

# Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсных технологиях

А. И. Вовченко, Л. Ю. Демиденко, С. С. Козырев, Л. Е. Овчинникова\*

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, \*e-mail: [lora947@gmail.com](mailto:lora947@gmail.com)*

Поступила в редакцию 06.05.2021

После доработки 12.05.2021

Принята к публикации 14.05.2021

Анализируются и обобщены результаты исследований высоковольтных электрохимических взрывов (ВЭХВ), протекающих в различных условиях, обусловленные особенностями и потребностями существующих разрядно-импульсных технологий на базе ВЭХВ. Предложена методология расчета комбинированных энергоисточников применительно к потребностям различных разрядно-импульсных технологий, использующих высоковольтный электрохимический взрыв. На основе результатов экспериментальных исследований обосновано преимущество использования высоковольтного электрохимического взрыва с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда. Разработан алгоритм расчета параметров комбинированного электроразрядного источника управляемого ВЭХВ и необходимой массы экзотермической смеси, обеспечивающих заданные конкретной разрядно-импульсной технологией энергетические характеристики. Приведены результаты тестирования разработанного алгоритма расчета, подтверждающие возможность его использования для инженерных расчетов комбинированных энергоисточников с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда.

*Ключевые слова:* высоковольтный электрохимический взрыв, экзотермическая смесь, генератор импульсных токов, управляемый ввод энергии, разрядно-импульсные технологии, алгоритм расчета, удельная электрическая энергия, эффективность преобразования энергии

УДК 532:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.85>

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсное воздействие на обрабатываемые объекты лежит в основе современных технологий, применяемых во многих отраслях промышленного производства. В таких технологиях используются физические процессы импульсного преобразования различных видов энергии в силовые импульсы. К этим технологиям относятся разрядно-импульсные технологии (РИТ), в которых для обработки материалов и изделий используют высоковольтный электрический разряд (ВЭР) в конденсированных средах как источник концентрированного, дозированного воздействия с высокими удельными энергетическими показателями. Многие из РИТ (очистка отливок, штамповка, запрессовка труб в теплообменных аппаратах, разрушение неметаллических материалов, воздействие на структуру металлов в жидком состоянии, интенсификация химических процессов, повышение дебета нефтяных и водяных скважин и др.) нашли широкое применение в промышленности [1–6]. Эти технологии характеризуются высокой продуктивностью, простотой в реализации, экологичностью и низкими энергозатратами.

В последнее время значительное внимание уделяется разработке научных основ и практическому применению РИТ на основе компромиссного объединения традиционного высоковольтного электрического разряда в жидкости и взрыва химических конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), поскольку такой вариант позволяет при идентичных по сравнению с высоковольтным разрядом уровнях силового и энергетического воздействия существенно уменьшить затраты электроэнергии, стоимость и габариты электроразрядного оборудования.

Одним из наиболее перспективных вариантов реализации подобного сочетания является применение высоковольтного электрического разряда в химически активных конденсированных средах, не относящихся к ВВ в традиционном понимании, которые способны к экзотермическим превращениям в режиме взрывного горения лишь под действием высоких температур и давлений, развиваемых в электроразрядной плазме канала разряда. При этом в качестве энергоисточника используется емкостный накопитель в составе генератора импульсных токов (ГИТ). Выделяющаяся при

протекании экзотермических реакций энергия суммируется с электрической энергией, поступающей из емкостного накопителя ГИТ, что существенно увеличивает общую энергию, выделившуюся в канале разряда. Это комплексное физико-химическое явление было названо высоковольтным электрохимическим взрывом (ВЭХВ) [7].

В РИТ на базе ВЭХВ в качестве химически активных конденсированных сред применяются специально разработанные алюминий-содержащие водонаполненные экзотермические смеси (ВЭС) с широким диапазоном энергетических, реологических и электрических характеристик [7]. Для таких ВЭС установлен основной физический фактор (критический уровень давления, равный примерно 23 МПа), при котором наблюдается самоподдерживающееся горение ВЭС в канале ВЭХВ.

Анализ различных РИТ на базе ВЭХВ [7–9] позволил определить наиболее предпочтительные для использования составы ВЭС. Для РИТ с одноразрядным режимом (разрушение неметаллических материалов, запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов, некоторые виды листовой штамповки и т.п.) применяются ВЭС с 60% содержанием алюминия. Для РИТ с многоразрядными режимами работы (снятие остаточных напряжений, очистка отливок от формовочных смесей, сейсмоакустические излучатели и т.п.) применяются ВЭС с 40% содержанием алюминия. ВЭС с 40% содержанием алюминия благодаря пластичности и водоустойчивости позволяют автоматизировать процесс подачи смеси в разрядный промежуток и обеспечить требуемый частотный режим работы соответствующих электроразрядных устройств.

Ранее проведенные исследования энергетических и гидродинамических характеристик ВЭХВ [10–13], осуществляемого в различных условиях (неограниченный и ограниченный объемы, одноразрядный и многоразрядный режимы, управляемый ввод электроэнергии в разрядный канал), позволяют однозначно заявлять о существенном влиянии этих условий на процессы преобразования энергии в канале ВЭХВ. Дальнейшее углубленное изучение основных технологических, технических и электрофизических факторов, определяющих эффективность преобразования потенциальной химической энергии ВЭС в энергию ВЭХВ с учетом условий его реализации, требует анализа и обобщения предыдущих исследований.

## МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данной работы – анализ и обобщение исследований параметров высоковольтных

электрохимических взрывов, протекающих в различных условиях, разработка и развитие методологий и алгоритмов расчета комбинированных энергоисточников применительно к потребностям существующих РИТ на базе ВЭХВ.

Основным показателем, определяющим удельную энергетическую эффективность экзотермических реакций при ВЭХВ, является величина  $\mu = \Delta W/M$ , Дж/кг (где  $\Delta W$  – тепловая энергия, выделившаяся в канале разряда за счет химических экзотермических реакций, Дж;  $M$  – масса ВЭС, кг).

В результате исследований ВЭХВ в неограниченном объеме [7] определено, что величина удельной энергетической эффективности  $\mu_0$  экзотермической реакции данной ВЭС определяется двумя электрофизическими факторами, то есть  $\mu_0 = f(E_0, w_\tau)$  (где  $E_0$  – начальная напряженность электрического поля в разрядном промежутке, В/м;  $w_\tau = W_\tau/M$  – удельная электрическая энергия, Дж/кг;  $W_\tau$  – энергия электроразряда при ВЭХВ, Дж;  $M$  – масса ВЭС, кг).

В отличие от ВЭХВ в неограниченном объеме, величина удельной энергетической эффективности  $\mu$  при ВЭХВ в ограниченном объеме зависит не только от двух электрофизических факторов  $E_0$  и  $w_\tau$ , но и от безразмерного обобщенного параметра  $\gamma$ , характеризующего влияние ограниченного объема на процесс преобразования энергии. В этих условиях  $\mu$  является функцией трех переменных:  $\mu = f(E_0, w_\tau, \gamma)$ . В работе [11] показано, что параметр  $\gamma$  определяется из соотношения  $\gamma = V_k/V_p$  (где  $V_k$  – величина камеры ограниченного объема, м<sup>3</sup>;  $V_p$  – объем парогазовой полости (ПП) при пульсации в неограниченном объеме, м<sup>3</sup>).

Полученные зависимости позволили, исходя из заданной технологическим процессом полной энергии  $W_n$ , необходимой для выполнения определенных технологических операций, разработать алгоритмы расчета исходных параметров комбинированных энергоисточников для РИТ на базе ВЭХВ как для неограниченного, так и ограниченного объемов [7, 11]. При этом из-за существенной нестационарности гидродинамических процессов при ВЭХВ, обусловленной экзотермическими химическими преобразованиями в разрядном канале, алгоритмы расчета параметров комбинированного энергоисточника и необходимой массы ВЭС учитывают только энергетические характеристики.

Анализ работ [14, 15] показывает, что реализация ВЭХВ при одноимпульсном вводе энергии, а значит при использовании одноконтурной

схемы ГИТ, недостаточно эффективна вследствие неполного сгорания используемых экзотермических смесей из-за кратковременности импульса давления, генерируемого высоковольтным разрядом.

Эффективность экзотермического преобразования энергии при ВЭХВ определяется полнотой сгорания массы ВЭС. При полном сгорании величина высвобождаемой химической энергии близка к потенциальной энергии экзотермической смеси и, суммируясь с электрической энергией емкостного накопителя, значительно повышает эффективность ВЭХВ. Однако при неуправляемом одноимпульсном вводе энергии в канал разряда в реакцию вступает около 20% общего количества смеси, введенной в разрядный промежуток. Основной причиной этого является прекращение экзотермической самоподдерживающейся реакции из-за резкого снижения давления в канале ВЭХВ от сотен МПа до менее чем  $P_{\min} = 23$  МПа – минимального уровня давления, необходимого для протекания экзотермической самоподдерживающейся реакции. С целью повышения эффективности высвобождения химической энергии ВЭС необходима поддержка уровня давления в канале ВЭХВ выше минимального более длительное время.

Поэтому в современных РИТ все большее распространение получают технологии на базе ВЭХВ с управляемым многоимпульсным вводом электрической энергии в разрядный канал (управляемый ВЭХВ) с применением двухконтурных емкостных генераторов импульсных токов (ГИТ) [16, 17]. Метод управляемого ввода энергии основан на последовательном порционном вводе электрической энергии в канал разряда по заданному алгоритму с целью предотвращения преждевременного угасания самоподдерживающейся экзотермической реакции [18].

Имеющиеся в этой области исследования [19] показывают, что, в отличие от рассмотренных случаев неуправляемого одноимпульсного ввода энергии, при управляемом ВЭХВ величина удельной энергетической эффективности  $\mu$  значительно выше и зависит не только от двух электрофизических факторов  $E_0$  и  $w_\tau$ , но и от режимов ввода энергии в канал ВЭХВ. Это необходимо учитывать при проектировании и практическом использовании таких РИТ.

Изложенные выше обобщения исследований ВЭХВ в различных условиях служат основой для разработки алгоритма расчета параметров комбинированного электроразрядного источника с использованием управляемого ВЭХВ, что является важной и актуальной научно-

технической задачей, поскольку ее решение непосредственно направлено на повышение эффективности высоковольтных электроразрядных установок на базе ВЭХВ применительно к потребностям конкретных РИТ.

#### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭНЕРГОИСТОЧНИКА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ВЭХВ

Применение в электрогидроимпульсных установках (ЭГУ) ВЭХВ с управляемым многоимпульсным вводом электрической энергии требует расчета не только параметров электроразрядного источника, в качестве которого чаще всего используется двухконтурный ГИТ с емкостным накопителем энергии, но и массы ВЭС  $M$ , вводимой в разрядный промежуток, необходимых для обеспечения заданных силовых и энергетических характеристик, требуемых конкретной РИТ. Также важен режим ввода энергии в канал разряда, например, время задержки подачи очередного разрядного импульса  $t_z$  и распределение суммарной энергии между импульсами, что существенно влияет на эффективность преобразования энергии в канале разряда.

Поскольку электродинамические и гидродинамические процессы при ВЭХВ существенно усложняются нестационарно протекающими экзотермическими химическими превращениями в разрядном канале, в данной работе предложен алгоритм расчета параметров комбинированного энерго-источника и необходимой массы ВЭС, исходя только из заданных энергетических характеристик ЭГУ. При этом исходной величиной для расчета является полная энергия  $W_n$ , необходимая для выполнения технологических операций, которая задается конкретной разрядно-импульсной технологией применения электротехнического комплекса. Эта полная энергия  $W_n$  комбинированного источника ВЭХВ, высвобождаемая в процессе разряда, состоит из электрической энергии емкостного накопителя ГИТ  $W_\tau$  и тепловой химической энергии  $\Delta W$ , выделившейся при сгорании ВЭС:

$$W_n = W_\tau + \Delta W. \quad (1)$$

Выражая химическую энергию  $\Delta W$  в уравнении (1) через удельные энергетические характеристики  $w_\tau = W_\tau/M$  и  $\mu = \Delta W/M$ , величину  $W_n$  можно записать в виде:

$$W_n = W_\tau (1 + \mu / w_\tau), \quad (2)$$

или же через массу:

$$W_n = M (w_\tau + \mu). \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) при известных удельных энергетических характеристиках  $\mu$  и  $w_\tau$

можно определить необходимые величины  $W_\tau$  и  $M$ .

Следует отметить, что в уравнениях (2) и (3) отсутствует явная зависимость эффективности преобразования химической энергии ВЭС при ВЭХВ с управляемым вводом энергии от распределения суммарной энергии двухконтурного ГИТ между очередными импульсами, от массы ВЭС и времени задержки между импульсами энергии, последовательно вводимыми в один межэлектродный промежуток. Однако, как установлено в работе [19], такая зависимость существует. Поэтому необходима доработка алгоритма расчета для случая управляемого ввода энергии.

Для сравнения результатов расчетов при разных режимах ввода электрической энергии величина удельной энергетической эффективности  $\mu$  была пронормирована к значению  $\mu_0$  при одноимпульсном вводе энергии и представлена относительной величиной:

$$\bar{\mu} = \mu / \mu_0, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  – эффективность сгорания единицы массы ВЭС в канале разряда при одноимпульсном вводе энергии, Дж/кг;  $\mu$  – эффективность сгорания в канале разряда единицы массы ВЭС при ВЭХВ с управляемым двухимпульсным вводом энергии, Дж/кг.

Время подачи очередного импульса при двухимпульсном вводе энергии в канал разряда характеризуем относительной величиной времени задержки между подачей первой и второй порций энергии:

$$\bar{\tau} = t_z / t_1, \quad (5)$$

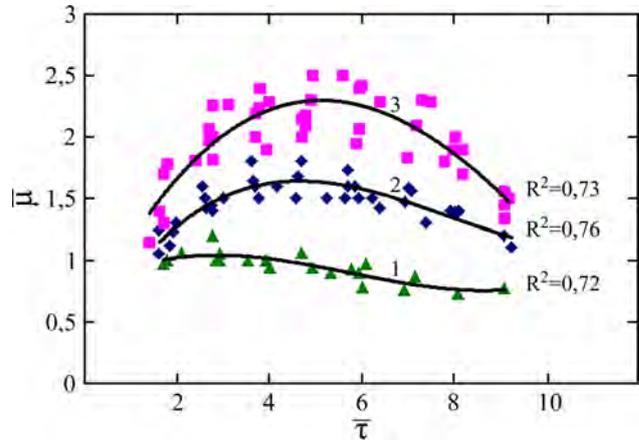
где  $t_z$  – время задержки подачи второй порции энергии в канал ВЭХВ, с;  $t_1$  – предварительно определенное характерное время длительности первого импульса тока, с.

По результатам проведенных экспериментальных исследований [19] получены обобщенные графические зависимости  $\bar{\mu} = f(\bar{\tau})$  для разных масс ВЭС  $M$ , отраженные на рисунке.

Зная величину необходимой полной энергии  $W_n$  ВЭХВ, можно предварительно определить необходимые массу  $M$ ,  $\mu_0$  и  $W_\tau$  при реализации ВЭХВ по традиционной одноконтурной схеме ГИТ в неограниченном объеме, используя выражения (1)–(3) и подход, изложенный в работе [7].

Далее для рассчитанной массы ВЭС  $M$  по ранее экспериментально полученным обобщенным зависимостям  $\bar{\mu} = f(\bar{\tau})$  [19], приведенным на рисунке, определяется максимальная относительная величина удельной

энергетической эффективности  $\bar{\mu}_{\max}$  и соответствующая ей величина относительного времени задержки между подачей первой и второй порций энергии  $\bar{\tau}$ .



Обобщенная зависимость относительной величины удельной энергетической эффективности  $\bar{\mu}$  при управляемом ВЭХВ от относительной величины времени задержки  $\bar{\tau}$  подачи второго импульса при разных массах ВЭС: 1 –  $M = 0,1$  г; 2 –  $M = 0,2$  г; 3 –  $M = 0,3$  г.

Тогда максимальная величина удельной энергетической эффективности  $\mu_{\max}$  ВЭС при управляемом вводе электрической энергии в канал ВЭХВ определяется из выражения:

$$\mu_{\max} = \mu_0 \times \bar{\mu}_{\max}. \quad (6)$$

Затем определяется величина химической тепловой энергии, выделившейся в канале ВЭХВ при сгорании ВЭС, в условиях управляемого ввода энергии в его канал:

$$\Delta W = \mu_{\max} M. \quad (7)$$

Зная величину высвобождаемой химической энергии  $\Delta W$  при ВЭХВ с управляемым вводом электроэнергии в его канал, с учетом необходимой полной энергии, заданной конкретной РИТ, определяем величину электрической энергии  $W_\tau$ , которая должна выделиться в канале ВЭХВ, чтобы обеспечить выполнение технологических операций, из зависимости:

$$W_\tau = W_n - \Delta W. \quad (8)$$

Учитывая, что использование ВЭС сводит к минимуму предпробивные потери, принимаем, что

$$W_\tau \approx W_0 = W_1 + W_2, \quad (9)$$

где  $W_0$  – суммарная энергия двухконтурного управляемого ГИТ, Дж;  $W_1$  – энергия первого импульса (первого контура ГИТ), Дж;  $W_2$  – энергия второго импульса (второго контура ГИТ), Дж.

Согласно рекомендациям работы [11], величину энергии первого импульса принимаем

равной 45 Дж. Исходя из технической допустимой величины зарядного напряжения  $U_1$ , определяемой типом используемых конденсаторов, которые выбираются из разработанного в ИИПТ НАН Украины параметрического ряда [20], рассчитываем длину разрядного промежутка, емкость первого контура и характерное время первого импульса тока.

Длина разрядного промежутка  $l$ :

$$l = U_1 / E_{кр}, \quad (10)$$

где  $E_{кр}$  – критическая величина напряженности электрического поля в разрядном промежутке, при которой обеспечивается максимальная эффективность использования ВЭС, В/м.

Для ВЭС с 60% содержанием алюминия  $E_{кр} \geq 2 \times 10^5$  В/м, а для ВЭС с 40% содержанием алюминия  $E_{кр} \geq 10^6$  В/м [7].

Величина емкости конденсаторов  $C_1$  определяется выражением:

$$C_1 = 2W_1 / U_1^2. \quad (11)$$

Характерное время первого импульса  $t_1$  определяется уравнением:

$$t_1 = \pi \sqrt{L_1 \times C_1}, \quad (12)$$

где  $L_1$  – индуктивность первого разрядного контура, Гн.

Далее определяем энергию второго высоковольтного импульса тока из выражения:

$$W_2 = W_0 - W_1. \quad (13)$$

Время задержки  $t_z$  между временем ввода первой и второй порций энергии определяется из зависимости:

$$t_z = t_1 \times \bar{\tau}, \quad (14)$$

где  $\bar{\tau}$  выбирается по представленной выше графической зависимости (см. рисунок) для рассчитанной массы экзотермической смеси  $M$  при условии  $\bar{\mu} = \max$ .

Затем вычисляются параметры второго контура ГИТ. С учетом того, что эффективность преобразования химической энергии в канале ВЭХВ с ростом величины  $U_2$  повышается, величина напряжения  $U_2$  выбирается в интервале:

$$U_1 \geq U_2 > 0,7U_1. \quad (15)$$

По аналогии с расчетом  $C_1$  определяется величина емкости  $C_2$ :

$$C_2 = 2W_2 / U_2^2. \quad (16)$$

И, наконец, зная массу и удельный вес применяемой ВЭС, можно определить диаметр диэлектрической трубки, в которую помещают ВЭС, либо диаметр отверстия в электроде в случае автоматической подачи ВЭС в разрядный промежуток из выражения:

$$d_i = \sqrt{\frac{4M \times l \times \rho_c}{\pi}}. \quad (17)$$

Определенные таким образом параметры двухконтурного ГИТ, длина разрядного промежутка и масса ВЭС обеспечивают необходимые энергетические характеристики ВЭХВ при управляемом вводе электрической энергии в канал разряда, удовлетворяющие требованиям заданных РИТ.

Следует отметить, что при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда по сравнению с ВЭХВ при традиционной одноконтурной схеме ГИТ величина электрической энергии, инициирующая протекающие в разрядном канале экзотермические химические превращения, существенно снижается и одновременно возрастает вклад энергии от экзотермических химических превращений в интегральную энергию ВЭХВ. Это позволит значительно улучшить массогабаритные показатели комбинированных источников энергии без снижения их удельных энергетических характеристик.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

Тестирование разработанного алгоритма расчета параметров комбинированного энергоисточника ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии проведено на примере двух заданных значений полной энергии в канале ВЭХВ  $W_n$ , необходимой для выполнения технологических операций, исходя из технологических условий обработки материалов. Для тестирования алгоритма значения полной энергии в канале ВЭХВ приняты равными:  $W_{n1} = 1000$  Дж и  $W_{n2} = 1150$  Дж. По этим исходным данным рассчитывались параметры ГИТ, необходимые массы ВЭС и времена задержек между последовательными импульсами ввода энергии в канал разряда. Затем, используя полученные расчетные значения параметров ГИТ, масс ВЭС и времен задержек, проводились эксперименты, в результате которых определялось реальное количество энергии, выделившейся в канале ВЭХВ, и сравнивалось с исходным заданным значением  $W_n$ .

Для проведения экспериментов использовали ВЭС с 40% содержанием алюминия разной дисперсности (8% – ПАП-1, 32% – ПА-2). По разработанному алгоритму определены необходимые массы ВЭС  $M$  для заданных двух значений полной энергии:  $M_1 = 0,2 \times 10^{-3}$  кг и  $M_2 = 0,3 \times 10^{-3}$  кг. По обобщенным зависимостям  $\bar{\mu} = f(\bar{\tau})$ , представленным на рисунке, найдены величины максимальной относительной удельной энергетической эффективности экзо-

**Таблица 1.** Параметры двухконтурных ГИТ

Номер серии экспериментов	Суммарная энергия ГИТ $W_0$ , Дж	Масса ВЭС $M$ , $10^{-3}$ кг	Энергия первого импульса $W_1$ , Дж	Энергия второго импульса $W_1$ , Дж	Время задержки между импульсами $t_z$ , $10^{-6}$ с
1	670	0,2	45	627	12,7
2	610	0,3	45	563	13,0

**Таблица 2.** Результаты экспериментов, полученные при тестировании алгоритма

Номер серии и опытов	Энергия ГИТ $W_0$ , Дж	Способ ввода энергии	Период пульсаций ППП $T_n$ , мс	Время задержки $t_z$ , $10^{-6}$ с	Тепловая химическая энергия ВЭС $\Delta W$ , Дж	Удельная энергоэффективность $\mu$ , МДж/кг	Относительная величина удельной энергоэффективности $\bar{\mu} = \mu / \mu_0$
1,1	670	одним импульсом	16,1	–	178,3	0,89	–
1,2	672	двумя импульсами (45 + 627) Дж	18,4	12,7	310,2	1,55	1,74
2,1	610	одним импульсом	15,7	–	180,7	0,60	–
2,2	608	двумя импульсами (45 + 563) Дж	19,8	13,0	427,9	1,43	2,38

термических превращений  $\bar{\mu}_{\max}$  и соответствующие им относительные значения времени задержки между подачей первой и второй порций энергии  $\bar{\tau}$ :  $\bar{\mu}_{\max 0,2} = 1,65$  при  $\bar{\tau} = 4,9$  и  $\bar{\mu}_{\max 0,3} = 2,25$  при  $\bar{\tau} = 5,0$ .

Далее по алгоритму определены значения суммарной энергии двухконтурных управляемых ГИТ для двух заданных значений полной энергии в канале ВЭХВ:  $W_{01} = 670$  Дж и  $W_{02} = 610$  Дж. Затем рассчитаны параметры первых и вторых контуров ГИТ и времена задержек подачи вторых импульсов энергии в канал разряда для двух рассматриваемых вариантов:  $t_{z1} = 12,7 \times 10^{-6}$  с,  $t_{z2} = 13,0 \times 10^{-6}$  с.

Эксперименты по тестированию алгоритма расчета параметров комбинированного энергоисточника на базе ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в разрядный канал выполнялись двумя сериями с применением двухконтурных ГИТ с параметрами, определенными расчетом по разработанному алгоритму, и с использованием соответствующих расчету масс ВЭС  $M_1 = 0,2 \times 10^{-3}$  кг и  $M_2 = 0,3 \times 10^{-3}$  кг. Параметры двухконтурных ГИТ для проведения экспериментов по тестированию алгоритма приведены в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований количество энергии  $W_n$ , выделившейся в канале ВЭХВ, определяли по периоду пульсации парогазовой полости  $T_n$  — интервал времени между пиками давления [7]. Профиль волны давления в среде в экваториальной плоскости на

расстоянии 0,3 м от канала разряда измеряли с помощью пьезокерамического датчика давления и фиксировали на запоминающем осциллографе TDS 2024В.

Поскольку процессы пробоя, выделение энергии в канале разряда и генерирование волн сжатия носят стохастический характер, то для увеличения степени достоверности и оценки статистического разброса получаемых результатов эксперименты выполнялись сериями. Число опытов в серии экспериментов, характеризующихся фиксированными условиями проведения, зависело от разброса регистрируемых параметров ВЭХВ. По полученным выборкам вычислялись оценки средних значений результатов [21].

Результаты экспериментов, полученные при тестировании алгоритма расчета параметров двухконтурного ГИТ, используемого в качестве энергоисточника управляемого ВЭХВ, приведены в табл. 2. Здесь же для сравнения приведены результаты экспериментов ВЭХВ при использовании традиционного одноконтурного ГИТ.

Приведенные результаты экспериментов (табл. 2) показывают, что при ВЭХВ с управляемым вводом энергии в разрядный канал дополнительно выделившаяся тепловая химическая энергия ВЭС за счет увеличения полноты сгорания повышается примерно в 2 раза по сравнению с традиционным одноимпульсным вводом энергии. Это позволяет сократить расход электрической энергии ГИТ на обеспечение

Таблица 3. Расчетные и экспериментальные значения энергетических характеристик ВЭХВ

Метод определения значений	Полная энергия ВЭХВ $W_n$ , Дж	Удельная энергоэффективность $\mu$ , МДж/кг	Относительная величина удельной энергоэффективности $\bar{\mu} = \mu / \mu_0$
Серия 1			
Расчет	1000,0	1,65	1,65
Эксперимент	982,2	1,55	1,74
Расхождение расчетных и экспериментальных значений, %	1,8	6,1	5,5
Серия 2			
Расчет	1150,0	1,80	2,25
Эксперимент	1035,9	1,43	2,38
Расхождение расчетных и экспериментальных значений, %	9,9	20,0	5,8

необходимых энергетических характеристик ВЭХВ, заданных конкретной разрядно-импульсной технологией обработки материалов.

Результаты сравнения рассчитанных по алгоритму и экспериментальных значений энергетических характеристик ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в разрядный канал представлены в табл. 3.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает совпадение результатов эксперимента с расчетом по разработанному алгоритму до 20%, что позволяет рекомендовать алгоритм для практического использования с допустимой для инженерных расчетов точностью.

Полученные результаты свидетельствуют о реальной возможности практического использования предложенного алгоритма для расчета параметров комбинированных источников энергии на базе ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в его канал с улучшенными массогабаритными показателями ГИТ за счет уменьшения его энергоемкости.

В дальнейшем представляется целесообразным продолжить накопление массива экспериментальных данных по энергетическим характеристикам ВЭХВ с управляемым вводом электроэнергии в канал разряда с целью расширения диапазона варьирования технологических факторов, необходимых для обеспечения заданных силовых и энергетических характеристик устройств с целью реализации различных РИТ, а следовательно, расширение диапазона применимости предложенного алгоритма расчета параметров комбинированного энергоисточника ВЭХВ.

### ВЫВОДЫ

Проведенный анализ результатов исследований энергетических и гидродинамических

характеристик ВЭХВ показал существенное влияние на процессы преобразования энергии в канале разряда условий, в которых осуществляется разряд, определяемых требованиями технологических процессов (неограниченный и ограниченный объемы, одноразрядный и много-разрядный режимы, управляемый ввод электро-энергии в разрядный канал). Предложена методология расчета комбинированных энергоисточников применительно к потребностям различных разрядно-импульсных технологий, использующих высоковольтный электрохимический взрыв.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований обосновано преимущество использования высоковольтного электрохимического взрыва с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда, позволяющего в несколько раз увеличить удельную энергетическую эффективность ВЭХВ, что даст возможность значительно улучшить массогабаритные показатели комбинированных источников энергии.

Разработан алгоритм расчета параметров комбинированных электроразрядных источников управляемого ВЭХВ, обеспечивающих заданные конкретной РИТ энергетические характеристики. Показано, что параметры двухконтурного ГИТ, длина разрядного промежутка и масса ВЭС, определенные по разработанному алгоритму, обеспечивают необходимые энергетические характеристики ВЭХВ при управляемом вводе электрической энергии в канал разряда, удовлетворяющие требованиям заданных РИТ.

Приведены результаты тестирования разработанного алгоритма расчета, подтверждающие возможность его использования для инженерных расчетов комбинированных энергоисточников ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый, Г.А., *Научные основы разрядноимпульсных технологий*, Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Яцюк, С.А., *Электроразрядное разрушение донных грунтов, ЭОМ*, 2006, т. 42, № 1, с. 70.
3. Коростовенко, В.В., Коростовенко, Л.П., Стрекалова, Т.А., Стрекалова, В.А., Особенности физических процессов при разрядноимпульсных методах в комбинированных технологиях переработки минерального сырья, *Межд. журнал эксперим. образ.*, 2013, № 10-1, с. 129.
4. Рытов, С.А., Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций, *Жилищн. стрoит.*, 2010, № 5, с. 47.
5. Рытов, С.А., Смирнов, П.В., Электроразрядные технологические устройства буровых свай большого диаметра, *Информ. вестник*, 2006, т. 1, № 12, с. 10.
6. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатный, Г.П., Импульсные электроразрядные технологии в строительстве, *Будівництво України*, 2008, № 10, с. 39.
7. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*, Киев: Наукова думка, 1992, 168 с.
8. Rizun, A.R., Golen', Yu.V., Denisyuk, T.D., Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2008, vol. 44, no. 3, p. 240.
9. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Кононов, В.Ю., и др., Электроразряд – источник энергии экологически чистых технологий разрушения, *ЭОМ*, 2012, т. 48, № 5, с. 109.
10. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Процессы преобразования энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 5, с. 41.
11. 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.
12. Vovchenko, A., Demydenko, L., 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, no. 2–5, p. 29.
13. Крутиков, В.С., Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Метод оценки полей давлений при высоковольтном электрохимическом взрыве в закрытых объемах, *ЭОМ*, 2014, т. 50, № 5, с. 84.
14. Rizun, A.R., Posdeev, V.A., Golen', Yu.V., One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 263.
15. Rizun, A.R., Golen', Yu.V., Denisyuk, T.D., Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 2, p. 116.
16. Блащенко, А.Д., Половинка, В.Д., Тертилов, Р.В., Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 1, с. 97.
17. Тертилов, Р.В., Оптимизация разрядно-импульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов, *Технічна електродинаміка*, 2011, № 3, с. 67.
18. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Козырев, С.С., *Способ осуществления электрохимических взрывов в жидкой среде*, Украина, пат. 123337, 2021, Бюл. № 11, 4 с.
19. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Параметры высоковольтного электрохимического взрыва в условиях управляемого ввода электрической энергии, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 2, с. 35.
20. 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.
21. Вентцель, Е.С., Овчаров, Л.А., *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*, Москва: Наука, 1988, 477 с.

## Summary

The analysis and generalization of the results of studies of high-voltage electrochemical explosions (HVECHE) proceeding under various conditions, driven by special aspects and needs of the existing HVECHE based pulse-discharge technologies, was carried out. A methodology to calculate combined energy sources is proposed in relation to the needs of various discharge-pulse technologies using a high-voltage electrochemical explosion. Based on the analysis of the results of experimental studies, the advantage of using a high-voltage electrochemical explosion with a controlled input of electrical energy into the discharge channel was substantiated. An algorithm was developed to calculate the parameters of a combined electric-discharge source of a controlled HVECHE and the required mass of the exothermic composition which provides the energy characteristics specified by a specific discharge-pulse technology. The results of testing the developed calculation algorithm are presented confirming the possibility of its use for engineering calculations of combined power sources with a controlled input of electrical energy into the discharge channel.

**Keywords:** high-voltage electrochemical explosion, exothermic composition, pulse current generator, controlled input of energy, pulse-discharge technologies, calculation algorithm, specific electrical energy, efficiency of energy conversion