Выбор ингредиентного состава экзотермической смеси для различных режимов высоковольтного электрохимического взрыва

Л. Ю. Демиденко[a], С. С. Козырев[b], Л. Е. Овчинникова[a,*]

[a]*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев, 54018, Украина*
[b]*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев, Украина*
[*]*e-mail: lora947@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.05.2026
После доработки 15.09.2026
Принята к публикации 22.09.2026

Установлены области применения экзотермических смесей с различным ингредиентным составом в высоковольтном электрохимическом взрыве при использовании его в разрядно-импульсных технологиях. При одноимпульсном высоковольтном электрохимическом взрыве целесообразно применять экзотермическую смесь с массовой долей с 60%$_{масс}$ содержанием алюминия. При многоимпульсном высоковольтном электрохимическом взрыве с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда уместно использовать экзотермическую смесь с 40%$_{масс}$ содержанием алюминия, что позволит продлить время экзотермической реакции и повысить выделение тепловой химической энергии. При этом произойдет повышение интегральной энергии без увеличения энергоемкости конденсаторных батарей, что поможет уменьшить массогабаритные показатели энергоисточника.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, ингредиентный состав экзотермической смеси, разрядно-импульсные технологии, удельная электрическая энергия, волна давления

УДК 532:537
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.5.44

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ), то есть высоковольтный электрический разряд в экзотермической смеси (ЭС), используется 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; уплотнение и утолщение буронабивных свай в строительстве и др. [1–6]). Исследованию энергетических характеристик ВЭХВ с целью определения оптимальных режимов экзотермического преобразования энергии в канале разряда посвящены многие работы [7–9]. В ранее проведенных исследованиях основное внимание уделялось режимам ввода электрической энергии в канал разряда, которые обеспечивали выделение максимально возможного количества химической энергии при заранее заданном составе ЭС без исследования влияния ее состава на режим экзотермических реакций. Однако одним из основных факторов, определяющих эффективность преобразования химической энергии, является ингредиентный состав экзотермических смесей. Поэтому возникает необходимость исследования влияния ингредиентного состава экзотермической смеси на эффективность экзотермического преобразования энергии при различных режимах ввода электрической энергии в канал разряда.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНГРЕДИЕНТНОГО СОСТАВА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ

Теплота, выделяемая в результате экзотермических превращений при ВЭХВ, в значительной степени зависит от соотношения горючих элементов и кислорода в составе ЭС. При этом наиболее эффективны ЭС с нулевым или близким к нулевому кислородному балансу, так как при полном окислении горючих элементов выделяется максимально возможное количество тепла [10]. Наиболее предпочтительными для реализации ВЭХВ являются промышленные водонаполненные ЭС, содержащие алюминий [11]. Обусловлено это тем, что они имеют самую большую из всех известных промышленных взрывчатых веществ теплоту сгорания и

относительную дешевизну производства, а также низкую детонационную способность и малую чувствительность к инициирующему импульсу. Использование таких ЭС позволяет просто автоматизировать их дозировку и подачу в зону разряда благодаря водостойкости и легкости регулирования в достаточно широком диапазоне реологических свойств составов.

Однако, по результатам экспериментальных исследований [7], полного сгорания таких гетерогенных сред, как водонаполненные экзотермические смеси, содержащие алюминий, в канале ВЭХВ не происходит. Это обусловлено тем, что их окисление протекает сравнительно медленно, в режиме взрывного горения, а время существования термодинамических условий (температуры, давления), обеспечивающих возможность протекания самоподдерживающихся экзотермических реакций, ограничено из-за быстрого расширения канала ВЭХВ.

Для повышения эффективности сгорания ЭС, содержащих алюминий, в условиях такого нестационарного процесса, как ВЭХВ, необходимо увеличивать скорость протекания экзотермических реакций в канале ВЭХВ и расширять пределы горения ЭС по температуре и давлению. Этого можно добиться уменьшением дисперсности частиц алюминия, входящих в состав ЭС в качестве горючего вещества, что подтверждается результатами исследований, приведенных в работе [7]. Определено, что минимальный уровень давления, при котором наблюдается самоподдерживающаяся экзотермическая реакция, возрастает примерно прямо пропорционально среднему размеру частиц порошка алюминия и уменьшается до некоторого фиксированного значения с увеличением концентрации алюминия в составе ЭС от 35 до 60%.

Что касается скорости протекания экзотермических реакций, то для гетерогенных смесей, или так называемых заполненных пористых сред, она пропорциональна поверхности горения в единице объема среды [12]:

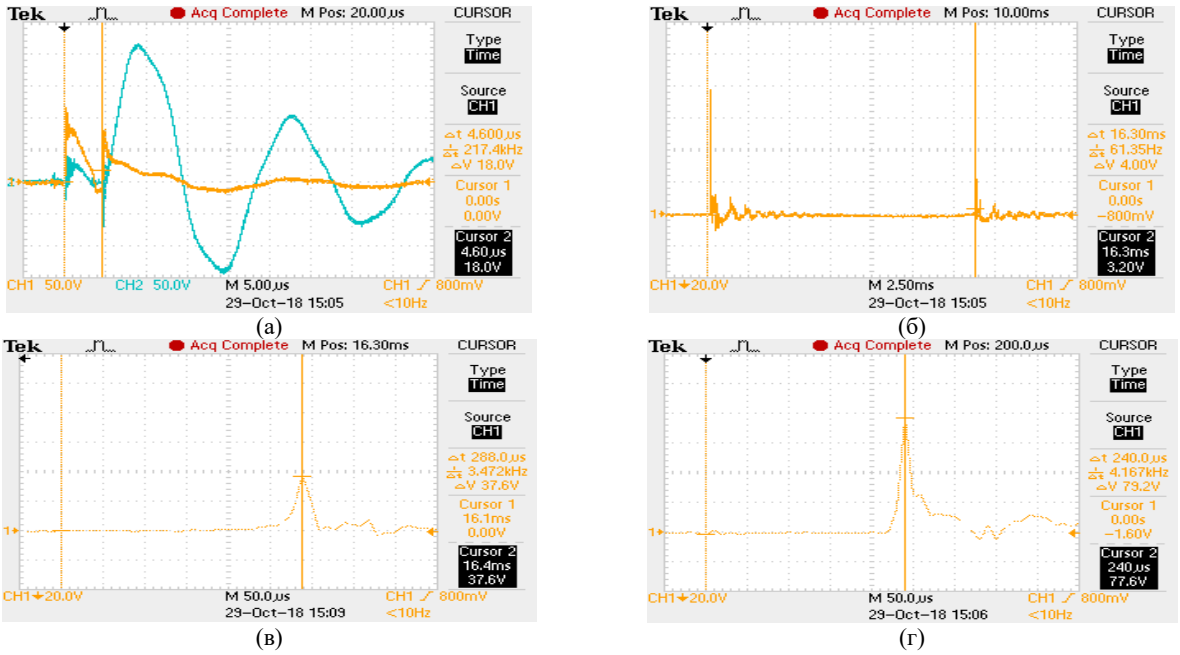
Если рассматривать ЭС условно как пористую среду и предположить, что поверхность горения пропорциональна поверхности частиц алюминия в единице объема ЭС, то получим, что для частиц, форма которых близка к сферической, удельная поверхность горения обратно пропорциональна среднему размеру частиц и прямо пропорциональна их объемной концентрации.

В работах [5, 7, 11] изложены результаты экспериментальных исследований влияния ингредиентного состава ЭС не только на величину дополнительного энерговыделения на стадии пульсации парогазовой полости (ПГП), но и на параметры излучаемой волны давления. При этом выявлены основные физико-химические свойства экзотермических смесей, определяющие полноту высвобождения их химической энергии, такие как поверхность частиц горючего металла и потенциальная химическая энергия, отнесенные к единице объема ЭС; дисперсность частиц алюминия.

В результате установлено, что наибольшим эффектом как с точки зрения увеличения энергии послеразрядной полости, так и энергии первичной волны давления обладает ЭС, содержащая 60% горючего металла, причем 15% мелкодисперсной и 45% крупнодисперсной фракций. Горение ЭС в плазменном канале ВЭХВ при этом происходит наиболее эффективно благодаря наличию достаточно большого количества мелкодисперсной алюминиевой пудры, что обеспечивает большую поверхность горения. Анализ имеющихся сведений об использовании ВЭХВ в различных разрядно-импульсных технологиях (РИТ) показывает, что для его реализации в основном применяются ЭС, содержащие 60 или 40% алюминия [5, 6, 11]. Возникает необходимость в определении областей целесообразного применения ЭС с разным содержанием алюминия для реализации различных режимов ВЭХВ.

После выбора состава ЭС для практической реализации ВЭХВ в конкретной РИТ управлять эффективностью электровзрывного преобразования химической энергии ЭС можно за счет изменения основных электрофизических параметров: начальной напряженности электрического поля в разрядном промежутке ($E_0 = U_0/l$) и удельной электрической энергии, введенной в разрядный промежуток на единицу массы ЭС ($w_\tau = W_\tau/M$) [4, 5]. В разрядном промежутке необходимо обеспечить $E_0 = E_{кр}$, ($E_{кр} \geq 10^6$ В/м для ЭС, содержащей 40% алюминия, и $E_{кр} \geq 2\times10^5$ В/м для ЭС, содержащей 60% алюминия), поскольку в этом случае при фиксированной величине удельной электрической энергии w_τ удается обеспечить максимальную эффективность использования ЭС, а следовательно, и получить максимальную интегральную энергию, выделившуюся при ВЭХВ [7].

При фиксированной ЭС с ростом величины удельной электрической энергии w_τ, введенной в канал разряда, увеличивается полнота ее сгорания, но при этом растет и энергоемкость генератора импульсных токов (ГИТ), что приводит к повышению энергопотребления. Но и при увеличении w_τ полного сгорания ЭС все равно не происходит из-за затухания экзотермической реакции в результате очень резкого снижения давления в канале разряда от сотен



Пример регистрации результатов экспериментальных исследований: (а) – электрические характеристики; (б) – период пульсации ПГП; (в) – профиль волны давления; (г) – профиль второго импульса давления.

МПа до величины ниже критического значения для самоподдерживающегося режима экзотермической реакции $P_{кр}$ = 22,5 МПа. Для повышения эффективности высвобождения химической энергии ЭС при ВЭХВ необходима поддержка уровня давления в канале разряда выше критического более длительное время. Перспективной и технически реализуемой возможностью увеличения эффективности сгорания ЭС при ВЭХВ является применение управляемого многоимпульсного введения электрической энергии в канал ВЭХВ [7].

Таким образом, в различных РИТ используется в основном два режима ВЭХВ: неуправляемый при одноимпульсном вводе электрической энергии в канал разряда и управляемый при многоимпульсном вводе энергии. Для определения ингредиентного состава ЭС для каждого из этих режимов, который обеспечивает максимальную удельную энергетическую эффективность экзотермических реакций при ВЭХВ, проведены оценочные экспериментальные исследования использования ЭС, содержащих 60 и 40% алюминия, при разных режимах ВЭХВ.

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

В данной работе исследовался одноимпульсный неуправляемый ВЭХВ и двухимпульсный управляемый ВЭХВ. Управляемый высоковольтный электрохимический взрыв производился путем последовательного ввода электрической энергии разной величины из двух конденсаторных батарей генератора импульсных токов в один межэлектродный промежуток, в который предварительно введена ЭС, при регулируемой временной задержке подключения второго накопителя по отношению к первому.

Оценочные эксперименты влияния ингредиентного состава экзотермической смеси на эффективность высвобождения химической энергии в условиях управляемого высоковольтного электрохимического взрыва проводились при изменении массы M ЭС от 2×10^{-4} до 3×10^{-4} кг. Параметры управляемого ГИТ изменялись в следующих пределах:

– емкость конденсаторов C – от $0{,}1\times10^{-6}$ до $4{,}51\times10^{-6}$ Ф;

– зарядное напряжение U_0 – от 10×10^{3} до 39×10^{3} В;

– индуктивность L – от $3{,}0\times10^{-6}$ до $13{,}6\times10^{-6}$ Гн.

В процессе каждого разряда одновременно регистрировались: активная составляющая напряжения на канале ВЭХВ $U(t)$, ток разряда $I(t)$, профиль волны давления, распространяющейся в среде $P(t)$, и период пульсации послеразрядной парогазовой полости T_n (см. рисунок).

Величина T_n определялась как интервал времени между пиками давления, формируемыми при расширении канала ВЭХВ в процессе ввода электрической энергии. Полная энергия, то есть энергия послеразрядной парогазовой полости W_n рассчитывалась с исполь-

№	Энергия ГИТ, W_0, Дж	Способ введения энергии, параметры ГИТ	Содержание Al в ВЭС, %	Время задержки подачи 2-го импульса $t_з$, мкс	Энергия ПГП $W_п$, Дж	Часть энергии ПГП, обусловленная Выделением электрической энергии, $\eta_п \times W_э$, Дж	Тепловая энергия, $\Delta W_х = W_п - \eta_п \times W_э$, Дж	Удельная эффективность, μ, 10^6 Дж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	450	Одноимпульсный: U = 17,3 кВ; C= 3 мкФ; L= 3 мкГн	60	–	487,2	65,3	421,9	1,41
2	457,2	Двухимпульсный: U_1 = 10 кВ; U_2 = 39 кВ; C_1 = 3,06 мкФ; C_2 = 0,4 мкФ; L_1 = 13,6 мкГн; L_2 = 7,14 мкГн	60	3,6	436,3	77,1	359,2	1,20
3	463,5	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 15 кВ; C_1 = 0,1 мкФ; C_2 = 3,72 мкФ; L_1 = 3,6 мкГн; L_2 = 7,44 мкГн	60	2,4	487,2	60,9	426,3	1,42
4	507,0	Одноимпульсный: U = 15 кВ; C = 4,51мкФ; L = 7,44 мкГн	40	–	225,2	86,4	138,8	0,7
5	503,5	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 15,7 кВ; C_1 = 0,1 мкФ; C_2 = 3,72 мкФ; L_1 = 3,6 мкГн; L_2 = 7,44 мкГн	40	2,6	273,3	73,2	200,1	1,00
6	506,5	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 20,3 кВ; C_1 = 0,1 мкФ; C_2 = 2,24 мкФ; L_1 = 3,6 мкГн; L_2 = 7,44 мкГн	40	2,8	327,8	73,6	254,2	1,27
7	555,3	Одноимпульсный: U = 30 кВ; C = 1,23 мкФ; L = 6,8 мкГн	40	–	248,5	80,4	168,1	0,84
8	552,4	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 15 кВ; C_1 = 0,1 мкФ; C_2 = 4,51 мкФ; L_1 = 6,8 мкГн; L_2 = 3,54 мкГн	40	4,8	299,6	80,0	219,6	1,10
9	553,1	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 21,3 кВ;	40	6,8	305,3	80,1	225,2	1,13

		C_1 = 0,1 мкФ; C_2 = 2,24 мкФ; L_1 = 6,8 мкГн; L_2 = 3,54 мкГн						
10	553,1	Двухимпульсный: U_1 = 30 кВ; U_2 = 21,3;кВ; C_1 = 0,1мкФ; C_2 = 2,24 мкФ; L_1 = 6,8 мкГн; L_2 = 3,54 мкГн	40	14,8	345,5	80,1	265,4	1,32

Экспериментальные и расчетные данные

зованием формулы Виллиса по периоду ее пульсации T_n [7]. Результаты экспериментального определения величины удельной энергетической эффективности преобразования ЭС $\mu = \Delta W/M$ при вводе электрической энергии и при управляемом ВЭХВ представлены в таблице.

Процессы пробоя и выделения энергии в канале разряда носят стохастический характер [8, 13], поэтому для увеличения степени достоверности число опытов в серии экспериментов, характеризующихся фиксированными условиями проведения, выбиралось в зависимости от разброса регистрируемых параметров разряда. Минимальное значение количества реализаций было выбрано равным пяти. По полученным выборкам вычислялись оценки средних значений.

Сравнительный анализ результатов оценочных исследований, представленных в таблице, показал, что в условиях управляемого двухимпульсного ввода электроэнергии в канал ВЭХВ при использовании ЭС с 60% содержанием алюминия увеличить полноту сгорания алюминия по сравнению с одноимпульсным вводом энергии в канал ВЭХВ не удается. Однако ситуация меняется при осуществлении управляемого ВЭХВ при использовании ЭС с 40% содержанием алюминия.

Получено, что при использовании ЭС с 40% содержанием алюминия в условиях управляемого двухимпульсного ввода электроэнергии в канал ВЭХВ при различных величинах удельной электрической энергии и соотношениях величин электрической энергии, последовательно вводимых в канал ВЭХВ, дополнительно выделившаяся тепловая энергия увеличивается в пределах от 1,3 до 1,8 раза по сравнению с одноимпульсным вводом энергии в канал разряда. Это приводит к повышению интегральной энергии ВЭХВ без увеличения энергоемкости конденсаторных батарей, а только за счет роста вклада энергии, выделяемой в результате экзотермической реакции окисления ЕС.

Таким образом, результаты оценочных исследований показали, что при управляемом двухимпульсном вводе энергии в канал ВЭХВ целесообразно использовать ЭС с 40% содержанием алюминия. Такой состав ЭС позволяет продлить время самоподдерживающегося режима экзотермической реакции и увеличить выделение тепловой химической энергии без повышения вводимой в канал разряда электрической энергии. Состав ЭС с 60% содержанием алюминия предпочтительней использовать при одноимпульсном вводе энергии в канал разряда, где он обеспечивает более высокую энергоэффективность.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ результатов исследования влияния ингредиентного состава экзотермической смеси на эффективность преобразования энергии при электрохимическом взрыве показал, что в разрядно-импульсных технологиях, где используется одноимпульсный ВЭХВ для кратковременного силового воздействия на объект обработки, например при разрушении естественных и искусственных негабаритов, целесообразно применять экзотермическую смесь с 60% содержанием алюминия, причем с 15% мелкодисперсной и 45% крупнодисперсной фракциями. Такая ЭС обладает наибольшей эффективностью как с точки зрения увеличения энергии послеразрядной полости, так и энергии первичной волны давления.

При использовании управляемого многоимпульсного ВЭХВ в разрядно-импульсных технологиях, где необходимо более длительное управляемое силовое воздействие на объекты обработки, например при обработке металлов давлением, целесообразно применять экзотермическую смесь с 40% содержанием алюминия. Это позволяет продлить экзотермическую реакцию горения ЭС при вводе в канал разряда последующих доз электрической энергии и обеспечить дополнительное выделение тепловой химической энергии, почти в два раза превышающее энергию, выделяющуюся при одноимпульсном вводе энергии в канал разряда,

чего не наблюдается при использовании ЭС с 60% содержанием алюминия. Увеличение длительности экзотермической реакции за счет управляемого ввода энергии при использовании ЭС с 40% содержанием алюминия приводит к повышению эффективности преобразования энергии при ВЭХВ, то есть увеличению интегральной энергии ВЭХВ без увеличения энергоемкости конденсаторных батарей, и позволяет уменьшить массогабаритные показатели энергоисточника.

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., Электроразрядное разрушение донных грунтов, *ЭОМ,* 2006, т. 42, № 1, с. 70. https://eom.ifa.md/ru/journal/shortview/766
3. 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. https://eom.ifa.md/ru/journal/shortview/195
4. Рытов, С.А., Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций, *Жилищное строительство*, 2010, № 5, с. 47.
5. Денисюк, Т.Д., Ризун, А.Р, Блащенко А.Д., Исследования гидродинамических характеристик импульсно-волнового воздействия для различных технологических режимов электроразрядных установок разрушения неметаллических материалов, *ЭОМ*, 2024, т. 60, № 1, с. 80. https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.080
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. Vovchenko, A., Demydenko, L., and Kozyrev, S., Control of a high-voltage discharge-pulse installation when implementing technological modes of an electrochemical explosion, *East.-Europ. J. Enterp Technol.,* 2020, vol. 104, no. 2/5, p. 29. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198371
9. 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, № 6, p. 731. https://doi.org/10.3103/S106837552206014X
10. Кондриков, Б.Н., Вовченко, А.И., Анников, В.Э., Иванов, В.В., *Взрывные превращения электрической и химической энергии*, Киев: Наукова думка, 1987, 128 с.
11. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Инициирование электроразряда экзотермическим составом при разрушении прочных донных грунтов, *ЭОМ*, 2007, № 2. с. 49. https://eom.ifa.md/ru/journal/shortview/656
12. Коростовенко, В.В., Коростовенко, Л.П., Стрекалова, Т.А., Стрекалова, В.А., Особенности физических процессов при разрядно-импульсных методах в комбинированных технологиях переработки минерального сырья, *Международный журнал экспериментального образования*, 2013, № 10, с. 129.
13. Ovchinnikova, L.E., and Kozyrev, S.S., Efficiency Enhancement for Discharge-Pulse Processing by Adaptive Control Based on Fuzzy Models, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.,* 2012, vol. 48, № 4, p. 332. https://previous.techned.org.ua/2012_2/st60.pdf

Summary

The applicability of exothermic mixtures with different compositions to high-voltage electrochemical explosion in discharge-pulse technologies was established. For a single-pulse high-voltage electrochemical explosion, an exothermic mixture containing 60 wt% aluminum is recommended. For a multipulse high-voltage electrochemical explosion with controlled electrical-energy input into the discharge channel, a mixture containing 40 wt% aluminum is more suitable because it prolongs the exothermic reaction and increases the release of thermal chemical energy. This increases the integral energy without increasing the energy capacity of the capacitor banks and can therefore reduce the weight and dimensions of the power source.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion; exothermic-mixture composition; discharge-pulse technologies; specific electrical energy; pressure wave