

Алгоритм расчета параметров комбинированного электроразрядного источника энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах

А. И. Вовченко, Л. Ю. Демиденко, И. Н. Старков

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

На основе данных экспериментальных исследований разработан алгоритм расчета параметров комбинированных электроразрядных источников энергии с использованием высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) (параметры генератора импульсных токов, длина разрядного промежутка и масса экзотермического состава), обеспечивающих заданные технологией энергетические характеристики при ВЭХВ в ограниченном объеме. Для исключения многовариантности решений по предложенному алгоритму рекомендуется использовать в качестве критерия оптимизации количество высвобождающейся химической энергии, отнесенное к единице, вводимой в канал ВЭХВ электрической энергии.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, экзотермический состав, параметры комбинированного электроразрядного источника энергии, парогазовая полость, эффективность преобразования энергии, ограниченный объем.

УДК 532:537

DOI: 10.5281/zenodo.1297941

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение в самых различных областях промышленного производства получают высокопроизводительные технологии, основанные на импульсном воздействии на обрабатываемый объект (магнитно-импульсная штамповка и запрессовка труб, лазерная обработка и др.), в том числе разрядно-импульсные технологии (РИТ) на базе высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в конденсированных средах. Наряду с высокой производительностью и простотой реализации эти технологии характеризуются экологической чистотой, минимальными энергозатратами по сравнению с традиционными способами обработки и в большинстве своем являются безотходными.

В Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины ранее были выполнены исследования [1], которые показали, что использование высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) в различных РИТ позволяет расширить сферу применения технологий импульсной обработки материалов (например, электрогидроимпульсной запрессовки труб, штамповки, очистки отливок, разрушения негабаритов и др.). Обусловлено это тем, что при идентичных характеристиках генератора импульсных токов (ГИТ) при использовании ВЭХВ возрастают амплитуда и длительность генерируемого импульса сжатия, а также интен-

сивность гидропотоков жидкости. Кроме того, ВЭХВ предоставляет дополнительные возможности управления технологическими параметрами промышленных установок посредством выбора экзотермической среды (ЭС), варьирования ее ингредиентного состава и массы в разрядном промежутке при неизменных электрических параметрах ГИТ, что позволяет воздействовать на обрабатываемый объект импульсными нагрузками наиболее оптимальной формы в каждом конкретном случае.

Анализ технической реализации разных РИТ на базе ВЭХВ показал, что в ряде из них высоковольтный электрохимический взрыв может осуществляться либо в открытых камерах больших объемов (условно названных «безграничный объем»), либо в ограниченных замкнутых или даже малых объемах жидкости. Несомненно, что ВЭХВ применительно к каждой конкретной технологии должен осуществляться при условиях, которые гарантированно обеспечивали бы наиболее высокую эффективность преобразования электрической и химической энергий в другие виды энергии.

Установлено [2], что в отличие от ВЭХВ в безграничном объеме удельная энергетическая эффективность экзотермических реакций μ , равная величине дополнительного энерговыделения ΔW , отнесенной к единице массы ЭС, при ВЭХВ в ограниченном объеме зависит не только от основных электрофизических факторов: удельной электрической энергии w_t (кДж/кг) и

начальной напряженности электрического поля E_0 (В/м), но и от безразмерного обобщенного параметра γ , характеризующего влияние ограниченного объема на процесс преобразования энергии в этих условиях, который равен отношению ограниченного объема V_k к объему парогазовой полости (ПГП) V_p при ее пульсации в безграничном объеме, то есть $\mu = f(w_\tau, E_0, \gamma)$. Алгоритм расчета комбинированного энергоисточника с использованием ВЭХВ, разработанный для безграничного объема [1], естественно не учитывает влияния ограниченного объема (параметр γ) на удельную эффективность экзотермических реакций. Принимая во внимание, что во многих РИТ [3–7] ВЭХВ осуществляется в условиях ограниченных замкнутых, причем часто «малых объемах» жидкости, разработка алгоритма расчета параметров комбинированного электро-разрядного источника с использованием ВЭХВ в ограниченных объемах применительно к потребностям конкретных разрядно-импульсных технологий является актуальной научно-технической задачей.

Цель данной работы – развитие алгоритма расчета параметров комбинированного электро-разрядного источника с использованием ВЭХВ в ограниченных объемах применительно к потребностям конкретных разрядно-импульсных технологий.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА

Рассмотрим расчет параметров комбинированного электро-разрядного источника энергии, исходя только из заданных энергетических характеристик устройств на базе ВЭХВ для ограниченных объемов, воспользовавшись подходом, изложенным в работе [1].

При этом исходными величинами для расчета являются необходимая суммарная энергия W_n , которая задается конкретной разрядно-импульсной технологией, и объем камеры V_k . Эта суммарная энергия W_n комбинированного источника ВЭХВ, высвобождаемая в процессе одного разряда в ограниченном объеме, определяется выражением:

$$W_n = W_{\tau\gamma} + \Delta W_\gamma, \quad (1)$$

где W_n – суммарная энергия комбинированного электро-разрядного источника, Дж; $W_{\tau\gamma}$ – электрическая энергия, выделившаяся из емкостного накопителя, при ВЭХВ в ограниченном объеме, Дж; ΔW_γ – тепловая энергия, выделившаяся при сгорании ЭС, при ВЭХВ в ограниченном объеме, Дж.

Выражая электрическую и тепловую энергии в формуле (1) через удельные энергетические

характеристики, величину W_n можно записать в виде:

$$W_n = M_\gamma \cdot w_{\tau\gamma} + M_\mu \cdot \mu, \quad (2)$$

где μ – удельная энергетическая эффективность ЭС при ВЭХВ в ограниченном объеме, Дж/кг; M_γ – масса ЭС при ВЭХВ в ограниченном объеме, кг; $w_{\tau\gamma}$ – удельная электрическая энергия, то есть электрическая энергия, выделившаяся в канале разряда, приходящаяся на единицу массы ЭС, при ВЭХВ в ограниченном объеме, Дж/кг.

Из уравнения (2) при известных удельных энергетических характеристиках μ и $w_{\tau\gamma}$ можно определить необходимые величины $W_{\tau\gamma}$ и M_γ .

Поскольку в работе [3] показано, что критерием, определяющим удельную эффективность протекания химических реакций μ при ВЭХВ в ограниченных объемах, является безразмерный обобщенный параметр $\gamma = V_k/V_p$, необходимо предварительно вычислить значение γ .

Для этого, используя подход, предложенный в работе [1], запишем уравнение (2) для безграничного объема:

$$W_n = W_\tau (1 + \mu_0 / w_\tau), \quad (3)$$

где W_τ – электрическая энергия, выделившаяся в канале разряда при ВЭХВ в безграничном объеме, Дж; μ_0 – удельная энергетическая эффективность ЭС при ВЭХВ в безграничном объеме, Дж/кг; w_τ – удельная электрическая энергия при ВЭХВ в безграничном объеме, Дж/кг; или же через массу:

$$W_n = M_{\text{ЭС}} (w_\tau + \mu_0), \quad (4)$$

где $M_{\text{ЭС}}$ – масса ЭС при ВЭХВ в безграничном объеме, кг.

По выбранному значению w_τ и ранее полученной аппроксимационной зависимости (рис. 1) определяем удельную энергетическую эффективность μ_0 ЭС при ВЭХВ в безграничном объеме.

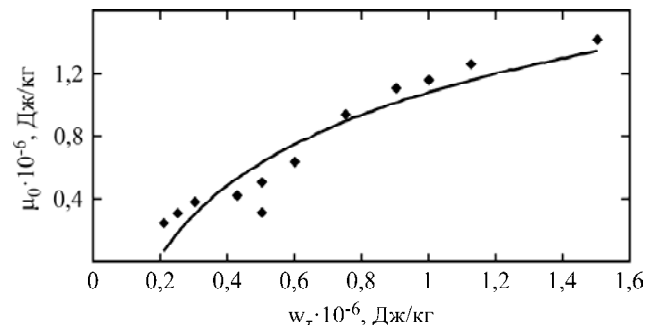


Рис. 1. Зависимость удельной энергетической эффективности μ_0 ЭС при ВЭХВ в безграничном объеме от удельной электрической энергии w_τ .

Далее рассчитываем, используя соотношения (3) и (4), необходимые для реализации соответствующего технологического процесса в безгра-

ничном объеме электрическую энергию W_τ и массу ЭС $M_{эс}$. Затем определяем суммарную расчетную энергию ПГП при ВЭХВ в безграничном объеме W_{cp} :

$$W_{cp} = W_3 + \Delta W, \quad (5)$$

где ΔW – высвобождающаяся химическая энергия при ВЭХВ в безграничном объеме ($\Delta W = \mu_0 \cdot M_{эс}$), Дж; W_3 – часть энергии ПГП, обусловленная выделением электрической энергии ГИТ, Дж, которая согласно [1] связана с W_τ соотношением вида:

$$W_3 = W_\tau [0,26 \exp(-2/3\beta)] + 0,14, \quad (6)$$

где β – коэффициент формы ПГП, который определяется выражением:

$$\beta = (W_\tau / P_0)^{1/3} \cdot l^{-1}, \quad (7)$$

где P_0 – гидростатическое давление на глубине ВЭХВ, Па ($P_0 = 1,06 \cdot 10^5$ Па); l – длина межэлектродного промежутка, м.

Следует отметить, что в этом случае расчеты соответствуют сферической форме ПГП [1].

Затем, используя подход, изложенный в работе [1], определяем расчетную максимальную величину объема ПГП сферической формы при ВЭХВ в безграничном объеме, а следовательно, и искомую величину обобщенного параметра γ .

Далее по графику зависимости $\mu/\mu_0 = f(\gamma)$ (рис. 2) или с помощью аппроксимационной зависимости $\mu/\mu_0 = 1,92 \cdot \gamma^{-0,48}$ [3] по найденному значению γ находим коэффициент $K = \mu/\mu_0$, с помощью которого определяем величину удельной энергетической эффективности μ при ВЭХВ в ограниченном объеме:

$$\mu = K \cdot \mu_0, \quad (8)$$

где K – экспериментально полученный коэффициент.

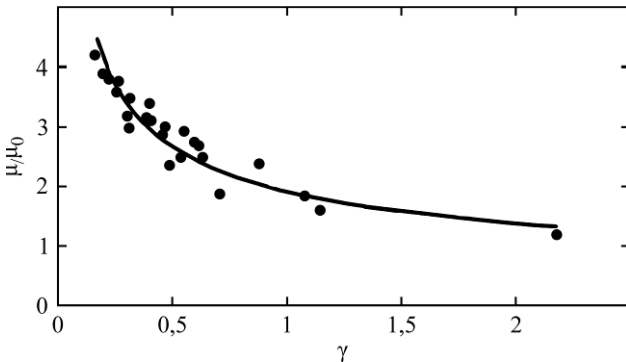


Рис. 2. Зависимость относительной величины удельной энергетической эффективности μ/μ_0 ВЭС от обобщенного параметра γ .

Следует отметить, что при значении величины $\gamma \geq 0,75$ увеличивается нестабильность относительной величины удельной энергетической

эффективности μ/μ_0 (см. рис. 2), поэтому для обеспечения стабильного и эффективного энерговыделения при ВЭХВ в ограниченных объемах целесообразно соблюдать $\gamma \leq 0,75$.

Затем находим массу M_γ ЭС для осуществления ВЭХВ в ограниченном объеме из выражения (2) при выполнении условия $w_\tau \cong w_{\tau\gamma}$, тогда

$$M_\gamma = W_n / w_\tau (1 + K \cdot \mu_0 / w_\tau), \quad (9)$$

и после этого определяем количество высвобождающейся химической энергии ΔW_γ при сгорании ЭС в заданном ограниченном объеме:

$$\Delta W_\gamma = \mu \cdot M_\gamma. \quad (10)$$

Зная количество высвобождающейся химической энергии ΔW_γ при ВЭХВ в ограниченном объеме, с учетом обеспечения необходимой суммарной энергии W_n , определяем величину электрической энергии $W_{\tau\gamma}$ при ВЭХВ в ограниченном объеме:

$$W_{\tau\gamma} = W_n - \Delta W_\gamma. \quad (11)$$

Следует отметить, что при выбранной величине удельной электрической энергии w_τ и реализации ВЭХВ в ограниченном объеме по сравнению с его осуществлением в безграничном объеме величина электрической энергии, инициирующая протекающие в разрядном канале экзотермические химические превращения, существенно уменьшается, что приводит к значительному снижению массогабаритных характеристик электрогидроимпульсных установок (ЭГУ). При этом наблюдается существенное возрастание вклада энергии за счет экзотермических превращений в суммарную энергию ВЭХВ, что свидетельствует о значительном увеличении полноты сгорания частиц алюминия при ВЭХВ в ограниченных объемах и, следовательно, о повышении при этом эффективности химических превращений.

С учетом того, что использование ЭС сводит к минимуму предпробивные потери, принимаем $W_{\tau\gamma} \cong W_0$. Емкость накопителя рассчитываем исходя из технически допустимой величины зарядного напряжения U_0 , определяемой типом используемых конденсаторов, которые выбираются из разработанного в ИИПТ НАН Украины параметрического ряда, по выражению:

$$C = 2W_0 / U_0^2. \quad (12)$$

Далее определяем длину межэлектродного разрядного промежутка l из соотношения:

$$l = U_0 / E_0. \quad (13)$$

Используемая в данной работе ЭС, содержащая порядка 60% алюминия, причем 15% мелко-

дисперсной и 45% крупнодисперсной фракций, характеризуется сравнительно невысокой напряженностью $E_{кр}$, при которой достигается максимальная величина удельной эффективности сгорания ЭС, поэтому принимаем $E_0 \geq 2 \cdot 10^5$ В/м [1].

Затем, зная массу и удельный вес применяемой ЭС, определяем диаметр диэлектрической трубки d_{mp} , в которую помещают ЭС, либо диаметр отверстия в электроде в случае автоматической подачи ЭС в разрядный промежуток по формуле:

$$d_{mp} = \sqrt{4M_{\gamma} / \pi \cdot l \cdot \rho_c}, \quad (14)$$

где ρ_c – удельный вес ЭС, кг/м³.

При необходимости механизированной подачи ЭС в разрядный промежуток целесообразнее использовать состав с 40% содержанием алюминия. Состав же с 60% содержанием алюминия (15% мелкодисперсной и 45% крупнодисперсной фракций), хотя и обеспечивает более высокие уровни амплитуды импульса и длительности давления в волне сжатия, не поддается механизированному процессу его подачи в разрядный промежуток ввиду его высокой вязкости.

Таким образом, параметры ГИТ, длина разрядного промежутка и масса ЭС, обеспечивающие необходимые энергетические характеристики при ВЭХВ в ограниченном объеме, определены. Естественно, что при таком подходе к расчету параметров ЭГУ существует определенный произвол в выборе величины w_{τ} . Избавиться от него можно, сформулировав критерий оптимизации μ_0 как функции w_{τ} [1]. Вид критерия оптимизации процесса совместного преобразования при ВЭХВ электрической и химической энергий зависит от постановки задачи. Выделим некоторые варианты задач, которые могут иметь практическое значение при проектировании электроразрядных устройств на базе ВЭХВ:

а) достижение максимальной суммарной энергии ВЭХВ ($W_n - \max$) при фиксированной электрической энергии ГИТ ($W_0 = \text{const}$);

б) максимизация вклада химической энергии ($\Delta W - \max$) при фиксированной суммарной энергии ВЭХВ ($W_n = \text{const}$);

в) обеспечение максимального сгорания ЭС в канале ВЭХВ ($\mu_0 - \max$) при заданной суммарной энергии ($W_n = \text{const}$).

Очевидно, что лимитирование потребления электроэнергии или габаритов ЭГУ приводит к задачам а) или б), а ограничение расхода ЭС – к задаче в).

Как следует из работы [1], при надлежащем выборе напряженности E_0 ($E_0 \geq E_{кр}$ или $E_0 = \text{const}$) удельная эффективность сгорания μ_0 ЭС при ВЭХВ зависит только от выделившейся удельной электрической энергии $\mu_0 = f(w_{\tau})$. Учитывая

это, например для задачи б), из необходимого условия оптимума ΔW ($d\Delta W / dw_{\tau} = 0$) получаем:

$$d\mu_0 / dw_{\tau} = \mu_0 / w_{\tau}. \quad (15)$$

Интегрируя выражение (15), найдем, что в окрестности точки оптимума

$$\mu_0 = \chi \cdot w_{\tau}, \quad (16)$$

где χ – константа.

Отсюда следует простая геометрическая интерпретация условия оптимума ΔW : точкой оптимума является точка касания кривой $\mu_0 = f(w_{\tau})$ и прямой $\mu_0 = \chi \cdot w_{\tau}$ (рис. 3).

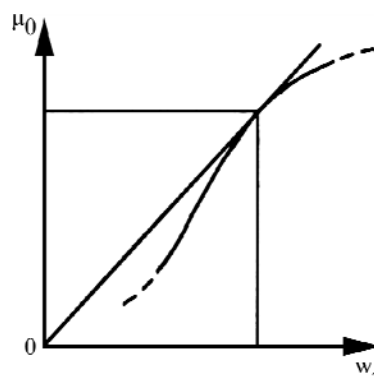


Рис. 3. Геометрическая интерпретация условий оптимизации для параметров μ_0/w_{τ} [1].

Можно показать, что условием максимума W_n в случае а) также является выражение (16). Действительно, учитывая $W_0 = \text{const}$ и $M_{\text{ЭС}} = W_0/w_{\tau}$, находим, что необходимое условие максимума W_n ($dW_n/dw_{\tau} = 0$) приводит к выражению, которое эквивалентно формуле (16). Следовательно, как в случае а), так и в случае б) параметром оптимизации является величина μ_0/w_{τ} , имеющая простой физический смысл, – это количество высвобождающейся химической энергии, отнесенное к единице вводимой в канал ВЭХВ электрической энергии.

Условие оптимизации по формуле (16) позволяет однозначно определить величины w_{τ} и μ_0 , необходимые для расчета параметров ЭГУ и массы ЭС, вводимого в разрядный промежуток при ВЭХВ в безграничном объеме, а следовательно, параметры ГИТ, массу ЭС и длину разрядного промежутка, обеспечивающие оптимальные энергетические параметры при ВЭХВ в ограниченных объемах.

ВЫВОДЫ

1. На основании данных экспериментальных исследований разработан алгоритм расчета параметров комбинированных электроразрядных источников энергии с использованием ВЭХВ в ограниченном объеме, обеспечивающих заданные технологией энергетические характерис-

тики. При этом для стабильного и эффективного энерговыделения при ВЭХВ в ограниченных объемах целесообразно соблюдать условие $\gamma \leq 0,75$.

2. Для исключения многовариантности решений по предложенному алгоритму в зависимости от выбора величины w_τ рекомендуется использовать критерий оптимизации μ_0 как функции w_τ . Применение критерия оптимизации позволит однозначно определить параметры ГИТ, массу ЭС и длину разрядного промежутка, обеспечивающие оптимальные энергетические параметры при ВЭХВ в ограниченных объемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
2. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. *ЭОМ*. 2017, **53**(5), 41–47.
3. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Яцюк С.А. *ЭОМ*. 2006, **42**(1), 70–72.
4. Коростовенко В.В., Коростовенко Л.П., Стрекалова Т.А., Стрекалова В.А. *Международный журнал экспериментального образования*. 2013, **10**(1), 129–132.
5. Ризун, А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. *Наука и инновации*. 2014, **10**(5), 18–23.
6. Рытов С.А., Смирнов П.В. *Информационный вестник*. 2006, **1**(12), 10–13.
7. Рытов С.А. *Жилищное строительство*. 2010, **7**(5), 47–50.

Поступила 19.03.18

После доработки 11.05.18

Summary

Based on the experimental research data, the algorithm for calculating the parameters of combined electric discharge power sources using a high-voltage electrochemical explosion (HVEE): parameters of the pulse current generator, the length of the discharge gap, and the mass of the exothermic composition, has been developed. These parameters provide the energy characteristics specified by the technology in a confined volume. In order to eliminate multiple solutions in the proposed algorithm, it is recommended to consider the amount of the released chemical energy per unit of electric energy introduced to the HVEE channel, as optimization criterion.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, water-filled exothermic composition, parameters of combined electric discharge power source, steam-gas cavity, energy conversion efficiency, confined volume.