

# Гидродинамические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда

А. И. Вовченко, А. П. Смирнов\*, Л. Ю. Демиденко

*Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина*

\*e-mail: [smirnovap1978@gmail.com](mailto:smirnovap1978@gmail.com)

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 23.01.2024

На основании результатов математического моделирования и экспериментальных исследований гидродинамических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда обоснована возможность целенаправленного и оперативного регулирования силовым воздействием на объект обработки при управляемом ВЭХВ. Показано, что, варьируя массу экзотермического состава, размещенного в межэлектродном промежутке, и режимы ввода электрической энергии в канал ВЭХВ, можно управлять его гидродинамическими характеристиками, формируя в среде волны давления с рациональным пространственно-временным распределением, что обеспечивает эффективное силовое воздействие на объект обработки.

*Ключевые слова:* высоковольтный электрохимический взрыв, водонаполненный экзотермический состав, генератор импульсных токов, управляемый ввод энергии, канал разряда, гидродинамические характеристики, амплитуда и длительность волны давления

УДК 532:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.069>

## ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) [1], комплексный процесс выделения в разрядном канале электрической и химической энергии, находит все более широкое практическое применение в разрядно-импульсных технологиях (РИТ) (например, разрушение и локальное разупрочнение высокопрочных грунтов, разрушение бетонных и железобетонных изделий, в том числе фундаментов, а также формообразование и т.п.) [2–5]. Применение ВЭХВ позволяет, в отличие от традиционного подводного искрового разряда (ПИР), расширить возможности управления силовыми характеристиками, воздействующими на объект обработки с одновременным повышением ресурса электрооборудования и снижением его массогабаритных показателей.

При реализации РИТ на базе ВЭХВ используются специально разработанные алюминий-содержащие водонаполненные экзотермические составы (ВЭС) с широким диапазоном физико-химических характеристик [1], которые не относятся к классу взрывчатых веществ и не требуют особых мер по технике безопасности при работе с ними. Наиболее предпочтительными из них являются ВЭС с 40 или 60%

содержанием алюминия разной дисперсности. Обусловлено это тем, что ВЭС, содержащие 40% и более алюминия, обеспечивают большее дополнительное энерговыделение за счет экзотермических превращений по сравнению с ВЭС, содержащими меньший процент горючего металла, а также обладают более низкими пробивными напряжениями. Для таких ВЭС установлен критический уровень давления, равный примерно 23 МПа [1], который обеспечивает самоподдерживающееся протекание экзотермических реакций в канале ВЭХВ.

Инновационная привлекательность РИТ на базе ВЭХВ зависит от множества показателей, основные из них представлены в виде схемы на рис. 1. Одним из важнейших является оптимальность параметров энергетических и силовых нагрузок, воздействующих на конкретный объект обработки.

Применяемые системы управления и автоматического регулирования электроразрядными установками [2, 6] в основном нацелены на поддержание режимов их работы и движения электродной системы относительно объекта обработки. При этом критерием высокой эффективности использования энергии принималась степень приближения формы колебаний разрядного тока к критической, при которой



**Рис. 1.** Основные требования к разрядно-импульсным технологиям с использованием высоковольтного электрохимического взрыва.

развивается максимальная электрическая мощность за счет предварительного выбора начальных условий: параметров генератора импульсных токов (ГИТ), длины разрядного промежутка и способа инициирования. Однако добиться в рабочей среде таким способом качественного изменения формы генерируемой при разряде волны давления с крутым передним фронтом и близким к экспоненциальному спадом не удавалось, и, соответственно, не всегда реализовывался оптимальный режим силового воздействия на объект обработки. Для получения более сложного профиля импульса давления в жидкости, действующего на объект обработки, в РИТ используются различные методы управления вводом электрической энергии в канал разряда – многоконтурные ГИТ, параметрическое изменение элементов разрядной цепи (например, сопротивления и индуктивности) в процессе ввода энергии [7–10], а также электрический взрыв проводников или управляемый ВЭХВ [1, 11].

На основе проведенных исследований [12] была обоснована целесообразность и перспективность применения управляемого ввода электрической энергии в канал ВЭХВ с использованием двухконтурных емкостных генераторов импульсных токов для повышения более чем в 1,5 раза эффективности экзотермических реакций по сравнению с известным традиционным способом реализации ВЭХВ. Также был предложен способ регулировки накопленной энергии путем изменения емкостей или напряжений заряда, а также моментов ввода этой энергии в межэлектродный промежуток, запол-

ненный экзотермическим дисперсным составом. В работе экспериментально подтверждено, что давление в канале разряда управляемого ВЭХВ определяет эффективность экзотермического преобразования энергии в этих условиях. Вышеприведенные результаты подтверждают, что исследование гидродинамических характеристик подводного ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал разряда представляет несомненный практический и научный интерес, так как проведение подобных исследований позволит расширить функциональные возможности РИТ на базе ВЭХВ за счет их мобильной перестройки под конкретный тип объекта обработки. Все это, в свою очередь, позволит повысить эффективность, конкурентоспособность РИТ на базе ВЭХВ и расширить области их применения.

В связи с вышеизложенным цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование гидродинамических характеристик ВЭХВ с управляемым вводом энергии в канал разряда для оптимизации РИТ на базе ВЭХВ.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Физическая картина ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал может быть описана следующим образом. В начальный момент времени при подаче на электроды первого высоковольтного импульса от накопителя  $C_1$  происходит высоковольтный пробой ВЭС с образованием канала или каналов сквозной проводимости. Протекающий по этим каналам разрядный ток создает зоны высоких

температур и давлений, внутри которых начинаются интенсивные экзотермические превращения, сопровождающиеся выделением дополнительной тепловой энергии, однако вследствие кратковременности первого импульса тока только мелкодисперсные частицы успевают разогреться и вступить в химическую реакцию. Расширяющийся канал разряда служит источником волны давления, распространяющейся в среде. В определенный момент времени  $t_3$  в канал разряда ВЭХВ, который уже создан и развивается вследствие пробоя ВЭС первым высоковольтным импульсом энергии  $W_1$ , начинает поступать энергия  $W_2$  от второго накопителя, что приводит к интенсификации процессов в канале разряда и, в свою очередь, вносит изменения в происходящие гидродинамические процессы. Таким образом, при ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал к параметрам управления комплексным взрывом, кроме характеристик первого накопителя  $C_1$ , добавляется время подключения  $t_3$  и характеристики второго источника энергии  $C_2$ , которые определяют режим выделения накопленной энергии и генерируемые гидродинамические характеристики. При этом управляемый ввод электрической энергии в канал ВЭХВ может изменяться в широких пределах путем изменения:

- величины суммарной энергии  $W_0$  управляемого ГИТ;
- величин порций энергии  $W_1$  и  $W_2$ ;
- соотношения между порциями энергии  $W_2/W_1$ ;
- времени задержки  $t_3$  между порциями энергии.

При определенном сочетании этих параметров можно ожидать формирования волны давления (в разрядном канале и в окружающей жидкости) со сложным временным профилем, например, волны с несколькими максимумами на эпюре давление–время, причем их амплитуды и время между пиками различны.

По аналогии с ВЭХВ при традиционной схеме ГИТ с емкостным накопителем энергии [1] на гидродинамические характеристики ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал также будет влиять масса ВЭС, вводимого в разрядный промежуток.

Влияние режимов управляемого ввода электрической энергии в канал ВЭХВ и массы ВЭС на изменение гидродинамических характеристик можно оценить сравнением с соответствующими характеристиками ВЭХВ при традиционной схеме ГИТ с емкостным накопителем энергии, наиболее полное обобщение резуль-

татов исследований которого представлено в монографии [1].

Для достижения поставленной цели в данной работе использовались результаты, полученные с помощью физического эксперимента и математического моделирования.

В данной работе для ВЭХВ с управляемым вводом электрической энергии в канал использовался ВЭС с 40% содержанием алюминия разной дисперсности (8% – ПАП-1, 32% – ПА-2). Масса ВЭС варьировалась в диапазоне  $(0,1-0,3) \times 10^{-3}$  кг, а суммарная энергия управляемого ГИТ  $W_0$  изменялась от 400 до 800 Дж. Диапазон изменения режимов управляемого ввода энергии обеспечивался путем варьирования емкостей накопителей энергии  $C_1$  и  $C_2$ , а также регулируемой задержки времени  $t_3$  подключения  $C_2$  в разрядный контур по отношению к моменту включения  $C_1$ . Собственные индуктивности каждого из контуров  $L_1$  и  $L_2$  определялись из опытов короткого замыкания и на протяжении экспериментов не изменялись:  $L_1 = 6,8 \times 10^{-6}$  Гн и  $L_2 = 3,54 \times 10^{-6}$  Гн.

Параметры управляемого ГИТ изменялись так, чтобы в каждой серии экспериментов суммарная энергия двух контуров равнялась энергии традиционного одноконтурного ГИТ, и регулировались изменением емкостей  $C_1$  от 0,1 до 0,2 мкФ и  $C_2$  от 1,23 до 2,24 мкФ, следовательно, величина соотношения энергий  $W_2/W_1$  изменялась в интервале от 4,3 до 15,6; зарядные напряжения составляли  $U_1 = 30 \times 10^3$  В и  $U_2 = 25 \times 10^3$  В. Все исследования проводились при неизменной длине межэлектродного промежутка  $l = 3 \times 10^{-2}$  м, которая определялась из условия обеспечения начальной напряженности электрического поля в разрядном промежутке, равной критической ( $E_{кр} = 10^6$  В/м) [1], при которой эффективность сгорания ВЭС максимальна.

При математическом моделировании процессов в канале разряда использовали модель, приведенную в работе [11]. При этом принимались допущения, что наличие ВЭС, размещенного в разрядном промежутке, оказывает влияние только на режим выделения электрической энергии в канале разряда, канал разряда эквивалентен сети параллельных каналов пробоя ВЭС с точки зрения развития на нем электрической мощности. В связи с этим для корректного моделирования использовались эмпирические зависимости  $N(t) = U(t) \times I(t)$ . Это исключало использование в процессе моделирования уравнения баланса напряжений в разрядном контуре и выражения связи между сопротивлением канала разряда и удельной электропроводностью плазмы. Также вследствие

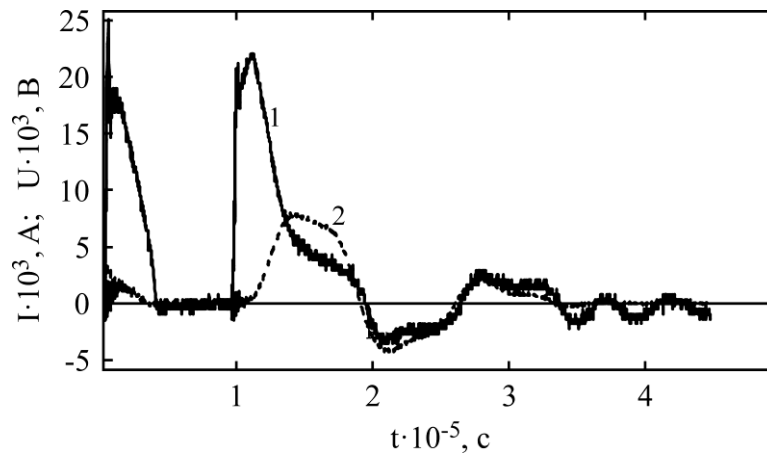


Рис. 2. Экспериментальные временные профили разрядного тока (2) и напряжения на разрядном канале (1).

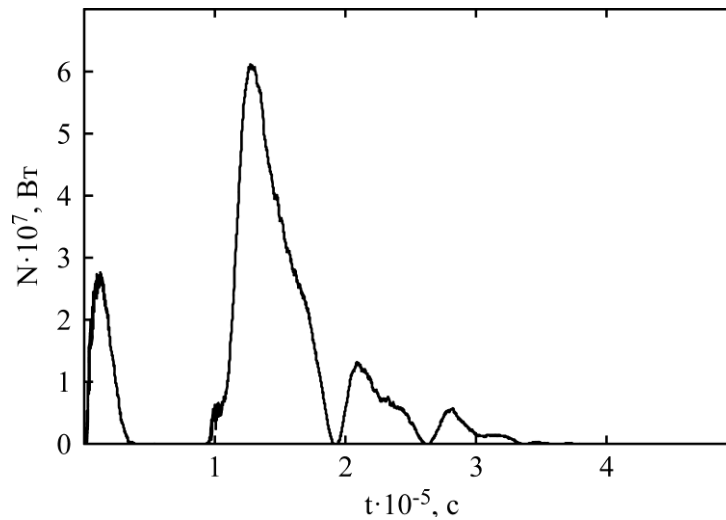


Рис. 3. Рассчитанная электрическая мощность при ВЭХВ с управляемым вводом электроэнергии в канал разряда.

малости времени формирования импульсов волны давления (несколько десятков микросекунд) в сравнении с длительностью процесса горения ВЭС считалось, что выделенная в канале разряда в процессе горения химическая энергия не оказывает существенного влияния на давление в канале разряда. С учетом всего вышесказанного в окончательном виде математическая модель будет состоять из уравнений баланса энергии (1) и уравнения гидродинамики, которое определяет давление в канале разряда (2).

$$\frac{d(p_a S_a)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_a \frac{dS_a}{dt} = IU \frac{1}{l}, \quad (1)$$

$$p_a = \frac{\rho_0}{2\pi} \frac{d^2 S_a}{dt^2} \ln \left( \frac{\pi^{0.5} l}{S_a^{0.5}} \right) - \frac{\rho_0}{8\pi S_a} \left( \frac{dS_a}{dt} \right)^2, \quad (2)$$

где  $I$  – разрядный ток, А;  $U$  – напряжение на разрядном промежутке;  $p_a$  – давление в канале разряда, Па;  $S_a$  – площадь поперечного сечения канала разряда, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина разрядного промежутка, м;  $\gamma = 1,26$  – эффективный показатель адиабаты;  $\rho_0$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с.

В начальный момент времени жидкость считалась невозмущенной средой. Начальные значения скорости расширения канала разряда, его радиуса  $a(0)$  и давления  $P_a(0)$  определялись согласно рекомендациям [11, 13].

В процессе математического моделирования выполнялся расчет радиуса канала разряда ( $a(t)$ ), давления в канале разряда ( $P_a(t)$ ) и длительности ( $\tau_{pa}$ ) давления в канале ВЭХВ, величина которого превышает его критическое значение.

При расчете временного профиля мощности ( $N(t)$ ) в качестве исходных данных были использованы временные профили разрядного тока  $I(t)$  и напряжения на разрядном промежутке  $U(t)$ , полученные при исследовании электродинамических характеристик ВЭХВ с управляемым порционным вводом электроэнергии в разрядный канал в ходе специально поставленного эксперимента. Для использования временного профиля мощности в качестве начальных условий при математическом моделировании выполнялось его аппроксимирование с использованием стандартной функции – полиномиальной линии тренда программного обеспечения Microsoft Excel.

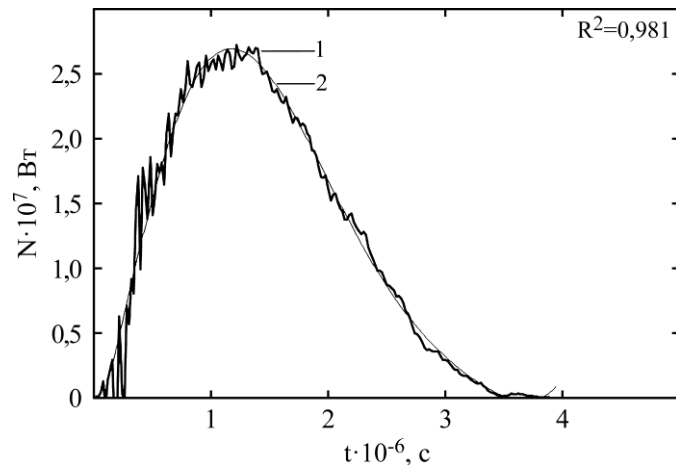


Рис. 4. Аппроксимация первого пика мощности.

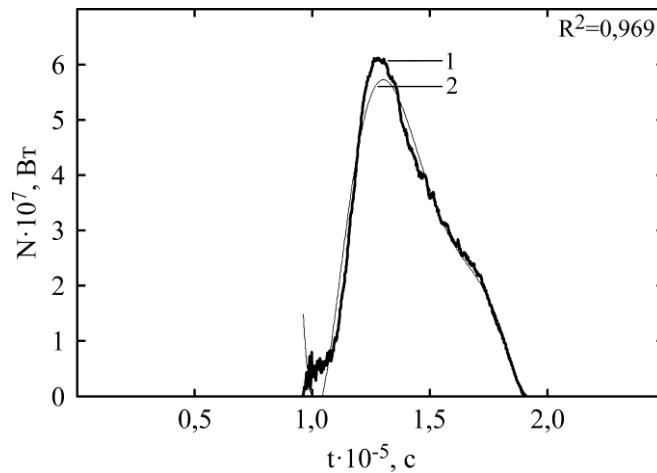


Рис. 5. Аппроксимация второго пика мощности.

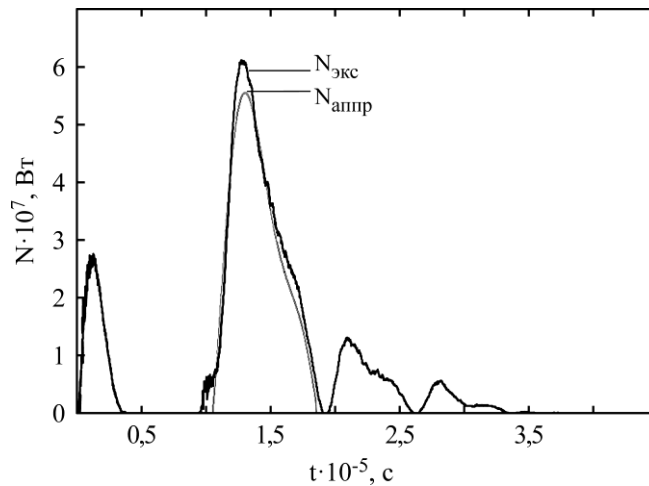


Рис. 6. Сравнение экспериментального временного профиля мощности ( $N_{\text{экc}}$ ) и временного профиля, полученного с помощью аппроксимирующих выражений ( $N_{\text{аппр}}$ ).

В качестве примера на рис. 2 приведены временные профили разрядного тока  $I(t)$  и напряжения на разрядном канале  $U(t)$  при ВЭХВ с управляемым вводом электроэнергии в разрядный канал для суммарной энергии  $W_0 = 450$  Дж, массы ВЭС  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг, времени подключения второго накопителя  $t_3 = 9,4 \times 10^{-6}$  с, соотношения порций энергий  $W_2/W_1 = 9$ , а на рис. 3 – рассчитанный профиль мощности, особенностью которого

является наличие двух ярко выраженных пиков мощности.

Было принято допущение, что наибольшее влияние на формирование давления в канале оказывают два первых пика мощности [14], поэтому при аппроксимации кривая мощности была условно разбита на четыре участка:

- первый пик мощности;
- пауза между первым и вторым вводом энергии в канал разряда ( $N = 0$ );
- второй пик мощности;

– мощность после второго пика во внимание не принималась, считалось, что  $N = 0$ .

Данный подход позволяет поинтервально математически описать временной профиль мощности с помощью математических выражений.

Для примера на рис. 4 и 5 приведен результат аппроксимации кривой мощности для режима  $W_0 = 450$  Дж,  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг,  $t_3 = 9,8 \times 10^{-6}$  с,  $W_2/W_1 = 9$ . На них показаны экспериментальная кривая мощности (кривая 1), линия тренда (кривая 2) и величина достоверности аппроксимации  $R^2$ . На рис. 6 дано сравнение расчетных и экспериментальных временных профилей мощности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты математического моделирования гидродинамических характеристик в канале разряда, рассчитанные по временным кривым мощности, полученным в ходе экспериментальных исследований управляемого высоковольтного электрохимического взрыва при  $W_0 = 450$  Дж,  $W_2/W_1 = 9$ ;  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг, приведены на рис. 7 и 8, а с  $M = 0,3 \times 10^{-3}$  кг – на рис. 9 и 10.

Анализ представленного графического материала показывает, что при неизменной суммарной энергии управляемого ГИТ изменение времени задержки  $t_3$  ввода энергии второго импульса в канал разряда оказывает большее влияние на радиус разрядного канала, чем изменение массы ВЭС, размещенного в межэлектродном промежутке (см. кривые 1–5 на рис. 7 и 9). Увеличение времени задержки  $t_3$  до момента подключения емкости  $C_2$  приводит к снижению скорости расширения канала разряда и, соответственно, уменьшению значений радиуса. Однако повышение массы ВЭС несколько уменьшает степень расхождения между кривыми радиуса в процессе выделения энергии. Так, при увеличении времени задержки  $t_3$  в 5,6 и 5,1 раза по сравнению с вариантом 1 соответственно при  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг и при  $M = 0,3 \times 10^{-3}$  кг зависимости  $a(t)$  ложатся ниже варианта 1 и на 25 мкс отклонение значений радиуса от варианта 1 составляет 28,0% (см. вариант 5 на рис. 7) и уменьшается до 22,4 и 24,5% (см. вариант 4, 5 на рис. 9). При этом форма и монотонный характер изменения радиуса канала во времени сохраняется для разных масс ВЭС и режимов ввода энергии в его канал.

Аналогичная тенденция поведения радиуса канала сохраняется и при повышении суммарной энергии управляемого ГИТ, однако при этом

радиус канала разряда ВЭХВ и скорость его изменения увеличиваются.

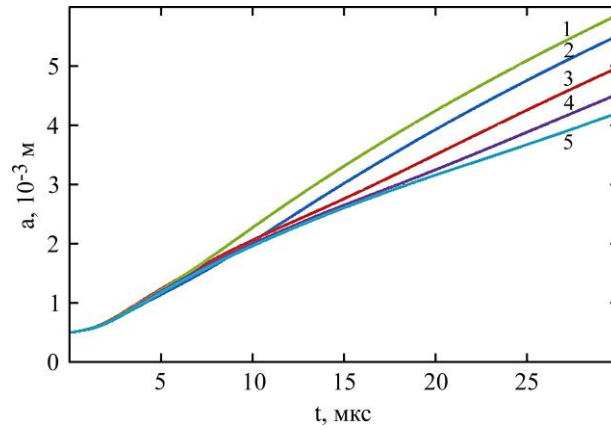
При управляемом ВЭХВ давление в канале разряда  $P_a(t)$  наиболее чувствительно к режиму ввода в него энергии. Характерной особенностью эпюр давления в канале разряда является формирование на спаде первого импульса давления второго максимума. В данном случае первый импульс давления обусловлен ударным расширением канала разряда при включении накопителя  $C_1$ , а второй импульс – ускорением расширяющегося канала, вызванным дополнительным вводом энергии в него при подключении второй конденсаторной батареи  $C_2$ . По мере увеличения времени задержки  $t_3$  подачи в канал разряда второго импульса электрической энергии амплитуда второго пика давления на его ниспадающей ветви существенно уменьшается, а первый пик остается без изменения. Такая ситуация вызвана тем, что энергия емкости  $C_2$  в зависимости от времени задержки  $t_3$  вводится в различные объемы плазменного канала. Чем на более поздних стадиях развития разряда происходит повторное выделение энергии, тем больше объем плазменного канала и, как следствие, меньше амплитуда второго пика давления (см. кривые 1–5 на рис. 8 и 10). Однако при этом зависимости  $P_a(t)$  при больших временах задержки имеют более замедленный спад давления после второго импульса по сравнению со спадом  $P_a(t)$  при меньшем времени задержки  $t_3$  (см. кривые 1–3 на рис. 8). Причем степень замедления спада давления несколько повышается с увеличением массы ВЭС, что видно из рис. 11, который иллюстрирует зависимость относительной длительности давления в канале разряда при управляемом ВЭХВ, амплитуда которого превышает критический уровень, от величины  $\bar{\tau}$  для разных масс ВЭС. Здесь время задержки  $t_3$  и длительность  $\tau_{Pa}$  давления в канале управляемого ВЭХВ, величина которого превышает критическое значение (23 МПа), были пронормированы к соответствующим значениям  $t_0, \tau_{Pa1}$  и представлены относительными величинами:

$$\bar{\tau} = t_3 / t_0, \quad (3)$$

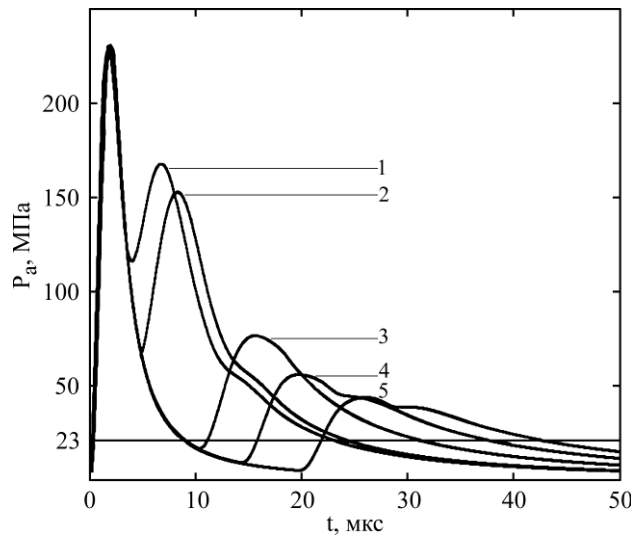
где  $t_0 = \pi (L_1 \times C_1)^{1/2}$  – характерное время первого импульса, мкс;

$$\bar{\tau}_p = \tau_{Pa} / \tau_{Pa1}, \quad (4)$$

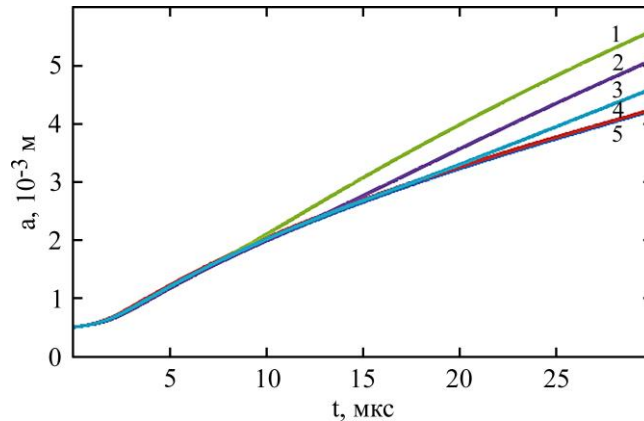
где  $\tau_{Pa1}$  – длительность давления в канале разряда, величина которого превышает критическое значение (23 МПа), для варианта ВЭХВ при традиционной схеме ГИТ, мкс.



**Рис. 7.** Временные зависимости радиуса канала от момента подключения емкости  $C_2$  при  $W_0 = 450$  Дж,  $W_2/W_1 = 9$ ;  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг: 1 –  $t_3 = 3,4$  мкс; 2 –  $t_3 = 5,0$  мкс; 3 –  $t_3 = 9,4$  мкс; 4 –  $t_3 = 13,6$  мкс; 5 –  $t_3 = 19,0$  мкс.



**Рис. 8.** Временные зависимости давления в канале от момента подключения емкости  $C_2$  при  $W_0 = 450$  Дж,  $W_2/W_1 = 9$ ;  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг: 1 –  $t_3 = 3,4$  мкс; 2 –  $t_3 = 5,0$  мкс; 3 –  $t_3 = 9,4$  мкс; 4 –  $t_3 = 13,6$  мкс; 5 –  $t_3 = 19,0$  мкс.



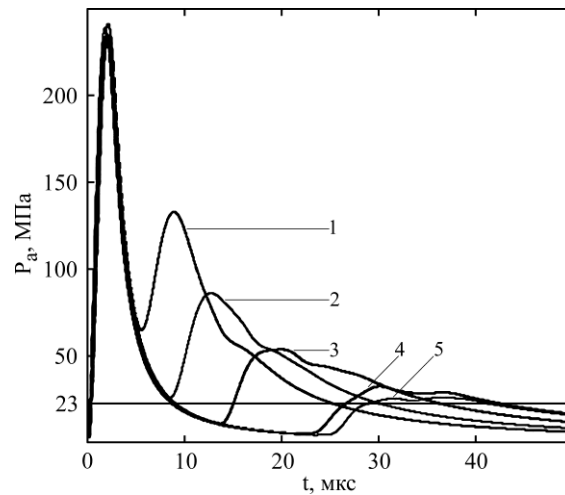
**Рис. 9.** Временные зависимости радиуса канала от момента подключения емкости  $C_2$  при  $W_0 = 450$  Дж,  $W_2/W_1 = 9$ ;  $M = 0,3 \times 10^{-3}$  кг: 1 –  $t_3 = 4,6$  мкс; 2 –  $t_3 = 7,2$  мкс; 3 –  $t_3 = 12,9$  мкс; 4 –  $t_3 = 20,8$  мкс; 5 –  $t_3 = 23,6$  мкс.

Увеличение длительности поддержания уровня давления в канале ВЭХВ обеспечивает более полное сгорание ВЭС и за счет дополнительно выделенной при этом тепловой энергии возрастает суммарная энергия ВЭХВ без повышения энергии ГИТ.

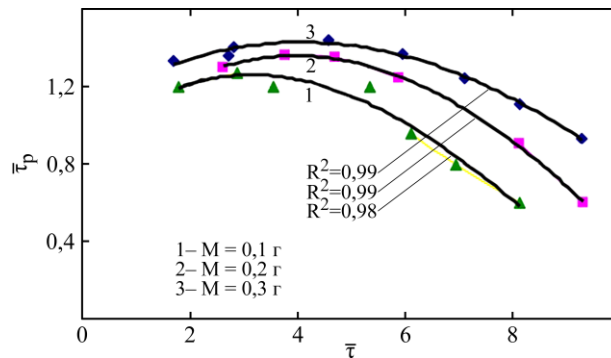
Таким образом, результаты численного исследования гидродинамических характеристик канала разряда ВЭХВ при управляемом порционном вводе энергии в него дополнительно подтверждают, что на эффективность экзотерми-

ческого преобразования энергии при ВЭХВ, которая обеспечивается поддержкой уровня давления в канале ВЭХВ выше минимального более продолжительное время, влияет как масса ВЭС, так и режим ввода в канал разряда электрической энергии, что согласуется с результатами работы [12].

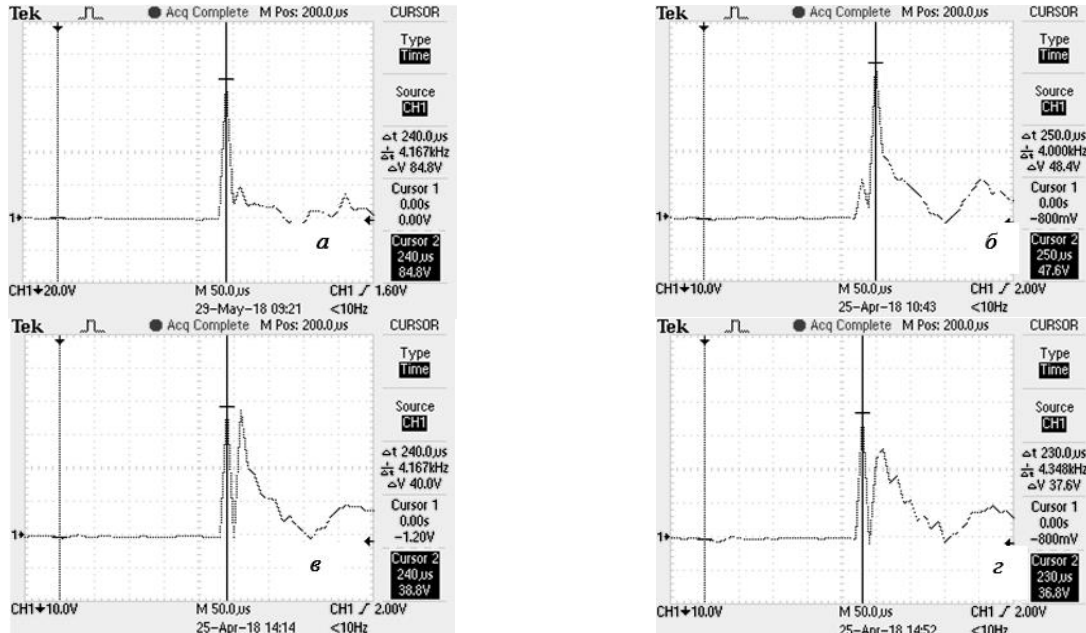
С энергетическими показателями коррелирует и импульс давления, который распространяется в жидкости на стадии интенсивного расширения канала при ВЭХВ и является интегральной



**Рис. 10.** Временные зависимости давления в канале от момента подключения емкости  $C_2$  при  $W_0 = 450$  Дж,  $W_2/W_1 = 9$ ;  $M = 0,3 \times 10^{-3}$  кг: 1 –  $t_3 = 4,6$  мкс; 2 –  $t_3 = 7,2$  мкс; 3 –  $t_3 = 12,9$  мкс; 4 –  $t_3 = 20,8$  мкс; 5 –  $t_3 = 23,6$  мкс.



**Рис. 11.** Зависимость относительной длительности давления в канале, амплитуда которого превышает критический уровень, от величины  $\bar{\tau}$  для разных масс ВЭС при  $W_0 = 750$  Дж;  $U_2 = 25$  кВ;  $W_2/W_1 = 15,6$ : 1 –  $M = 0,1$  г; 2 –  $M = 0,2$  г; 3 –  $M = 0,3$  г.



**Рис. 12.** Осциллограммы эпюр давления, генерируемого подводным ВЭХВ на расстоянии 0,3 м от оси канала разряда: (а) – традиционный ВЭХВ –  $W_0 = 400$  Дж; (б), (в), (г) – управляемый ВЭХВ с временем задержки  $t_3$  включения емкости  $C_2$  соответственно  $9,4 \times 10^{-6}$  с;  $14,8 \times 10^{-6}$  с;  $17,8 \times 10^{-6}$  с.

характеристикой силового воздействия на объект обработки.

На рис. 12 представлены для сравнения некоторые результаты экспериментальных исследований гидродинамических характеристик жидкости (давление  $P(t)$  в точке, расположенной

в экваториальной плоскости сечения канала и удаленной от оси канала на расстояние 0,3 м) для традиционного варианта ВЭХВ с одноконтурным ГИТ, энергией  $W_0 = 400$  Дж, массой ВЭС  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  г (см. рис. 12а) и для



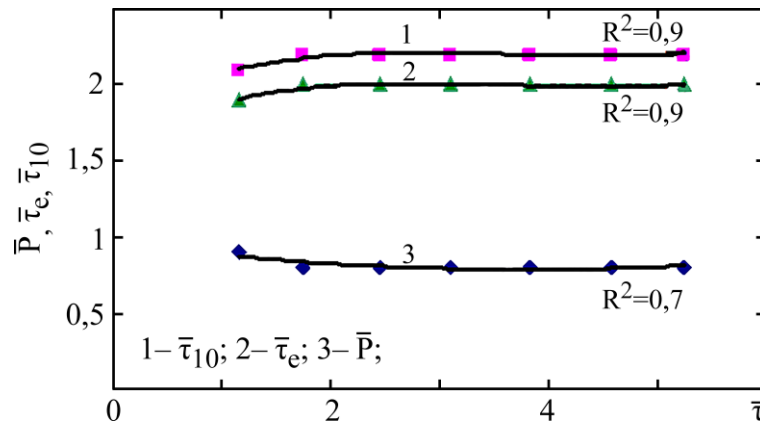


Рис. 13. Зависимость относительных величин амплитуды, длительности волны сжатия на уровне спада давления в  $e$  (2,72) раз и десятикратного спада при управляемом ВЭХВ от величины  $\bar{\tau}$  при  $W_0 = 400$  Дж;  $M = 0,2 \times 10^{-3}$  кг;  $W_2/W_1 = 7,9$ .

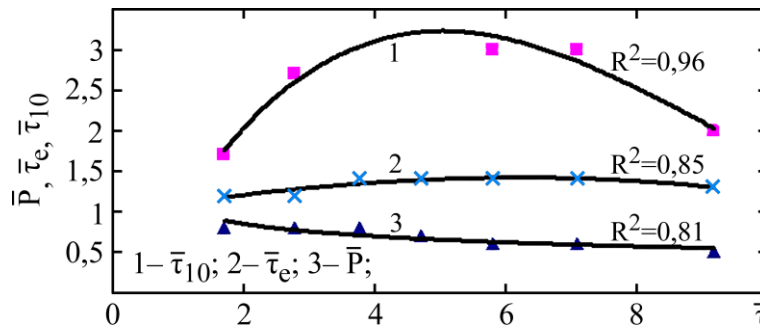


Рис. 14. Зависимость относительных величин амплитуды, длительности волны сжатия на уровне спада давления в  $e$  (2,72) раз и десятикратного спада при управляемом ВЭХВ от величины  $\bar{\tau}$  при  $W_0 = 600$  Дж;  $M = 0,3 \times 10^{-3}$  кг;  $W_2/W_1 = 12,3$ .

ВЭХВ с управляемым вводом энергии (см. рис. 12б,в,г).

Анализируя временные функции давления в канале (рис. 8 и 10) и жидкости (рис. 12б,в,г), можно отметить, что качественно они сходны между собой, то есть в зависимости от времени подключения второй конденсаторной батареи  $C_2$  на кривой давление–время наблюдается второй пик. Интервал времени между первым и вторым пиками на эюре давления приблизительно равен времени подключения емкости  $C_2$  относительно начала тока разряда батареи  $C_1$ . Однако в количественном отношении наблюдаются существенные отличия. Анализируя и сопоставляя амплитуды пульсаций давления при управляемом вводе энергии в канал ВЭХВ, можно отметить, что для последовательности убывающих по амплитуде пиков давления в канале (рис. 8 и 10) функция давления в фиксированной точке жидкости может быть реализована в виде последовательности возрастающих либо убывающих пиков давлений (рис. 12б,в,г). Причем соотношения между амплитудами пиков давления в импульсе сжатия зависят как от времени задержки включения емкости  $C_2$ , так и от массы ВЭС; то есть имеется возможность, не изменяя основных параметров энергоисточника, а только за счет варьирования массы ВЭС и времени задержки  $t_3$  получать разную форму и амплитуду профиля волны

сжатия, чтобы обрабатываемый объект смог поглотить максимум излучаемой при управляемом ВЭХВ энергии.

Кроме профиля волны сжатия, управляемый ввод энергии в канал ВЭХВ позволяет изменять и ее длительность (см. кривые 1, 2 на рис. 13), что особенно важно с точки зрения технологического использования управляемого ВЭХВ в разных РИТ. На рис. 13 показаны относительные изменения амплитуды давления  $\bar{P}$ , длительности импульса сжатия на уровне десятикратного спада давления  $\bar{\tau}_{10}$  и спада в  $e$  (2,72) раз  $\bar{\tau}_e$  при управляемом ВЭХВ в зависимости от времени задержки  $t_3$  включения второй конденсаторной батареи  $C_2$ . Все эти величины, как сказано выше, пронормированы к соответствующим значениям при ВЭХВ для традиционного варианта с одноконтурным ГИТ.

Тот же характер изменения амплитуды волны давления, ее длительности на уровне спада давления в  $e$  (2,72) раз и десятикратного спада при управляемом ВЭХВ сохраняется и для других масс ВЭС и режимов ввода энергии (см. рис. 14).

Как видно, при управляемом ВЭХВ для разных режимов ввода энергии и масс ВЭС, вводимого в разрядный промежуток, в зависимости от времени задержки  $t_3$  подключения второй конденсаторной батареи  $C_2$  наблюдается экстремум длительности импульса

сжатия – сначала происходит увеличение значений  $\bar{\tau}_e$  и  $\bar{\tau}_{10}$ , а потом некоторое их снижение, то есть дальнейшее увеличение времени задержки  $t_3$  становится неэффективным. С увеличением массы ВЭС и повышением суммарной энергии ГИТ эта зависимость выражена более ярко.

Что касается амплитуды волны сжатия, то, как показывают результаты эксперимента (см. кривая 3 на рис. 13, 14), при управляемом ВЭХВ выигрыша не получается, но за счет существенного возрастания длительности генерируемый импульс давления имеет тенденцию к некоторому возрастанию.

Результаты проведенных исследований показали возможность целенаправленного и достаточно оперативного управления энергетическими и гидродинамическими характеристиками ВЭХВ путем варьирования массой ВЭС, вводимой в разрядный промежуток, и режимами ввода электрической энергии в канал ВЭХВ. Это позволяет формировать в среде волны давления с рациональным пространственно-временным распределением, что обеспечивает эффективное силовое воздействие на объект обработки для конкретной разрядно-импульсной технологии.

### ВЫВОДЫ

Впервые проведенные комплексные исследования гидродинамических процессов с помощью математического моделирования и физического эксперимента при ВЭХВ с управляемым вводом энергии в разрядный канал подтвердили наличие жесткой связи между давлением в канале, энергетическими и гидродинамическими характеристиками ВЭХВ. Это позволило обосновать возможность целенаправленного и оперативного управления силовым воздействием на объект обработки.

Анализ полученного массива экспериментальных данных показал, что, варьируя массой ВЭС, вводимого в разрядный промежуток, и режимами ввода электрической энергии ( $W_0$ ;  $W_1$  и  $W_2$ ;  $W_2/W_1$ ;  $t_3$ ) в канал ВЭХВ, можно целенаправленно управлять его гидродинамическими характеристиками, формируя в среде волны давления с рациональным пространственно-временным распределением, обеспечивающие эффективное силовое воздействие на объект обработки для конкретной разрядно-импульсной технологии.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
2. Ризун, А.Р., Поздеев, В.А., Голень, Ю.В., Одноразовые электродные системы при высоковольтном электрохимическом разрушении природных и искусственных негабаритов, *ЭОМ*, 2010, № 3, с. 78.
3. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Рачков, А.Н., Электроразряд – источник энергии экологически чистых технологий разрушения, *ЭОМ*, 2012, № 5, с. 109.
4. Рытов, С.А., Смирнов, П.В., Электроразрядные технологические устройства буровых свай большого диаметра, *Информационный вестник*, 2006, № 1(12), с. 10.
5. Малюшевский, П.П., Ющишина, А.Н., Сизоненко, О.Н., Швец, И.С., Интенсификация гетерогенных химических реакций при воздействии электрического разряда в различных технологиях, *Труды IV Междунар. школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред»*, август 2001 г. Николаев: Атолл, 2001, с. 104.
6. Гулый, Г.А., *Научные основы разрядноимпульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
7. Богуславский, Л.З., Кривицкий, Е.В., Ромакин, В.В., Моделирование электрического разряда в жидкости при параметрическом изменении элементов в контуре, *Технічна електродинаміка*, 1990, № 2, с. 3.
8. Тертилов, Р.В., Оптимизация разрядно-импульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов, *Технічна електродинаміка*, 2011, № 3, с. 67.
9. Блащенко, А.Д., Половинка, В.Д., Тертилов, Р.Д., Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 1, с. 97.
10. Барбашова, Г.А., Вовченко, А.И., Каменская, Л.А., Шомко, В.В., Гидродинамические параметры электрических разрядов в жидкости при двухимпульсном вводе энергии, *ЭОМ*, 2006, т. 42, № 2, с. 23.
11. Кривицкий, Е.В., Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
12. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Блащенко, А.Д., Старков, И.Н., Повышение эффективности высоковольтных электроразрядных установок, использующих экзотермические дисперсные среды, *Технічна електродинаміка*, 2019, № 5, с. 77.
13. Вовченко, А.И., Начальные условия для задачи о численном исследовании динамики подводного искрового разряда, *Праці інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць*. Київ: ІЕД НАН України, 2001, с. 117.

14. Барбашова, Г.А., Шомко, В.В., Влияние цикличности ввода электрической энергии в канал подводного искрового разряда, *ЭОМ*, 2007, № 2, с. 43.
15. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Блащенко, А.Д., Старков, И.Н., Факторы влияния на энергетическую эффективность экзотермических превращений при управляемом высоковольтном электрохимическом взрыве, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 52.

#### **Summary**

Based on the results of the mathematical modeling and experimental studies of the hydrodynamic characteristics of a high-voltage electrochemical explosion with a controlled input of electrical energy into the discharge channel, a possibility of the targeted and operational

control of the force effect on the treatment object during a controlled high-voltage electrochemical explosion is substantiated. It is shown that by varying the mass of the exothermic composition placed in the inter-electrode gap and the modes of introducing electrical energy into the channel of a high-voltage electrochemical explosion, it is possible to control its hydrodynamic characteristics, forming pressure waves in the medium with a rational spatiotemporal distribution, providing an effective force effect on the treatment object.

*Keywords:* high-voltage electrochemical explosion, water-filled exothermic composition, pulsed current generator, controlled energy input, discharge channel, hydrodynamic characteristics, amplitude and duration of the pressure wave