Определение вклада тепловой энергии экзотермических реакций при высоковольтном электрохимическом взрыве

\*Л. Ю. Демиденко, И. Н. Старков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Богоявленский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, \*e-mail: [dpte@iipr.com.ua](mailto:dpte@iipr.com.ua), e-mail: [iipr@iipr.com.ua](mailto:iipr@iipr.com.ua)*

На основе экспериментальных исследований зависимости периода пульсации парогазовой полости (ППП) при высоковольтном электрохимическом взрыве (ВЭХВ) от величины энергии конденсаторной батареи и массы водонаполненного экзотермического состава (ВЭС) с 60% содержанием алюминия определена величина дополнительной энергии, выделившейся в канале ВЭХВ за счет химических экзотермических превращений. Показано, что с увеличением основных электрофизических факторов удельная энергетическая эффективность ВЭС возрастает, что свидетельствует об увеличении вклада в суммарную энергию ВЭХВ, выделяющуюся за счет экзотермической реакции окисления ВЭС.

*Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, экзотермический состав, тепловая энергия, парогазовая полость, эффективность преобразования энергии.*

УДК 532:537

## ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность на мировом рынке разрядно-импульсных технологий (РИТ) во многом определяется не только их эффективностью и производительностью, но и многофункциональностью за счет целенаправленной перенастройки оборудования энергоисточников, используемых для реализации РИТ. К ним можно отнести, в первую очередь, комбинированные энергоисточники на базе высоковольтного электрического разряда (ВЭР) и нетрадиционных взрывчатых веществ (ВВ), которые реализуют явление высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) [1]. Применение ВЭХВ в различных РИТ позволяет, в отличие от традиционного ВЭР, значительно расширить возможности управления силовыми характеристиками, воздействующими на объект обработки. При этом значительно снижаются массогабаритные характеристики электрогидроимпульсных установок за счет увеличения их удельной энергоемкости, а также повышаются ресурс емкостных накопителей и надежность высоковольтных узлов.

При использовании ВЭХВ важной задачей является создание начальных и граничных условий, обеспечивающих выделение в разрядном промежутке максимально возможного количества химической энергии на массу используемого экзотермического состава (ЭС). В общем случае потенциальная энергия вводимого в разрядный промежуток экзотермического состава может быть рассчитана достаточно точно. Однако в силу различных причин полного

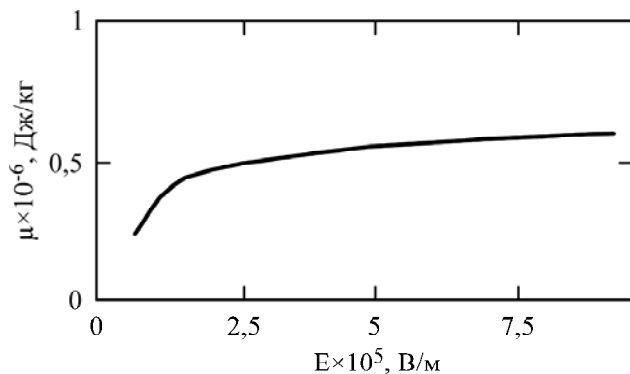
сгорания ЭС не происходит. Поэтому выделившаяся суммарная энергия в канале ВЭХВ будет меньше, чем сумма потенциальных энергий, запасенных в конденсаторной батарее и массе экзотермического состава.

В связи с этим представляет научный и практический интерес, каков вклад тепловой энергии за счет протекания экзотермических реакций в суммарную энергию при реализации ВЭХВ, поскольку от этого зависит эффективность конкретных разрядно-импульсных технологий, что и обуславливает актуальность работы.

Анализ свойств промышленных ВВ, выполненный в работе [2], показал, что наиболее приемлемыми для реализации ВЭХВ являются промышленные водонаполненные экзотермические составы (ВЭС), содержащие в качестве горючего металла алюминиевый порошок различной дисперсности [2–4]. В работе [1] рассмотрены различные варианты ВЭС и определено, что больше всего тепловой энергии выделяется в том случае, когда ВЭС содержит порядка 60% алюминия, причем 15% мелкодисперсной и 45% крупнодисперсной фракций, поэтому все исследования проводились именно с этим составом.

Очевидно, что после выбора оптимального ВЭС остается возможность управления эффективностью электровзрывного преобразования химической энергии ВЭС как за счет варьирования электрических параметров разрядной цепи  $U$ ,  $C$ ,  $L$ , длины межэлектродного промежутка  $l$ , так и массы ВЭС  $M$ . При решении задачи оптимизации характеристик ВЭХВ как функций этих параметров установлено [1], что для алюминий-

содержащего ВЭС основными электрофизическими факторами, определяющими эффективность преобразования потенциальной химической энергии ВЭС в энергию ВЭХВ, являются средняя напряженность электрического поля в разрядном промежутке  $E_0$  и удельная электрическая энергия, выделившаяся в единице массы ЭС,  $\omega_\tau$ . Так, на основе результатов ранее проведенных экспериментальных исследований определена зависимость удельной энергетической эффективности  $\mu_0$  от напряженности поля  $E_0$  при  $\omega_\tau = 0,69 \cdot 10^6$  Дж/кг для ВЭС с 60% содержанием алюминия [1], которая представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость удельной энергетической эффективности  $\mu_0$  при ВЭХВ от средней напряженности поля  $E_0$  при  $\omega_\tau = 0,69 \cdot 10^6$  Дж/кг.

Как следует из рис. 1, характер зависимости  $\mu_0 = f(E_0)$  при  $w_\tau = \text{const}$  существенно изменяется с увеличением  $E_0$ : вначале наблюдается участок крутого возрастания  $\mu_0 = f(E_0)$ , затем при значении  $E_0 \approx 2 \cdot 10^5$  В/м сменяется областью насыщения. Величина напряженности, при которой достигается максимальная величина  $\mu_0(E_0)$ , названа критической [1], то есть дальнейшее увеличение  $E_0$  выше критического не дает существенного выигрыша в величине  $\mu_0$ .

Вместе с тем в литературе отсутствует зависимость для ВЭС с 60% содержанием алюминия удельной энергетической эффективности  $\mu_0$  от удельной электрической энергии  $\omega_\tau$ .

Цель настоящей работы – по результатам экспериментальных исследований определить величину дополнительной энергии, выделившейся в канале ВЭХВ за счет химических экзотермических превращений, а также на основе полученных результатов определить зависимость удельной энергетической эффективности ВЭС с 60% содержанием алюминия от величины электрической энергии, выделившейся в единице массы ВЭС.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЕТОВ

Очевидно, что, аналогично подводному ВЭР, выделяющаяся при ВЭХВ энергия в основном

расходуется на расширение канала ВЭХВ, в результате чего в рабочей среде формируются импульс давления и парогазовая полость, однако существуют также диссипативные потери, как-то: тепловые, лучистые, турбулентные и др. В соответствии с этим об эффективности высвобождения потенциальной химической энергии экзотермического состава можно судить по параметрам излучаемой волны давления (амплитуда, длительность, импульс) и энергии парогазовой полости. Согласно [5] продолжительность прогрева алюминиевой пудры составляет порядка  $10^{-8}$  с, то есть экзотермическая реакция начинается еще в процессе ввода электрической энергии. Время горения используемых порошков составляет несколько миллисекунд, поэтому энергия, получаемая при окислении порошка, расходуется в основном на увеличение энергии парогазовой полости.

Для определения величины энергии  $\Delta W$ , выделившейся в канале ВЭХВ за счет химических экзотермических превращений, в данной работе воспользуемся тем обстоятельством, что энергия послевзрывной пульсирующей полости практически не зависит от закона выделения энергии в канале, а определяется только ее величиной [1]. Так, энергия послеразрядной парогазовой полости (ПГП) при ВЭХВ  $W_n$  может быть рассчитана исходя из ее максимального объема  $V_{\max}$  и гидростатического давления на глубине пульсации  $P_0$  по выражению:

$$W_n = V_{\max} P_0, \quad (1)$$

где  $V_{\max}$  – максимальный объем ПГП,  $\text{м}^3$ ;  $P_0$  – гидростатическое давление на глубине пульсации ПГП, Па или с использованием известной формулы Виллиса [6] по периоду ее пульсации:

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

где  $T_n$  – период пульсации ПГП, с;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

В то же время энергия послеразрядной ПГП при ВЭХВ  $W_n$  состоит из двух составляющих: энергии  $W_s$ , обусловленной выделением только электрической энергии генератора импульсных токов (ГИТ), и тепловой  $\Delta W$ , выделяющейся в результате сгорания ВЭС, то есть:

$$W_n = W_s + \Delta W, \quad (3)$$

где  $W_s$  – часть энергии ПГП, обусловленной энергией ГИТ, Дж;  $\Delta W$  – тепловая энергия, обусловленная химическими экзотермическими превращениями, Дж.

Отсюда следует, что для определения высвобождаемой при ВЭХВ химической энергии  $\Delta W$

ВЭС необходимо из общей энергии взрывной полости  $W_n$  вычесть ту ее часть  $W_3$ , которая обусловлена выделением только электрической энергии ГИТ. Последняя, согласно [7], связана с величиной электрической энергии, выделившейся в канале разряда при ВЭХВ,  $W_\tau$  соотношением вида:

$$W_3 = W_\tau [0,26 \exp(-2/3\beta) + 0,14], \quad (4)$$

где  $W_\tau$  – величина электрической энергии, выделившейся в канале разряда при ВЭХВ, Дж;  $\beta$  – безразмерный обобщенный параметр, характеризующий форму ППП, равный:

$$\beta = (W_\tau / P_0)^{1/3} l. \quad (5)$$

При этом необходимая для расчетов выделившаяся в канале ВЭХВ электрическая энергия  $W_\tau$  определялась по экспериментально регистрируемому ампер- и вольт-секундным характеристикам разрядов  $i(t)$  и  $U(t)$ :

$$W_\tau = \int_0^\tau i(t)U(t) dt, \quad (6)$$

где  $\tau$  – длительность разряда, с.

Следует отметить, что полученное таким образом значение  $\Delta W$  является нижней границей оценки выделившейся химической энергии, поскольку в данном случае не учитывается, в частности, энергия, уносимая ударной волной, распространяющейся в рабочей среде (воде). А, как показано в работе [1], при ВЭХВ амплитуда и длительность первого импульса давления возрастают по сравнению с подводным ВЭР при идентичных параметрах разрядной цепи. Однако доля этой части энергии по отношению к энергетической добавке  $\Delta W = W_n - W_3$ , расходуемой на формирование ППП, весьма мала.

Учитывая, что одну и ту же энергию ППП  $W_n$  можно получить при самых различных сочетаниях как массы ВЭС, так и энергоемкости ГИТ, абсолютная величина дополнительного энерговыделения  $\Delta W$  не является объективным критерием эффективности высвобождения потенциальной химической энергии ВЭС. Поскольку в данной работе используется один фиксированный экзотермический состав, а следовательно, и плотность его фиксирована, то таким критерием может служить величина  $\Delta W$ , отнесенная к единице массы ВЭС:

$$\mu_0 = \Delta W / M, \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – удельная энергетическая эффективность экзотермического состава при ВЭХВ, Дж/кг;  $M$  – масса ВЭС, кг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

По результатам экспериментальных исследований изменения периода пульсации ППП при ВЭХВ в зависимости от изменения начальных условий (энергия ГИТ, масса ВЭС) для экзотермического состава с 60% содержанием алюминия, используя вышеприведенные зависимости, определялась величина  $\mu_0$ . При этом параметры разрядной цепи и длина межэлектродного промежутка были равны:  $C = 3 \cdot 10^{-6}$  Ф;  $L = 3 \cdot 10^{-6}$  Гн;  $l = 2 \cdot 10^{-2}$  м, а масса ВЭС изменялась в диапазоне от  $0,3 \cdot 10^{-3}$  до  $0,7 \cdot 10^{-3}$  кг. Величина запасенной энергии варьировалась в диапазоне от 150 до 450 Дж за счет изменения зарядного напряжения  $U_0$ , соответственно величина напряженности изменялась в пределах  $9 \cdot 10^5$  В/м  $\geq E_0 \geq 5 \cdot 10^5$  В/м. В таблице приведены результаты расчетов величины  $\mu_0$ .

На рис. 2 представлена зависимость  $\mu_0 = f(\omega_\tau)$ , построенная на основе экспериментальных данных табл. 1.

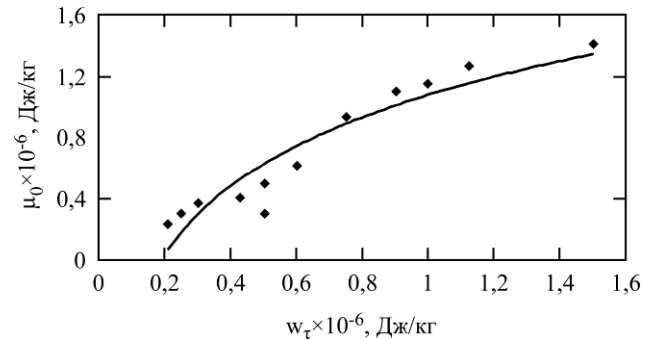


Рис. 2. Зависимость удельной энергетической эффективности  $\mu_0$  ВЭС при ВЭХВ от удельной электрической энергии  $\omega_\tau$ .

На рис. 2 показана проведенная аппроксимация экспериментальных данных (обозначенных точками) логарифмической зависимостью, описываемой уравнением

$$\mu_0 = 0,65 \ln(\omega_\tau) + 1,08, \quad (8)$$

достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9$ .

Анализируя зависимость  $\mu_0 = f(\omega_\tau)$ , можно сказать, что она качественно подобна зависимости  $\mu_0 = f(E_0)$ , то есть с увеличением  $\omega_\tau$  зависимость  $\mu_0(\omega_\tau)$  возрастает, что свидетельствует о повышении эффективности сгорания ВЭС при ВЭХВ. Однако следует отметить, что повышение эффективности электровзрывного преобразования химической энергии ВЭС за счет увеличения  $\omega_\tau$  и  $E_0$  связано с увеличением энергоемкости ГИТ, что приводит к повышению энергопотребления.

Определение величины  $\mu_0$  для ВЭС с 60% содержанием алюминия по экспериментальным данным

$W_0$ , Дж	$M \cdot 10^3$ , г	$T_n$ , мс	$W_n$ , Дж	$W_s$ , Дж	$\Delta W$ , Дж	$\omega_t \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг	$\mu_0 \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг
150	0,3	12,6	133,5	21,8	111,8	0,5	0,30
150	0,5	14,6	207,7	21,8	186,0	0,3	0,37
150	0,6	14,4	199,2	21,8	177,5	0,25	0,30
150	0,7	14,0	183,1	21,8	161,4	0,21	0,23
300	0,3	15,1	227,9	42,6	185,3	1,0	0,62
300	0,5	17,4	351,5	42,6	308,9	0,6	0,62
300	0,6	17,3	345,5	42,6	302,9	0,5	0,50
300	0,7	17,0	327,8	42,6	285,2	0,43	0,41
450	0,3	19,4	487,2	63,5	423,8	1,5	1,41
450	0,4	20,4	566,5	63,5	503,1	1,13	1,26
450	0,5	20,9	609,1	63,5	545,7	0,9	1,10
450	0,6	21,0	618,0	63,5	555,0	0,75	0,92

Величина  $\mu_0$  является объективным критерием полноты высвобождения химической потенциальной энергии ВЭС с 60% содержанием алюминия, поскольку определялась по экспериментально регистрируемому периоду пульсации ППП для вычисления  $W_n$  с использованием формулы (2) и электрическим характеристикам ВЭХВ (для расчета  $W_t$ ). Установлено, что при изменении начальных условий в исследованном диапазоне обеспечивается выделение тепловой энергии за счет экзотермических реакций не более 10% от потенциально возможной. Основной причиной этого является затухание самоподдерживающейся экзотермической реакции из-за резкого (время порядка  $10^{-5}$  с) снижения давления в разрядном канале (от сотен до десятков МПа) ниже значения 23 МПа, которое необходимо для протекания самоподдерживающейся экзотермической реакции соответствующего содержания ВЭС [1].

### ВЫВОДЫ

1. По результатам экспериментальных исследований определена величина дополнительной энергии, выделившейся в канале ВЭХВ за счет химических экзотермических превращений, и построена зависимость удельной энергетической эффективности ВЭС с 60% содержанием алюминия от величины электрической энергии, выделившейся в единице массы ВЭС.

2. Установлено, что при изменении начальных условий в исследованном диапазоне обеспечивается выделение тепловой энергии за счет экзотермических реакций не более 10% от потенциально возможной. Основной причиной этого является затухание самоподдерживающейся экзотермической реакции из-за резкого (время порядка  $10^{-5}$  с) снижения давления в разрядном канале (от сотен до десятков МПа) ниже значения 23 МПа, которое необходимо для протекания

самоподдерживающейся экзотермической реакции соответствующего содержания ВЭС [1].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
2. Кондриков Б.Н., Вовченко А.И., Анников В.Э., Иванов В.В. *Взрывные превращения электрической и химической энергии*. Киев: Наукова думка, 1987. 128 с.
3. Дубнов Л.В., Бахаревиц Н.С., Романов А.И. *Промышленные взрывчатые вещества*. М.: Недра, 1973. 316 с.
4. Кух М.А. *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Под ред. Г.И. Демидюка. М.: Недра, 1980. 455 с.
5. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С. *Горение порошкообразных металлов в активных средах*. М.: Наука, 1972. 294 с.
6. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 151 с.
7. Вовченко А.И., Кучеренко В.В., Шамко В.В. *Журнал прикладной механики и технической физики*. 1978, (5), 58–64.

Поступила 24.01.17

### Summary

On the base of experimental studies of the dependence between the period of pulsation of the gas-vapor cavity (GVC) during the high-voltage electric explosion (HVVE) and the amount of energy of a capacitor bank and the weight of the water-filled exothermic compound (WEC) with 60% content of aluminum, we determined the value of additional energy released in the HVVE channel due to exothermic chemical reactions. It was shown that, with an increase in the basic electric and physical factors, the specific energy efficiency of the WEC increases, indicating a growing contribution of the energy released through the WEC exothermic oxidation reaction to the total HVVE energy.

*Keywords: high-voltage electrochemical explosion, exothermic compound, thermal energy, gas-vapor cavity, energy conversion efficiency.*