

Исследование энергетических и силовых характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде

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 16.07.2024

После доработки 25.11.2024

Принята к публикации 29.11.2024

Установлено оптимальное значение удельной электрической энергии, вводимой в канал разряда, которое обеспечивает максимальное выделение химической (тепловой) энергии экзотермических реакций в канале разряда. Выявлено, что амплитуда волны давления, генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, определяется электрической энергией, вводимой в канал разряда, и не зависит от массы экзотермической смеси. Условие генерирования максимального импульса давления совпадает с условием выделения максимальной химической энергии и определяется оптимальным значением удельной электрической энергии, вводимой в канал разряда. Установленные закономерности могут быть использованы при синтезе комбинированных энергоисточников для разрядно-импульсных технологий.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, конденсированная среда, экзотермическая смесь, генератор импульсных токов, разрядно-импульсные технологии, удельная электрическая энергия, амплитуда волны давления, импульс давления

УДК 532:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.6.48>

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный электрический разряд в химически активных конденсированных средах, не относящихся к взрывчатым веществам в традиционном понимании, которые способны к экзотермическим превращениям в режиме взрывного горения лишь под действием высоких температур и давлений в электроразрядной плазме канала разряда, представляет интерес как источник концентрированного, дозированного воздействия с высокими удельными энергетическими показателями. Причем сочетание энергии электрического разряда в конденсированной среде и энергии взрывного горения экзотермической смеси (ЭС) в канале разряда позволяет при идентичных, по сравнению с высоковольтным электрическим разрядом в жидкости, уровнях силового и энергетического воздействия на объект обработки существенно уменьшить затраты электроэнергии, стоимость и габариты электроразрядного оборудования. Это обеспечивает высокую эффективность использования высоковольтного электрохимического взрыва в качестве энергоисточника в различных технологических процессах,

требующих мощного импульсного силового воздействия на объекты обработки (разрушение естественных и искусственных негабаритов; рыхление крепких донных грунтов; интенсификация процессов в водных, нефтяных и газовых скважинах путем обработки призабойных зон скважин; уплотнение и утолщение буронабивных свай в строительстве и др. [1–5]). Повышение эффективности использования высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированных средах в различных разрядно-импульсных технологиях требует исследования его энергетических и силовых характеристик с целью определения оптимальных режимов экзотермического преобразования энергии в канале разряда с выделением максимально возможного количества химической энергии и генерированием волны давления, обеспечивающей необходимые энергетическое и силовое воздействия на объекты обработки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Эффективность экзотермического преобразования энергии при высоковольтном электро-

химическом взрыве в конденсированной среде определяется полнотой сгорания массы M экзотермической смеси, то есть величиной дополнительной химической (тепловой) энергии ΔW_X , которая выделяется в канале высоковольтного разряда в результате ее сгорания. С целью узнать, как влияют энергетические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде на величину высвобождаемой дополнительной химической энергии ΔW_X , были проведены экспериментальные исследования. Определялась зависимость $\Delta W_X = f(M)$ выделенной химической энергии от массы экзотермической смеси, помещенной в зону разряда, при различных значениях электрической энергии $W_Э$, введенной в канал разряда. А также устанавливалась зависимость дополнительной химической энергии от удельной электрической энергии $\Delta W_X = f(w_Э)$, вводимой в канал разряда. Эти исследования позволили выявить условия обеспечения максимальной эффективности экзотермического преобразования энергии, поэтому представляют практический и научный интерес, учитывая перспективы прикладного использования высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированных средах в различных разрядно-импульсных технологиях.

Экспериментальные исследования высоковольтного электрохимического взрыва проводились в открытом объеме, заполненном водой, путем варьирования $W_Э$ энергии генератора импульсных токов с емкостным накопителем (ГИТ), используемого в качестве энергоисточника, и массы экзотермической смеси M , вводимой в зону разряда. Электрическая энергия ГИТ $W_Э$ определялась по значениям электрических характеристик $I(t)$ и $U(t)$ в процессе разряда. При проведении экспериментальных исследований важным методическим моментом являлось определение энергии ΔW_X , выделившейся в канале разряда за счет химических экзотермических превращений. При высоковольтном электрохимическом взрыве в конденсированной среде суммарная энергия состоит из электрической энергии энергоисточника (ГИТ) $W_Э$ и тепловой химической энергии ΔW_X , что высвобождается при сгорании экзотермической смеси в канале высоковольтного разряда. Суммарную энергию, выделившуюся в канале разряда, можно определить по значению энергии W_n послеразрядной парогазовой полости (ППП), формируемой в процессе расширения канала разряда в конденсированной среде. Для разделения общей энергии на электрическую $W_Э$ и химическую ΔW_X составляющие используем выражение:

$$\Delta W_X = W_n - \eta_n \times W_Э, \quad (1)$$

где W_n – полная энергия ППП, Дж; η_n – коэффициент преобразования введенной в канал разряда электрической энергии $W_Э$ в энергию ППП.

Энергия послеразрядной парогазовой полости W_n рассчитывалась с использованием формулы Виллиса по периоду ее пульсации T_n [6]:

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

где P_0 – гидростатическое давление на глубине пульсаций ППП, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; T_n – период пульсаций ППП, с.

Количество выделенной энергии в ППП W_n определялось по периоду пульсаций ППП T_n , то есть по интервалу времени между пиками давления. Давление в конденсированной среде $P(t)$ в экваториальной плоскости на расстоянии 0,3 м от канала разряда измерялось с помощью пьезокерамического датчика давления и фиксировалось на запоминающем осциллографе TDS 2024В.

Экспериментальные исследования проводились с использованием экзотермической смеси с 60% содержанием алюминия, так как, согласно данным работы [6], этот состав наиболее эффективен с точки зрения дополнительного энерговыделения химической энергии.

Процессы пробоя и выделения энергии в канале разряда носят стохастический характер [7, 8], поэтому для увеличения степени достоверности число опытов в серии экспериментов, характеризующихся фиксированными условиями проведения, выбиралось в зависимости от разброса регистрируемых параметров разряда. Минимальное значение было выбрано равным пяти. По полученным выборкам вычислялись оценки средних значений.

В экспериментах масса экзотермической смеси M варьировалась в диапазоне $(0,1-0,6) \times 10^{-3}$ кг. Энергия ГИТ $W_Э$ изменялась в интервале от 312,5 Дж до 625 Дж путем варьирования емкости батареи конденсаторов C в диапазоне $(1,0-2,0) \times 10^{-6}$ Ф, величина зарядного напряжения U_0 при этом оставалась постоянной и равнялась $U_0 = 25 \times 10^3$ В, что обусловлено необходимостью поддержания постоянной напряженности электрического поля для обеспечения пробоя экзотермической смеси. Величина удельной электрической энергии изменялась в широком диапазоне $(0,52-6,25) \times 10^6$ Дж/кг.

Экспериментальные данные и результаты расчетов величины дополнительной химической энергии ΔW_X , выделившейся в канале разряда за

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные

$W_{\text{Э}}, \text{Дж}$	$M \times 10^{-6}, \text{кг}$	$T_n, \text{мс}$	$W_n, \text{Дж}$	$\Delta W_{\text{Х}}, \text{Дж}$	$w_{\text{Э}} \times 10^6, \text{Дж/кг}$
312,5	0,1	13,00	138,3	84,0	3,13
312,5	0,2	13,78	180,0	130,0	1,56
312,5	0,3	13,89	183,7	120,0	1,04
312,5	0,4	13,74	175,1	115,0	0,78
312,5	0,6	13,43	163,5	109,0	0,52
450	0,1	13,92	182,1	115,0	4,50
450	0,2	15,05	249,5	182,0	2,25
450	0,3	15,98	275,4	208,0	1,50
450	0,4	15,45	248,9	181,0	1,13
450	0,6	15,40	246,5	179,0	0,75
625	0,1	15,18	236,1	179,0	6,25
625	0,2	15,65	258,7	201,0	3,12
625	0,3	15,92	277,3	220,0	2,08
625	0,4	17,15	340,5	282,0	1,56
625	0,6	16,28	291,2	229,0	1,04

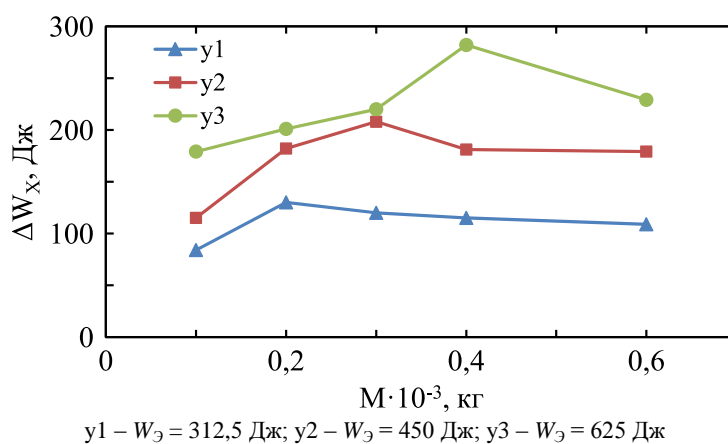


Рис. 1. Зависимости $\Delta W_{\text{Х}} = f(M)$ величины химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$, которая выделилась в канале разряда, от массы экзотермической смеси M для различных значений электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$.

счет экзотермических преобразований, приведены в табл. 1.

Результаты экспериментальных исследований зависимости $\Delta W_{\text{Х}} = f(M)$ величины химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$, выделившейся в канале разряда за счет экзотермических превращений, от массы экзотермической смеси M , вводимой в разрядный промежуток, для различных значений электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ представлены в виде точечной диаграммы на рис. 1.

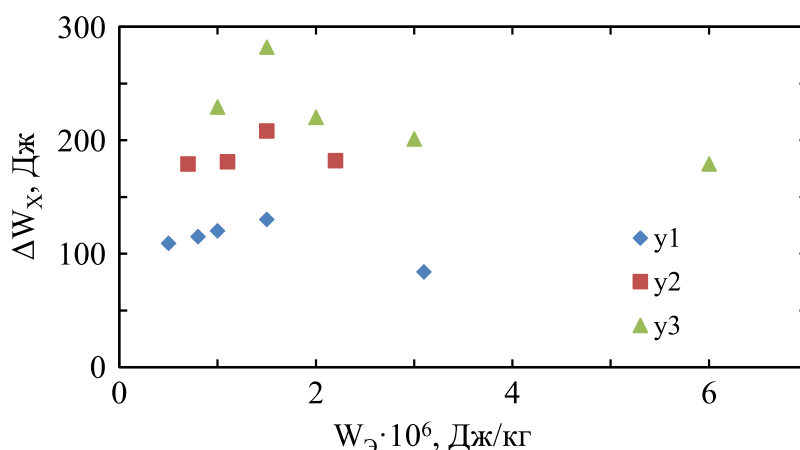
Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что для фиксированных значений электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$, вводимой в канал разряда, наблюдается максимум зависимости $\Delta W_{\text{Х}} = f(M)$. Это объясняется тем, что при фиксированной величине энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ и значительном увеличении массы ЭС M уменьшается удельная электрическая энергия, что приводит к затуханию экзотермической реакции и уменьшению количества выделенной химической энергии.

С ростом энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ максимум химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$ сдвигается в сторону

больших значений масс экзотермической смеси M . Так, максимум зависимости $\Delta W_{\text{Х}} = f(M)$ наблюдается соответственно для $W_{\text{Э}} = 312,5 \text{ Дж}$ при массе ЭС $M = 0,2 \times 10^{-3} \text{ кг}$, для $W_{\text{Э}} = 450,0 \text{ Дж}$ при массе ЭС $M = 0,3 \times 10^{-3} \text{ кг}$, для $W_{\text{Э}} = 625 \text{ Дж}$ при массе ЭС $M = 0,4 \times 10^{-3} \text{ кг}$.

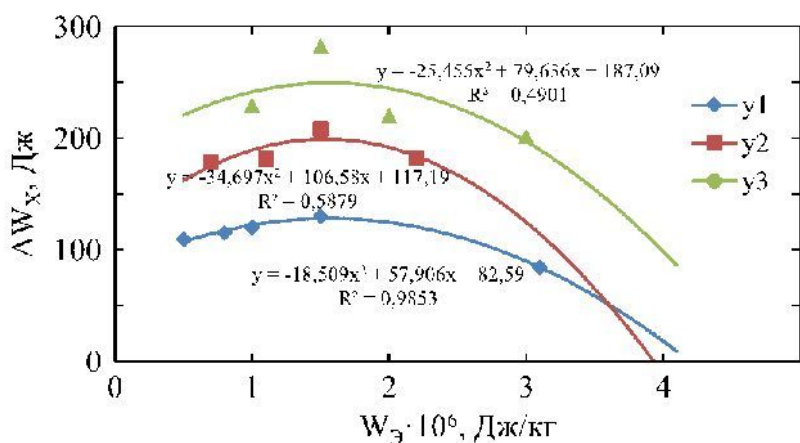
Из приведенных результатов следует, что для каждого фиксированного значения энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ существует оптимальная величина массы экзотермической смеси M , при которой выделяющаяся в канале разряда энергия за счет экзотермических химических превращений $\Delta W_{\text{Х}}$ максимальна. При этом величина удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M$, введенной в канал разряда на единицу массы экзотермической смеси, примерно одинакова и лежит в пределах $(1,50-1,56) \times 10^6 \text{ Дж/кг}$.

Результаты экспериментальных исследований зависимости $\Delta W_{\text{Х}} = f(w_{\text{Э}})$ величины химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$, выделившейся в канале разряда за счет экзотермических превращений, от удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M$, введенной в канал разряда, для различных значений



$$y1 - W_{\text{Э}} = 312,5 \text{ Дж}; y2 - W_{\text{Э}} = 450 \text{ Дж}; y3 - W_{\text{Э}} = 625 \text{ Дж}$$

Рис. 2. Зависимости $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ величины химической энергии ΔW_X , которая выделилась в канале разряда, от удельной электрической энергии $w_{\text{Э}}$ для разных значений электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$.



$$y1 - W_{\text{Э}} = 312,5 \text{ Дж}; y2 - W_{\text{Э}} = 450 \text{ Дж}; y3 - W_{\text{Э}} = 625 \text{ Дж}$$

Рис. 3. Аппроксимация зависимостей $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ величины химической энергии ΔW_X , выделившейся в канале разряда, от удельной электрической энергии $w_{\text{Э}}$ для различных значений электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$.

электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ представлены в виде точечной диаграммы на [рис. 2](#).

Анализ расположения экспериментальных точек на точечной диаграмме зависимостей $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ при разных значениях электрической энергии $W_{\text{Э}}$ показывает, что в определенной зоне координат существуют максимумы. Для более детального анализа и определения координат максимумов проведена аппроксимация этих зависимостей в диапазоне координат $w_{\text{Э}} = (0,5-4,0) \times 10^6$ Дж/кг вероятных максимумов полиномиальной функцией второй степени с помощью стандартной функции – линии тренда программного обеспечения Microsoft Excel ([рис. 3](#)).

Исследование функций аппроксимации зависимостей $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ ([рис. 3](#)) на экстремум позволило определить координаты максимумов ($w_{\text{Э}1} = 1,564 \times 10^6$ Дж/кг, $w_{\text{Э}2} = 1,536 \times 10^6$ Дж/кг, $w_{\text{Э}3} = 1,564 \times 10^6$ Дж/кг). Максимумы функций $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ при различных значениях электрической энергии $W_{\text{Э}}$ наблюдаются примерно при

одном и том же значении удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг.

Анализируя результаты экспериментальных исследований, представленных на [рис. 2](#) и [3](#), можно констатировать, что с ростом энергии ГИТ увеличивается дополнительная энергия, выделяемая в канале разряда за счет химических экзотермических превращений, при этом экстремумы функций $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ для различных значений энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ наблюдаются примерно при одном и том же значении удельной энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M$, а именно при $w_{\text{Э} \text{ опт}} \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг. То есть для получения максимального значения дополнительной химической энергии ΔW_X за счет экзотермических преобразований экзотермической смеси в канале высоковольтного разряда необходимо обеспечивать оптимальное значение вводимой в канал разряда удельной электрической энергии $w_{\text{Э} \text{ опт}}$.

По результатам анализа полученных экспериментальных данных при исследовании энергети-

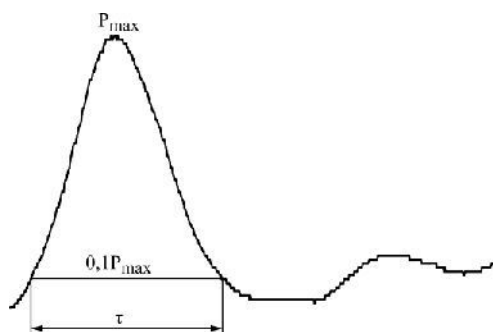
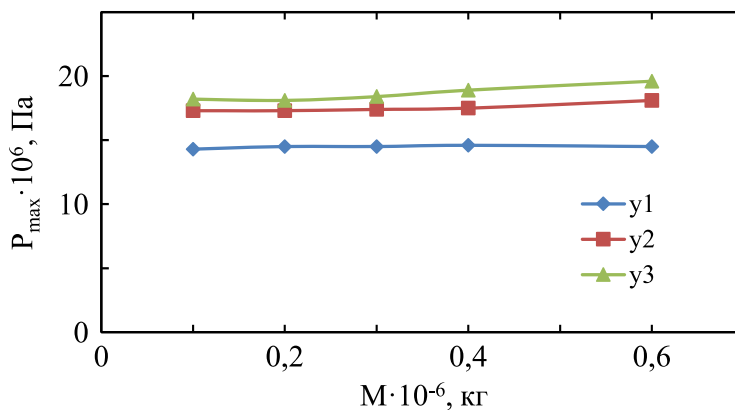


Рис. 4. Схематическое изображение волны давления, генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде.

Таблица 2. Параметры волны давления, генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, в зависимости от энергетических характеристик

$W_{\text{Э}}$, Дж	$M \times 10^{-6}$, кг	P_{max} , МПа	J , Па·с	$\Delta W_{\text{Х}}$, Дж	$w_{\text{Э}} \times 10^6$, Дж/кг
312,5	0,1	14,3	230,0	84,0	3,13
312,5	0,2	14,5	250,8	130,0	1,56
312,5	0,3	14,5	243,5	120,0	1,04
312,5	0,4	14,6	221,9	115,0	0,78
312,5	0,6	14,5	210,3	109,0	0,52
450	0,1	17,3	230,9	115,0	4,50
450	0,2	17,3	250,2	182,0	2,25
450	0,3	17,4	274,6	208,0	1,50
450	0,4	17,5	260,1	181,0	1,13
450	0,6	18,1	250,1	179,0	0,75
625	0,1	18,2	250,0	179,0	6,25
625	0,2	18,1	266,7	201,0	3,12
625	0,3	18,4	310,2	220,0	2,08
625	0,4	18,9	349,4	282,0	1,56
625	0,6	19,6	305,0	229,0	1,04



$y1 - W_{\text{Э}} = 312,5$ Дж; $y2 - W_{\text{Э}} = 450$ Дж; $y3 - W_{\text{Э}} = 625$ Дж

Рис. 5. Зависимость $P_{\text{max}} = f(M)$ амплитуды волны давления P_{max} , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от массы экзотермической смеси M , вводимой в разрядный промежуток, при разных значениях энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$.

ческих характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде можно сделать вывод, что в исследованном диапазоне изменений параметров наблюдаются следующие закономерности:

– при варьировании массы экзотермической смеси M и фиксированной энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ наблюдается максимум химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$, выделившейся в канале разряда за счет экзотермических преобразований, значение которого возрастает с увеличением введенной

электрической энергии $W_{\text{Э}}$, накопленной в ГИТ. Причем с ростом энергии ГИТ максимум химической энергии $\Delta W_{\text{Х}}$ сдвигается в сторону больших значений масс M ;

– для каждого фиксированного значения электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$, введенной в канал разряда, существует оптимальная величина массы экзотермической смеси M , при которой выделенная химическая энергия $\Delta W_{\text{Х}}$ достигает максимальных значений;

– максимум дополнительной химической энергии ΔW_X , выделившейся в канале разряда за счет экзотермических преобразований, обеспечивается при оптимальном значении введенной в канал разряда удельной электрической энергии, равном $w_{\text{Эопт}} \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг.

Использование определенных по результатам экспериментальных исследований высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде условий обеспечения выделения максимального количества дополнительной химической энергии при синтезе комбинированных энергоисточников для разрядно-импульсных технологий позволит существенно уменьшить потребление электроэнергии за счет добавления максимально возможной величины химической энергии и минимизировать расход экзотермических смесей при реализации технологических операций с использованием высоковольтного электрического разряда в экзотермической среде.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Результаты исследования энергетических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде дают возможность оптимизировать параметры энергоисточника, но не позволяют оценить пространственно-временное силовое воздействие на объекты обработки. Для обеспечения требований конкретных разрядно-импульсных технологий по силовому воздействию на объекты обработки необходимо проведение целевых исследований зависимости функций силового воздействия в определенных точках волновой зоны технологического объема, заданных потребностями разрядно-импульсных технологий, от энергетических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде.

Силовое воздействие обеспечивается волной давления $P(t)$, распространяемой в рабочей среде. Схематичное изображение генерированной волны давления при высоковольтном электрохимическом взрыве в конденсированной среде показано на рис. 4.

В ходе эксперимента исследовалась волна давления $P(t)$, распространяющаяся в конденсированной среде, в точке на расстоянии 0,3 м в экваториальной плоскости по отношению к каналу разряда, при этом анализировались следующие параметры волны давления:

- амплитуда P_{max} , Па;
- импульс J , Па·с за время τ , который определялся по выражению:

$$J = \int_0^{\tau} P(t) dt. \quad (3)$$

Результаты определения вышеуказанных параметров волны давления приведены в табл. 2.

Результаты экспериментальных исследований зависимости амплитуды волны давления P_{max} , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от массы экзотермической смеси M , введенной в зону разряда, при разных значениях энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ представлены в виде точечной диаграммы на рис. 5.

Анализ зависимости $P_{\text{max}} = f(M)$ при разных значениях энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ показал, что амплитуда давления при повышении энергии ГИТ в исследованном диапазоне увеличивается. Но при неизменной величине энергии ГИТ амплитуда давления практически не зависит от массы экзотермической смеси.

Результаты экспериментальных исследований зависимости импульса волны давления J , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от массы экзотермической смеси M , введенной в зону разряда, при разных значениях энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ представлены в виде точечной диаграммы на рис. 6.

Анализ зависимости $J = f(M)$ при разных значениях энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ показал, что при повышении энергии ГИТ наблюдается тенденция, подобная влиянию на амплитуду давления, то есть импульс давления увеличивается.

При варьировании массы экзотермической смеси и фиксированной энергии ГИТ зависимости $J = f(M)$ имеют экстремум, который смещается в сторону больших значений масс при повышении энергии ГИТ. Сравнительный анализ зависимостей $\Delta W_X = f(M)$ (рис. 1) и $J = f(M)$ (рис. 6) показал, что максимумы этих функций для фиксированных значений энергии ГИТ наблюдаются при одних и тех же величинах масс экзотермической смеси M . Это объясняется тем, что импульс давления J , который распространяется в жидкости на стадии интенсивного расширения канала разряда, является интегральной характеристикой влияния на объект обработки и поэтому коррелирует с энергетическими характеристиками, в частности с количеством дополнительно выделенной химической энергии ΔW_X .

Результаты экспериментальных исследований зависимости $J = f(w_{\text{Э}})$ импульса волны давления J , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M$,

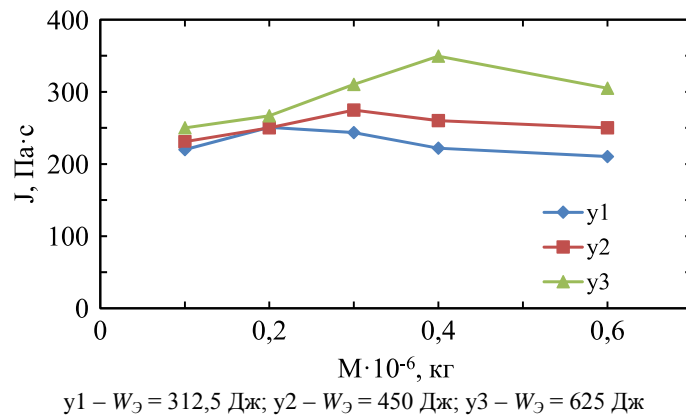


Рис. 6. Зависимость $J = f(M)$ импульса волны давления J , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от массы экзотермической смеси M , вводимой в разрядный промежуток, при разных значениях энергии ГИТ $W_э$.

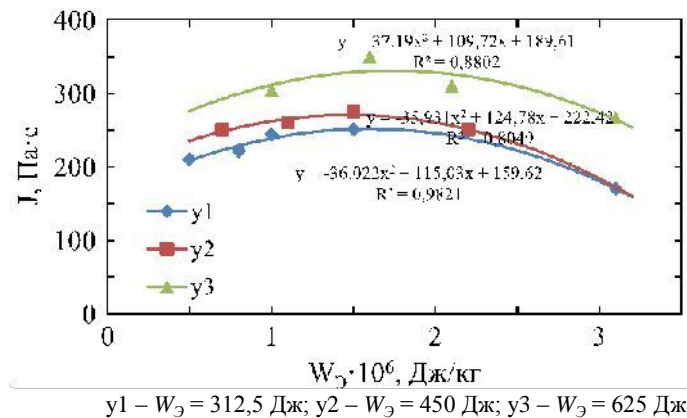


Рис. 7. Зависимость $J = f(w_э)$ импульса волны давления J , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, от удельной электрической энергии $w_э$, введенной в канал разряда, для различных значений электрической энергии ГИТ $W_э$.

введенной в канал разряда, для различных значений электрической энергии ГИТ $W_э$ представлены в виде точечной диаграммы на рис. 7.

Анализ зависимостей $J = f(w_э)$ импульса волны давления J от удельной электрической энергии $w_э$ при разных значениях электрической энергии $W_э$ показывает, что в определенной зоне координат существуют максимумы функций. Для определения координат максимумов проведена аппроксимация этих зависимостей в диапазоне координат $w_э = (0,5-4,0) \times 10^6$ Дж/кг вероятных максимумов полиномиальными функциями второй степени с помощью стандартной функции – линии тренда программного обеспечения Microsoft Excel (рис. 7). Исследование функций аппроксимации зависимостей $J = f(w_э)$ на экстремум позволило определить координаты максимумов функций $J = f(w_э)$ при разных значениях электрической энергии $W_э$. Максимумы наблюдаются примерно при одном и том же значении удельной электрической энергии $w_э \approx (1,55 \pm 0,5) \times 10^6$ Дж/кг.

Сравнительный анализ зависимостей $\Delta W_х = f(w_э)$ (рис. 3) и $J = f(w_э)$ (рис. 7) показал, что качественно они схожи: с ростом энергии ГИТ увеличивается как дополнительная энергия

$\Delta W_х$, выделявшаяся в канале разряда за счет химических экзотермических реакций, так и импульс давления в жидкости J , при этом экстремумы функций $\Delta W_х = f(w_э)$ и $J = f(w_э)$ для разных значений энергии $W_э$ в исследованном диапазоне ее изменения действительно наблюдаются примерно при одном и том же значении удельной энергии, а именно при $w_э \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг. Это подтверждает определяющее значение удельной электрической энергии $w_э = W_э/M$, вводимой в канал разряда, для процессов экзотермических реакций в канале разряда, обеспечивающих выделение дополнительной химической энергии $\Delta W_х$, а также имеет определяющее значение для формирования интегрального силового воздействия на объект обработки в виде импульса давления J .

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ результатов исследований энергетических и силовых характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде показал, что в исследованном диапазоне изменений параметров наблюдаются следующие закономерности:

– зависимости $\Delta W_X = f(M)$ выделяемой за счет экзотермических преобразований химической энергии в канале разряда ΔW_X от количества экзотермической смеси M , введенной в зону разряда, при фиксированной энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ имеют максимум. Максимальное значение количества выделенной химической энергии ΔW_X возрастает с увеличением введенной электрической энергии $W_{\text{Э}}$, накопленной в ГИТ. Причем с ростом энергии ГИТ максимум химической энергии ΔW_X сдвигается в сторону больших значений масс экзотермической смеси M ;

– для каждого фиксированного значения электрической энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$, введенной в канал разряда, существует оптимальная величина массы экзотермической смеси M , при которой выделенная химическая энергия ΔW_X достигает максимальных значений;

– максимум дополнительной химической энергии ΔW_X , выделившейся в канале разряда за счет экзотермических преобразований, для разных значений энергии ГИТ обеспечивается при оптимальном значении введенной в канал разряда удельной электрической энергии, равном $w_{\text{Эопт}} = W_{\text{Э}}/M \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг;

– амплитуда волны давления P_{max} , генерированной высоковольтным электрохимическим взрывом в конденсированной среде, определяется электрической энергией $W_{\text{Э}}$, вводимой в канал разряда, и не зависит от массы экзотермической смеси M ;

– зависимости $J = f(w_{\text{Э}})$ импульса волны давления J от удельной электрической энергии $w_{\text{Э}}$ при фиксированных значениях электрической энергии $W_{\text{Э}}$ имеют максимум, причем максимумы наблюдаются при одном и том же значении удельной электрической энергии, введенной в канал разряда, $w_{\text{Э}} \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг.

Сравнительный анализ зависимостей $\Delta W_X = f(M)$ и $J = f(M)$ показал, что максимумы этих функций для фиксированных значений энергии ГИТ $W_{\text{Э}}$ наблюдаются при одних и тех же величинах масс экзотермической смеси M . Зависимости $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ и $J = f(w_{\text{Э}})$ также качественно схожи: с ростом энергии ГИТ увеличивается как дополнительная энергия ΔW_X , выделившаяся в канале разряда за счет химических экзотермических реакций, так и импульс давления в жидкости J . При этом экстремумы функций $\Delta W_X = f(w_{\text{Э}})$ и $J = f(w_{\text{Э}})$ для разных значений электрической энергии $W_{\text{Э}}$, введенной в канал разряда, в исследованном диапазоне ее изменения наблюдаются примерно при одном и том же значении удельной электрической энергии, а именно при $w_{\text{Э}} \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг. Это объясняется тем, что импульс давления J , который распространяется в

жидкости на стадии интенсивного расширения канала разряда, является интегральной характеристикой силового влияния на объект обработки и поэтому коррелирует с энергетическими характеристиками, в частности с количеством дополнительно выделенной химической энергии ΔW_X .

Проведенный анализ результатов исследований энергетических и силовых характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде показал существенное влияние удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M$, введенной в канал разряда, на процессы экзотермического преобразования энергии в канале разряда, а также на процессы генерирования импульса давления J в конденсированной среде. По результатам анализа экспериментальных исследований установлено оптимальное значение удельной электрической энергии $w_{\text{Э}} = W_{\text{Э}}/M \approx 1,55 \times 10^6$ Дж/кг, обеспечивающее максимальное выделение дополнительной химической энергии ΔW_X , Дж и генерирование максимального импульса давления J , Па·с при высоковольтном электрохимическом взрыве в конденсированной среде.

Использование оптимального значения удельной электрической энергии, полученного по результатам проведенных исследований, при синтезе комбинированных энергоисточников для разрядно-импульсных технологий позволит существенно уменьшить потребление электроэнергии за счет добавления максимально возможной величины химической энергии, генерировать максимальный импульс давления для силового воздействия на объект обработки и минимизировать расход экзотермических смесей при реализации технологических операций с использованием высоковольтного электрохимического взрыва в конденсированной среде.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт 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., Эффективность применения электро-разрядных технологий для устройства геотехнических конструкций, *Жилищное строительство*. 2010, № 5, с. 47.
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. 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.
6. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
7. Vovchenko, A., Demydenko, L. and Kozyrev, S., *East.-Europ. J. Enterp. Technol.*, 2020, vol. 104, no. 2/5, p. 29.
8. Vovchenko, A.I., Demidenko, L.Y, Kozyrev, S.S. and Ovchinnikova, L.E., High voltage electrochemical explosion in discharge-pulse technologies, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 6, p. 731.

Summary

Based on an analysis of the results of the experimental studies of the energy characteristics of a high-voltage electrochemical explosion in a condensed medium, the optimal value of the specific electrical energy introduced into the discharge channel was established, which ensures

the maximum release of chemical (thermal) energy of exothermic reactions in the discharge channel. This makes it possible to significantly reduce electrical energy consumption by releasing the maximum amount of additional chemical energy, and consequently, reduce the weight and dimensions of electrical equipment and minimize the consumption of exothermic compositions when implementing technological operations using a high-voltage electrochemical explosion in a condensed medium. As a result of studying the power characteristics, it was established that the amplitude of the pressure wave generated by a high-voltage electrochemical explosion in a condensed medium is determined by the electrical energy introduced into the discharge channel and does not depend on the mass of the exothermic composition. The condition for generating the maximum pressure pulse coincides with the condition for the release of maximum chemical energy and is determined by the optimal value of the specific electrical energy. The established patterns can be used in the synthesis of combined energy sources for discharge-pulse technologies.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, condensed medium, exothermic composition, pulse current generator, discharge-pulse technologies, specific electrical energy, pressure wave amplitude, pressure pulse