

Синтез комбинированных энергоисточников на основе высоковольтного электрохимического взрыва

А. И. Вовченко^а, Л. Ю. Демиденко^а, С. С. Козырев^б, Л. Е. Овчинникова^{а,*}

^аИнститут импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина

^бНациональный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
г. Николаев, 54025, Украина, *e-mail: lora947@gmail.com

Поступила в редакцию 27.10.2022

После доработки 27.10.2022

Принята к публикации 20.02.2023

Разработан поэтапный алгоритм синтеза комбинированных энергоисточников на основе высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ), обеспечивающих необходимое пространственно-временное силовое и энергетическое воздействие на объекты обработки для выполнения заданных технологических операций. Первоначально выполняется синтез энергоисточника на основе высоковольтного электрического разряда в конденсированных средах путем решения обратных задач синтеза и в результате определяется необходимая полная энергия с последующим ее оптимальным разделением на электрическую и химическую составляющие. Проведены экспериментальные исследования функций зависимости силового воздействия на объект обработки от энергетических характеристик ВЭХВ, на основании которых определены критерии оптимального распределения необходимой величины полной энергии между электрической и химической составляющими. Приведен пример конкретного использования разработанного алгоритма синтеза комбинированного энергоисточника на основе ВЭХВ, подтверждающий возможность его использования для инженерных расчетов.

Ключевые слова: разрядно-импульсные технологии, высоковольтный электрический разряд, высоковольтный электрохимический взрыв, экзотермическая смесь, генератор импульсных токов, алгоритм синтеза энергоисточников, импульс давления, удельная электрическая энергия, эффективность преобразования энергии

УДК 532:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.67>

ВВЕДЕНИЕ

Высокопроизводительные разрядно-импульсные технологии (РИТ) с использованием взрывного преобразования энергии широко используются для разрушения и диспергирования неметаллических материалов, деформирования металлов, интенсификации процессов в водных, нефтяных и газовых скважинах, сварки разнородных металлов в твердой фазе, стабилизации остаточных напряжений в металлах и др. В этих технологиях разрядно-импульсной обработки материалов и изделий используют высоковольтный электрический разряд (ВЭР) в конденсированных средах как источник концентрированного, дозированного импульсного воздействия на объект обработки [1–4].

Для расширения возможностей РИТ перспективным является использование высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) в качестве комбинированного энергоисточника, который дает возможность усилить уровень силового и энергетического воздействия на объект обработки без повышения энергопотребления и увеличения стоимости электрооборудо-

вания. ВЭХВ реализуется при введении в плазменный подводный канал высоковольтного электрического разряда (ВЭР) экзотермических смесей (ЭС), химическое превращение которых происходит в режиме взрывного горения и увеличивает интегральную энергию в канале разряда [5].

В Институте импульсных процессов и технологий Украины на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлены основные закономерности ВЭХВ, его энергетические, гидродинамические и электрофизические характеристики, разработаны алгоритмы расчета параметров комбинированных энергоисточников на основе ВЭХВ, которые обеспечивают максимальное выделение химической энергии в канале разряда [5–9].

Проанализированные существующие алгоритмы расчета комбинированных энергоисточников на базе ВЭХВ исходят из заданной полной энергии W_p , которая определяется экспериментально технологами для каждой номенклатуры изделий конкретной РИТ по результатам проведения серии технологических операций и является исходным значением для дальнейшего

проектирования энергоисточника. Такой подход дает возможность оптимизировать параметры определенного энергоисточника, но не позволяет оптимизировать РИТ в целом, с учетом конкретного объекта обработки и необходимости обеспечить наиболее рациональное пространственно-временное силовое и энергетическое влияние на объекты обработки. Для обеспечения требований конкретных РИТ по рациональному силовому воздействию на объекты обработки необходимо проведение целевых исследований зависимости функций силового воздействия ВЭХВ в определенных точках волновой зоны технологического объема, заданных потребностями РИТ, от энергетических характеристик ВЭХВ и создание на их основе методов и алгоритмов синтеза комбинированных энергоисточников на основе ВЭХВ для выполнения необходимых технологических задач, без предварительного трудоемкого экспериментального определения технологически необходимой энергии.

Цель работы – анализ подходов к решению задач синтеза энергоисточников на основе ВЭР для разрядно-импульсных технологий с учетом требуемого силового воздействия на объекты обработки и возможности использования их при синтезе энергоисточников на основе ВЭХВ; проведение целевых исследований зависимости функций силового воздействия ВЭХВ в определенных точках волновой зоны технологического объема, заданных потребностями РИТ, от энергетических характеристик ВЭХВ; разработка алгоритма синтеза комбинированных энергоисточников на основе ВЭХВ, обеспечивающих необходимое пространственно-временное силовое и энергетическое воздействие на объекты обработки, для выполнения заданных технологических операций.

ЭТАПЫ СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Синтез комбинированных энергоисточников на основе ВЭХВ для разрядно-импульсных технологий с учетом требований заданного технологического силового воздействия на объекты обработки целесообразно проводить поэтапно.

На первом этапе необходимо выполнить синтез энергоисточника на основе высоковольтного электрического разряда в конденсированных средах, в качестве которого в РИТ используется генератор импульсных токов (ГИТ) с емкостным накопителем энергии и нелинейной нагрузкой в виде плазменного канала разряда. Синтез энергоисточника на основе ВЭР можно

реализовать путем решения обратных задач синтеза для гидродинамической, электродинамической и электротехнической подсистем по заданным, исходя из технологических потребностей, функциям давления $P(t)$ в определенных точках волновой зоны технологического объема. В результате будут получены: временная зависимость электрической мощности вводимой в канал разряда $N(t)$, параметры ГИТ (U – зарядное напряжение; C – емкость накопителя; L – индуктивность разрядного контура; l – величина разрядного промежутка) и в итоге полная величина электроэнергии $W_{\Pi} = CU^2/2$, которая обеспечивает необходимую заданную функцию $P(t)$ технологического силового воздействия на объект обработки.

На втором этапе необходимо рассмотреть возможность достижения такого же, как и при ВЭР, заданного технологическими требованиями воздействия на объект обработки путем сочетания действия высоковольтного электрического разряда в конденсированной среде и высоковольтного электрохимического взрыва. При этом определенную на первом этапе полную энергию W_{Π} , необходимую для выполнения технологических операций, нужно обеспечить суммированием электрической и химической энергий $W_{\Pi} = W_{\text{Э}} + \Delta W_{\text{Х}}$. Это даст возможность уменьшить часть электроэнергии $W_{\text{Э}}$ за счет добавления химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$, которая выделится при взрывном горении экзотермической смеси. Сокращение части электроэнергии позволит уменьшить массогабаритные показатели и стоимость ГИТ. При этом возникает задача оптимального распределения полученной на первом этапе расчетной величины полной энергии W_{Π} , необходимой для достижения заданного технологического результата, между электрической $W_{\text{Э}}$ и химической $\Delta W_{\text{Х}}$ составляющими. Для этого необходимо проведение целевых экспериментальных исследований зависимости функций давления $P(t)$ в определенных точках волновой зоны технологического объема, заданных потребностями РИТ, от энергетических характеристик ВЭХВ.

СИНТЕЗ ЭНЕРГОИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ВЭР

На первом этапе выполняется синтез энергоисточника на основе ВЭР, в качестве которого используется ГИТ. Создание необходимого силового воздействия на объект обработки, то есть давления $P(t)$, обеспечивается параметрами ГИТ (U – зарядное напряжение; C – емкость накопителя; L – индуктивность разрядного контура; l – величина разрядного промежутка) и

режимом выделения энергии $N(t)$ в нелинейной нагрузке, которой является плазменный канал разряда. Поэтому при разработке конкретной РИТ возникает задача расчета параметров ГИТ по импульсу давления $P(t)$ в определенной точке технологической зоны обработки, необходимому для реализации заданного технологического процесса. Такая задача синтеза импульсного источника энергии для РИТ относится к классу обратных задач синтеза.

Основой для решения обратных задач являются сформулированные на базе уже изученных закономерностей физико-математические модели прямых задач. Поскольку для произвольного энергоисточника нет физико-математической модели прямой задачи определения функции давления в произвольной точке заполненного жидкостью технологического объема по некоторой обобщенной характеристике импульсного электроразрядного источника энергии, то общая система разбивается на подсистемы: гидродинамическая, электродинамическая и электротехническая. Модель взаимодействия между подсистемами строится каскадным образом, чтобы исходные параметры одной подсистемы были входными для другой, обеспечивая снижение числа существенных связей между подсистемами. Таким образом, синтез энергоисточника для ВЭР можно реализовать путем решения обратных задач синтеза для отдельных подсистем: гидродинамической, электродинамической и электротехнической [1, 10]. Это дает возможность согласовывать режимы работы энергоисточника с конструктивными особенностями технологического комплекса и объекта обработки.

Анализ существующих методов решения обратных задач [11–13] показал, что для инженерных задач синтеза энергоисточников на основе ВЭР приемлемым является использование методов подбора [14], позволяющих на основе общего анализа закономерностей путем вариации параметров энергосистемы и последовательного прямого решения уравнений моделей подсистем ВЭР получить приемлемую реализацию энергоисточника, который обеспечивает заданное технологическими требованиями силовое воздействие на объект обработки.

Правомерность использования метода подбора к решению обратной задачи в такой постановке доказана в [14], где указано, что необходимым и достаточным условием существования решения поставленной задачи является компактность множества изначально заданных элементов, которые зависят от ограниченного количества параметров и изменяются в

ограниченных промежутках значений. Основой для решения обратной задачи методом подбора являются сформулированные на базе уже изученных закономерностей физико-математические прямые модели гидродинамической и электродинамической подсистем [15].

Прямая модель электродинамической подсистемы ВЭР состоит из уравнения баланса напряжений в разрядном контуре (1); уравнения баланса энергии (2); уравнения гидродинамики (3), которое определяет связь давления в канале разряда с кинематическими характеристиками; уравнения (4), которое определяет связь между сопротивлением канала разряда и удельной электропроводностью плазмы.

$$\frac{d^2 U_n}{dt^2} + \frac{R_k}{L} \frac{dU_n}{dt} + \frac{U_n}{LC} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\gamma-1} \times \frac{d(P_a \times \pi \times a^2)}{dt} + P_a \times \frac{d(\pi \times a^2)}{dt} = \frac{N(t)}{l}, \quad (2)$$

$$P_a = \frac{\rho}{2 \times \pi} \times \frac{d^2(\pi \times a^2)}{dt^2} \times \ln\left(\frac{l}{a}\right) - \frac{\rho}{8 \times \pi \times (\pi \times a^2)} \times \left(\frac{d(\pi \times a^2)}{dt}\right)^2, \quad (3)$$

$$R_k = \frac{Al(\gamma-1)}{P_a(\pi \times a^2)}, \quad (4)$$

где U_n – напряжение пробоя разрядного промежутка, В; R_k – сопротивление канала разряда, Ом; L – индуктивность разрядного контура, Гн; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; $N(t)$ – мощность, которая вводится в канал разряда, ВА; P_a – давление в канале разряда, Па; a – радиус канала разряда, м; l – длина разрядного промежутка, м; $\gamma = 1,26$ – эффективный показатель адиабаты, ρ – плотность среды, кг/м; A – искровая константа, В²см⁻²; t – время, с.

Модель гидродинамической подсистемы ВЭР (процесс распространения волны давления в объеме жидкости) описывается одномерным волновым уравнением (5), что допустимо при ограниченных скоростях до 200 м/с [16]:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad (5)$$

где $\varphi(r, t)$ – потенциал скорости движения жидкости, м²/с; r – пространственная координата заданной точки технологического объема, м; c_0 – скорость звука в конденсированной среде технологического объема, м/с.

Начальные условия: $\varphi(r, 0) = 0$; $\frac{\partial \varphi}{\partial t}(r, 0) = 0$.

Граничные условия:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(r_0, t) = \frac{-P_a(t)}{\rho} + \frac{P_0}{\rho}; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t}(r_1, t) = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t}(r_1, t) = 0.$$

Если в качестве входных данных использовать эмпирическую зависимость $N(t) = I(t) \times U(t)$, то из системы уравнений (1)–(5) необходимо исключить уравнения (1) и (2).

Решение прямой задачи в представленной форме выполнялось в пакете прикладных программ Mathcad с помощью функции `odesolve` [17] с применением решателя `Radau`, который использует алгоритм решения систем обычных дифференциальных уравнений `Radau5`. Метод `Radau5` основан на трехстадийном полностью неявном методе Рунге-Кутты пятого порядка точности и используется в случаях, когда в решении дифференциальных уравнений есть плавно изменяемая компонента, а также быстро затухающие возмущения.

Для решения обратной задачи методом подбора предложено закон ввода электрической мощности в канал разряда моделировать ломаной линией, которая состоит из четырех отрезков и определяется заданием координат пяти точек [14]. Первая точка находится в начале координат, третья определяется значением амплитуды мощности N_m и временем ее достижения τ_N , пятая имеет координаты $t = \tau_1$ и $N = 0$ (τ_1 – длительность первого полупериода времени введения энергии). Для определения координат второй и четвертой точек были проанализированы кривые мощности, полученные по экспериментальным данным и приведенные в литературе [15]. Результаты анализа показали, что можно принять для второй точки $t = 0,3\tau_N$, $N = 0,15N_m$, а для четвертой – $t = 0,85\tau_1$, $N = 0,12N_m$. Таким образом, закон ввода электрической мощности задается длительностью первого полупериода τ_1 , максимальным значением мощности N_m и временем ее достижения τ_N . С целью уменьшения стохастичности процесса рассматривается разряд, инициированный микропроводником радиусом $a_0 = 0,2$ мм, начальная скорость расширения канала $a_0 = 0$, начальное давление в канале $(P_a)_0 = 6$ МПа. Используя эмпирические формулы [10], можно получить величины τ_1 , N_m , τ_N , по которым проводится аппроксимация $N(t)$ – закона ввода электрической энергии в канал разряда, через параметры генератора импульсных токов (ГИТ):

$$\tau_1 = \pi \sqrt{LC}; \quad N_m = \eta^2 (1 - 0,85\eta) U_0^2 \sqrt{C/L};$$

$$\tau_N = 1,8\eta \sqrt{LC}; \quad \eta = \left(\frac{\pi Al^2}{U^2 \sqrt{LC}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Для определения диапазона изменений величин τ_1 , N_m , τ_N , которые задают закон введения электрической мощности в канал разряда, необходимо установить диапазоны изменений параметров электрической цепи U ; C ; L и длины межэлектродного промежутка l (длина микропроводника). Для этого были проанализированы разные разрядно-импульсные технологии и существующий параметрический ряд генераторов импульсных токов [1, 15, 18]. По результатам проведенного анализа установлены следующие диапазоны изменений: $U_0 \times 10^3, B = [10; 15; 25; 35; 45]$; $C \times 10^{-6}, \Phi = [1; 2; 3; 4; 5]$; $L \times 10^{-6}, \Gamma_n = [3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0]$; $l \times 10^{-2}, m = [2; 3; 4; 5; 6]$. При необходимости диапазоны изменений параметров ГИТ и величины разрядного промежутка могут быть изменены по требованиям конкретных разрядно-импульсных технологий.

Решение обратной задачи синтеза энергоисточника на основе высоковольтного электрического разряда методом подбора происходит по следующему алгоритму.

Задается необходимая для выполнения конкретного разрядно-импульсного технологического процесса функция давления $P(t)$ в определенной точке $r = r_i$ волновой зоны технологического объема. Далее для элементов множества возможных решений обратной задачи (перебор комбинаций установленных диапазонов изменений параметров ГИТ и величины разрядного промежутка) решается прямая задача. Полученные функции давления $P(t)_i$ в результате решения серии прямых задач сравниваются с технологически заданной функцией давления $P(t)$ в соответствующие моменты времени t_i ($n \geq i \geq 1$), то есть находится расстояние между элементами $P(t)$ и $P(t)_i$. Если расстояние между кривыми $P(t)$ и $P(t)_i$ меньше $\varepsilon = 0,1P_m$ (P_m – амплитуда заданной функции давления), то использованные в процессе решения прямой i -й задачи параметры ГИТ являются решением обратной задачи.

Решение обратной задачи синтеза энергоисточника на основе высоковольтного электрического разряда методом подбора выполнен для технологически заданного импульса давления $P(t)$ на расстоянии $r = 0,2$ м от канала разряда (рис. 1).

По результатам решения обратной задачи методом подбора с использованием пакета прикладных программ Mathcad определены необходимые для обеспечения заданного импульса давления параметры ГИТ: $U = 25 \times 10^3$ В; $C = 2 \times 10^{-6}$ Ф; $L = 3,5 \times 10^{-6}$ Гн; $l = 0,03$ м и необходимая полная энергия $W_{\Pi} = CU^2/2 = 625$ Дж.

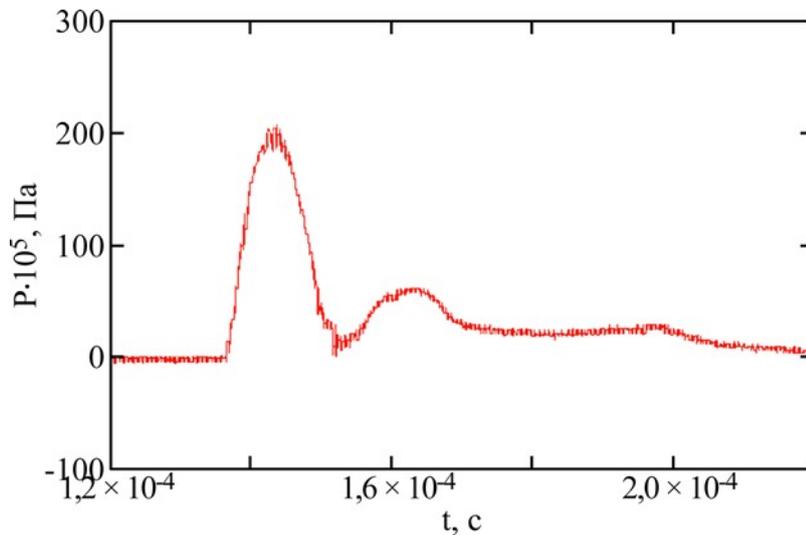


Рис. 1. Импульс давления $P(t)$, заданный по технологическим требованиям на расстоянии $r = 0,2$ м от канала разряда (сигнал датчика давления).

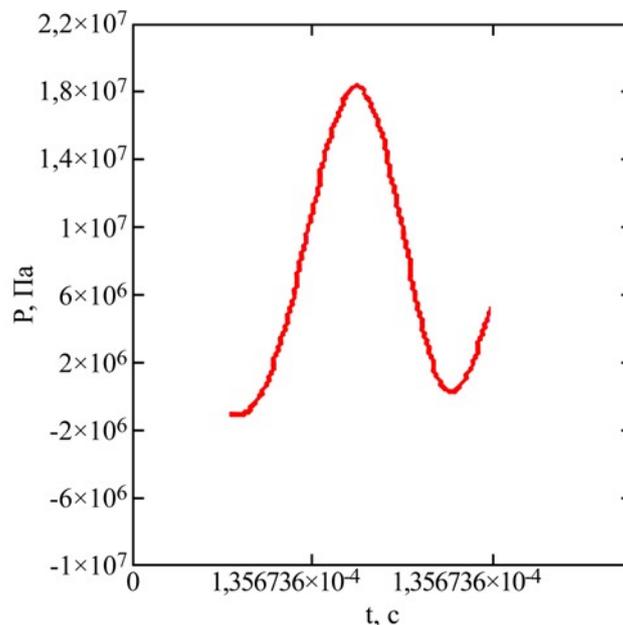


Рис. 2. Импульс давления $P(t)_i$ на расстоянии $r = 0,2$ м от канала разряда, полученный в результате решения прямой задачи (фрагмент Mathcad).

Для проверки корректности полученных результатов была решена прямая задача нахождения функции давления $P(t)$ на расстоянии $r = 0,2$ м от канала разряда, при решении которой в качестве исходных данных использованы параметры ГИТ, определенные по результатам решения обратной задачи методом подбора (рис. 2).

Сравнение функции давления $P(t)_i$ (рис. 2), полученной при решении прямой задачи по исходным данным, которые являются результатом решения обратной задачи методом подбора, с технологически заданным импульсом давления $P(t)$ (рис. 1) в пределах первого полу-периода показывает, что отклонение не превышает 10%. Это подтверждает приемлемость полученных результатов решения задачи синтеза энергоисточника на основе ВЭР методом подбора.

В результате проведенных расчетов получены параметры энергоисточника на основе ВЭР и полная величина электроэнергии W_{Π} , которая обеспечивает необходимую функцию технологического воздействия на объект обработки. Для перехода к использованию ВЭХВ с целью снижения потребления электроэнергии и частичной ее замены на химическую энергию взрывного горения экзотермической смеси необходимо определить оптимальное распределение полной энергии W_{Π} между энергией высоковольтного электрического разряда в конденсированной среде W_{Ξ} и энергией высоковольтного электрохимического взрыва ΔW_{χ} .

Для определения критериев распределения необходимой полной энергии W_{Π} между электрической W_{Ξ} и химической ΔW_{χ} составляющими необходимо проведение экспериментальных исследований зависимости функций

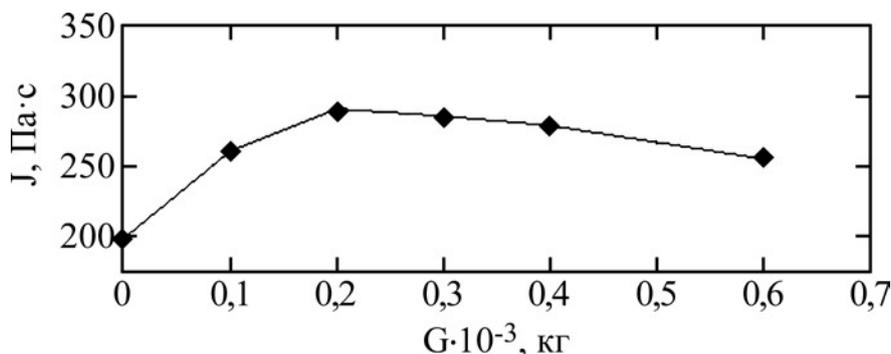


Рис. 3. Зависимость $J(G)$ при $W_3 = 312$ Дж.

силового воздействия в определенных точках волновой зоны технологического объема, заданных потребностями РИТ, от энергетических характеристик ВЭХВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФУНКЦИЙ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТ ОБРАБОТКИ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЭХВ

Импульс давления J , Па·с, который излучается на стадии расширения канала при высоковольтном электрохимическом взрыве, является интегральной характеристикой силового воздействия на объект обработки, поэтому коррелирует с энергетическими показателями и может служить мерой эффективности общего преобразования электрической и химической энергий при ВЭХВ. С целью исследования зависимости импульса давления J , являющегося силовой интегральной характеристикой, от энергетических характеристик, а именно электрической энергии W_3 , Дж, выделяемой ГИТ, и химической энергии ΔW_x , Дж, определяемой массой экзотермической смеси G , кг, проведена серия экспериментов. В процессе проведения экспериментов определялась зависимость импульса давления от массы экзотермической смеси $J(G)$ при различных наиболее часто используемых в РИТ значениях энергии ГИТ W_3 в интервале от 312 Дж до 950 Дж. Фрагмент результатов экспериментальных исследований приведен на рис. 3.

Полученные в данном исследовании зависимости $J(G)$ при разных значениях $W_3 = \text{const}$ (от 312 Дж до 950 Дж) имеют максимумы.

При $W_3 = 312$ Дж максимум $J(G)$ наблюдается при $G = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг; при этом $w_3 = W_3/G = 312/0,2 \cdot 10^{-3} = 1,56 \cdot 10^6$ Дж/кг.

При $W_3 = 450$ Дж максимум $J(G)$ наблюдается при $G = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кг; при этом $w_3 = W_3/G = 450/0,3 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^6$ Дж/кг.

При $W_3 = 600$ Дж максимум $J(G)$ наблюдается при $G = 0,4 \cdot 10^{-3}$ кг; при этом $w_3 = W_3/G = 600/0,4 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^6$ Дж/кг.

При $W_3 = 950$ Дж максимум $J(G)$ наблюдается при $G = 0,6 \cdot 10^{-3}$ кг; при этом $w_3 = W_3/G = 950/0,6 \cdot 10^{-3} = 1,57 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Максимумы зависимости $J(G)$ при разных значениях W_3 наблюдались примерно при одном и том же значении удельной энергии $w_3 = W_3/G \approx 1,5 \cdot 10^6$ Дж/кг. Полученная закономерность поведения зависимости $J(G)$ объясняется энергетической значимостью удельной энергии w_3 . Величина w_3 определяет степень разогрева единицы массы ЭС, а следовательно, температуру и давление, то есть условия и эффективность протекания экзотермических реакций окисления ЭС. Импульс давления J , который излучается на стадии расширения канала при высоковольтном электрохимическом взрыве, может служить мерой эффективности общего преобразования электрической и химической энергий [5]. Поскольку импульс давления является интегральной характеристикой силового влияния на объект обработки и потому коррелирует с энергетическими показателями, то полученной закономерностью и экспериментально определенным значением удельной электроэнергии w_3 , при котором наблюдается максимум импульса давления J , можно воспользоваться для оптимального распределения необходимой полной энергии W_{Π} между электрической W_3 и химической ΔW_x составляющими.

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ W_{Π} , НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЗУЛЬТАТА, МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ W_3 И ХИМИЧЕСКОЙ ΔW_x СОСТАВЛЯЮЩИМИ

Суммарная энергия W_{Π} , которая выделяется при разряде ВЭХВ, состоит из двух частей: электрической энергии W_3 , выделившейся из емкостного накопителя ГИТ, и химической ΔW_x , выделившейся при сгорании экзотермической смеси, размещенной в канале разряда. Одну и ту же величину полной энергии W_{Π} можно полу-

чить при разных сочетаниях химической энергии ΔW_X , определяемой массой экзотермической смеси G , и электрической $W_Э$ энергии, определяемой параметрами ГИТ. Распределение полной энергии между электрической и химической составляющими необходимо выполнить таким образом, чтобы обеспечить эффективность выделения химической энергии при сгорании ЭС и максимальный импульс давления. Абсолютная величина выделяемой химической энергии ΔW_X не является объективным критерием эффективности высвобождения потенциальной энергии ЭС. Таким критерием может служить удельная эффективность сгорания ЭС при ВЭХВ $\mu = \Delta W_X / G$. Удельная эффективность сгорания ЭС μ является усредненной по объему характеристикой, которая определяет интегральную по времени эффективность сгорания единицы массы ЭС, и зависит от удельной электрической энергии, выделившейся в единице массы ЭС $w_Э = W_Э / G$, которая определяет эффективность протекания экзотермических реакций окисления ЭС.

В [5, рис. 56] показано, что зависимость $W_{II}(G)$, как и исследованная в данной работе зависимость $J(G)$, имеет максимум при $W_Э = \text{const}$. Полная энергия парогазовой полости W_{II} с увеличением массы экзотермической смеси G растет только до определенного значения, а потом начинается ее спад. Это обусловлено тем, что при значительном увеличении G спад удельной эффективности сгорания ЭС $\mu = \Delta W_X / G$, обусловленный уменьшением удельной энергии $w_Э = W_Э / G$, уже не компенсируется увеличением массы ЭС G и суммарно выделенное количество химической энергии $\Delta W_X = G \times \mu$ снижается.

Поскольку полученные в данном исследовании зависимости $J(G)$ при разных значениях $W_Э = \text{const}$ также имеют максимумы и коррелируют с энергетическими показателями $W_{II}(G)$, причем максимумы $J(G)$ при разных значениях $W_Э$ наблюдаются при одном и том же значении удельной энергии $w_Э = W_Э / G$ в заданном диапазоне изменения $W_Э$, то эта закономерность и экспериментально определенное значение $w_Э$, при котором наблюдается максимум J , могут быть использованы при распределении необходимой полной энергии W_{II} между составляющими $W_Э$ и ΔW_X , обеспечивая достижение максимального значения импульса давления J .

Однако $w_Э$ – не единственный параметр, который влияет на преобразования энергии. Показателем эффективности сгорания ЭС является удельная величина $\mu = \Delta W_X / G$. На значение μ существенно влияет напряженность электрического поля $E_0 = U_0 / l$, поскольку

именно она формирует условия пробоя ЭС. В работе [5] проведены экспериментальные исследования зависимости удельной эффективности сгорания ЭС μ от удельной электрической энергии $w_Э$ и напряженности электрического поля E_0 . Построены графики зависимости $\mu(E_0, w_Э)$. Удельная эффективность сгорания ЭС μ снижается почти до нуля при снижении напряженности электрического поля E_0 к минимальному значению пробивной напряженности использованного состава ЭС. Характер зависимости $\mu(E_0)$ существенно изменяется с увеличением $w_Э$. Зависимость $\mu(E_0, w_Э)$ [15, рис. 57] также может быть использована при распределении полной энергии W_{II} , требующейся для выполнения технологических задач, между составляющими $W_Э$ и ΔW_X для обеспечения максимальной эффективности преобразования химической энергии.

По результатам анализа проведенных исследований предлагается следующий алгоритм рационального распределения определенной на первом этапе синтеза энергоисточника полной энергии W_{II} , требующейся для выполнения необходимых технологических воздействий на объект обработки, между составляющими $W_Э$ и ΔW_X .

На первом этапе по результатам решения обратной задачи ВЭР методом подбора с использованием пакета прикладных программ Mathcad по заданному импульсу давления $P(t)$ определяются необходимые параметры ГИТ: U ; C ; L ; l . По ним рассчитывается полная энергия $W_{II} = CU^2/2$, необходимая для обеспечения силового влияния на объект обработки по требованиям технологического процесса, и напряженность электрического поля $E_0 = U_0 / l$, обеспечивающая условия пробоя ЭС.

Используя полученные вышеприведенные и проанализированные зависимости $J(G)$ и $\mu(E_0, w_Э)$ по определенным на первом этапе значениям полной энергии W_{II} и напряженности электрического поля E_0 через μ – удельную эффективность сгорания ЭС при ВЭХВ и $w_Э$ – удельную электрическую энергию, которая выделилась в единице массы ЭС, по нижеприведенным выражениям определяется G – необходимая масса ЭС:

$$W_{II} = W_Э + \Delta W_X = w_Э \times G + \mu \times G = G \times (w_Э + \mu);$$

$$W_{II} / G = w_Э + \mu; \quad G = W_{II} / (w_Э + \mu).$$

Значения $w_Э$ и μ определяем, используя экспериментально полученные зависимости: $J(G)$ – для определения $w_Э$ по максимуму функции $J(G)$, и $\mu(E_0, w_Э)$ – для определения μ по ранее определенным значениям E_0 , $w_Э$. Зная значения $w_Э$ и μ , определяем необходимую массу

ЭС $G = W_{\Pi}/(w_{\text{Э}} + \mu)$ и электрическую и химическую составляющие полной энергии, необходимой для реализации заданного силового влияния на объект обработки: $W_{\text{Э}} = w_{\text{Э}} \times G$; $\Delta W_{\text{Х}} = \mu \times G$.

Предложенный алгоритм позволяет распределить необходимую полную энергию между электрической и химической составляющими таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность выделения химической энергии при сгорании ЭС и максимальный импульс давления.

В приведенном выше примере расчета на первом этапе получены такие значения параметров ГИТ: $U = 25 \times 10^3$ В; $C = 2 \times 10^{-6}$ Ф; $L = 3,5 \times 10^{-6}$ Гн; $l = 0,03$ м. При этом $W_{\Pi} = CU^2/2 = 625$ Дж, $E_0 = U_0/l = 8,33 \times 10^5$ В/м. По экспериментально полученной зависимости $J(G)$ значение $w_{\text{Э}}$, обеспечивающее максимальный импульс давления J , равняется $w_{\text{Э}} = 1,5 \times 10^6$ Дж/кг. Воспользовавшись зависимостью $\mu(E_0, w_{\text{Э}})$ [5, рис. 57], по известным E_0 и $w_{\text{Э}}$ определяем значение $\mu = 1,3 \times 10^6$ Дж/кг.

Зная значения $w_{\text{Э}}$ и μ , можем определить необходимое количество ЭС и величины электрической и химической составляющих полной энергии $W_{\Pi} = W_{\text{Э}} + \Delta W_{\text{Х}}$:

$$G = W_{\Pi}/(w_{\text{Э}} + \mu) = 625/(1,5 \times 10^6 + 1,3 \times 10^6) = 223,2 \times 10^{-6} \text{ кг} \approx 0,2 \text{ г};$$

$$W_{\text{Э}} = w_{\text{Э}} \times G = 1,5 \times 10^6 \times 223,2 \times 10^{-6} = 334,8 \text{ Дж};$$

$$\Delta W_{\text{Х}} = \mu \times G = 1,3 \times 10^6 \times 223,2 \times 10^{-6} = 290,2 \text{ Дж}.$$

Использование ВЭХВ в данном случае позволяет уменьшить часть электроэнергии в полном объеме энергии W_{Π} , необходимой для выполнения технологических операций, почти в два раза ($W_{\Pi}/W_{\text{Э}} = 625/334,8 = 1,87$). Определив количество электрической энергии $W_{\text{Э}}$, можно перейти к корректировке на первом этапе определенных параметров ГИТ. Изменять напряжение U нецелесообразно, поскольку оно определяет напряженность $E_0 = U_0/l$, необходимую для обеспечения условий пробоя разрядного промежутка, заполненного ЭС. Поэтому корректировка проводится за счет изменения емкости конденсаторной батареи ГИТ: $C = 2 W_{\text{Э}}/U^2$.

В приведенном примере емкость конденсаторной батареи после перерасчета параметров ГИТ для использования ВЭХВ равняется $C = 2 \times W_{\text{Э}}/U^2 = 2 \times 334,8/(25 \times 10^3)^2 = 1,07 \times 10^{-6}$ Ф. То есть изначально определенную величину емкости конденсаторной батареи $C = 2 \times 10^{-6}$ Ф для реализации энергоисточника на основе ВЭР можно уменьшить вдвое, до $C = 10^{-6}$ Ф, за счет использования энергоисточника на основе ВЭХВ.

Предложенный метод распределения величины энергии W_{Π} , необходимой для достижения заданного технологического результата, между электрической $W_{\text{Э}}$ и химической $\Delta W_{\text{Х}}$ составляющими позволяет, используя полученные по результатам экспериментальных исследований зависимости импульса давления от массы ЭС $J(G)$, а также зависимость удельной эффективности сгорания ЭС от удельной электрической энергии и напряженности электрического поля $\mu(E_0, w_{\text{Э}})$, определять необходимые параметры ГИТ и массу ЭС, обеспечивающие выполнение требуемых технологических задач при использовании комбинированного энергоисточника на основе ВЭХВ, при максимальной эффективности выделения химической энергии в процессе взрывного горения ЭС и достижении максимально возможного импульса давления.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработан поэтапный алгоритм синтеза комбинированных энергоисточников на основе ВЭХВ, обеспечивающих необходимое пространственно-временное силовое и энергетическое воздействие на объекты обработки, для выполнения заданных технологических операций.

На первом этапе выполняется синтез энергоисточника на основе высоковольтного электрического разряда в конденсированных средах путем решения обратной задачи синтеза для гидродинамической, электродинамической и электротехнической подсистем по заданным, исходя из технологических потребностей, функциям давления $P(t)$ в определенных точках волновой зоны технологического объема. В результате определяются параметры энергоисточника, в качестве которого используется генератор импульсных токов, и полная величина электроэнергии W_{Π} , которая обеспечивает необходимую функцию технологического воздействия на объект обработки.

На втором этапе осуществляется переход к энергоисточнику на основе ВЭХВ путем замещения части определенной полной электроэнергии W_{Π} , необходимой для обеспечения заданного технологического воздействия на объект обработки, химической энергией, выделяющейся при взрывном горении экзотермической смеси, помещенной в канал разряда. Распределение полной энергии между электрической и химической составляющими выполняется таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность выделения химической энергии при сгорании ЭС и максимально возможный импульс давления.

С целью определения критериев оптимального распределения полной необходимой энергии между электрической и химической составляющими проведены экспериментальные исследования функций силового воздействия от энергетических характеристик ВЭХВ. Полученные зависимости импульса давления от массы экзотермической смеси $J(G)$ при различных значениях $W_3 = \text{const}$ имеют максимум при определенном значении удельной энергии $w_3 = W_3/G$, которое является критерием обеспечения максимального значения импульса давления. Критерием обеспечения максимальной эффективности выделения химической энергии при сгорании ЭС является $\mu = \Delta W_X/G$, которое определяется по зависимости $\mu(E_0, w_3)$. Использование установленных критериев позволяет осуществить оптимальное распределение полной энергии между электрической и химической составляющими $W_{\Pi} = W_3 + \Delta W_X$.

Приведен пример конкретного использования разработанного алгоритма синтеза комбинированного энергоисточника на основе ВЭХВ, подтверждающий возможность его использования для инженерных расчетов комбинированных энергоисточников, обеспечивающих заданное технологическими требованиями пространственно-временное силовое и энергетическое влияние на объекты обработки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Яцюк, С.А., Электро-разрядное разрушение донных грунтов, *ЭОМ*, 2006, т. 42, № 1, с. 70.
3. Рытов, С.А., Смирнов, П.В., Электроразрядные технологические устройства буровых свай большого диаметра, *Информ. вестник*, 2006, т. 1, № 12, с. 10.
4. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатный, Г.П., Импульсные электроразрядные технологии в строительстве, *Будівництво України*, 2008, № 10, с. 39.
5. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
6. Vovchenko, A., Demydenko, L. and Kozyrev, S., Control of high voltage discharge-pulse installation for implementation of technological modes of electrochemical explosion, *Eastern-Europ. J. Enterprise Technol.*, 2020, vol. 104, nos. 2–5, p. 29.
7. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Алгоритм расчета параметров комбинированного электроразрядного источника энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 3, с. 69.
8. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Параметры высоковольтного электрохимического взрыва в условиях управляемого ввода электрической энергии, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 2, с. 35.
9. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Козырев, С.С., Овчинникова, Л.Е., Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсных технологиях, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 85.
10. Вовченко, А.И., Шомко, В.В., Шишов, А.М., Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов, *Техническая электродинамика*, 2005, № 3, с. 68.
11. Романов, В.Г., *Обратные задачи математической физики*. М.: Наука, 1984. 264 с.
12. Тихонов, А.Н., Кальнер, В.Д., Гласко, В.Б., *Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1990. 270 с.
13. Гласко, В.Б., *Обратные задачи матфизики*. М.: МГУ, 1984. 112 с.
14. Барбашова, Г.А., О восстановлении характеристик канала подводного искрового разряда по временной зависимости давления в жидкости, *Прикладная гидромеханика*, 2007, т. 9, № 4, с. 69.
15. Кривицкий, Е.В., Шамко, В.В., *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
16. Барбашова, Г.А., Косенков, В.М., Цуркин, В.Н., О влиянии гидростатического давления на гидродинамические процессы при электрическом разряде, *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*, 2000, вып. 3, с. 36.
17. Хайрер, Э., Ваннер, Г., *Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи*. М.: Мир, 1999. 685 с.
18. Вовченко, А.И., Богуславский, Л.З., Мирошниченко, Л.Н., Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины, *Техническая электродинамика*, 2010, № 5, с. 69.

Summary

An algorithm of the stage-by-stage synthesis of combined energy sources based on a high-voltage electrochemical explosion (HVECHE) was developed. The algorithm provides the necessary space-time force and energy impact on processing objects to perform specified technological operations. At the first stage, the synthesis of an energy source based on a high-voltage electric discharge in condensed media was done by means of solving inverse synthesis problems and, as a result,

determining the required total energy with its subsequent optimal separation into electrical and chemical components. Experimental studies of the dependence functions of the force impact on the processing object on the energy characteristics of the HVECHe were carried out. Based on those studies, the criteria for the optimal proportion between the electrical and chemical components of the required total energy were determined. An example of a specific use of the developed algorithm for the synthesis of a combined energy source based on the HVECHe was

given, which confirms the possibility to use this algorithm for engineering calculations.

Keywords: pulse-discharge technologies, high-voltage electrical discharge, high-voltage electrochemical explosion, exothermic composition, pulse current generator, synthesis algorithm for energy sources, pressure pulse, specific electrical energy, efficiency of energy conversion