

Экспериментальные исследования гидродинамических и энергетических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в ограниченных объемах жидкости

А. П. Смирнов*, О. В. Хвоцан

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,

г. Николаев, 54018, Украина

**e-mail: smirnovap1978@gmail.com*

Поступила в редакцию 18.05.2023

После доработки 26.09.2023

Принята к публикации 29.09.2023

Экспериментально исследованы электрические, энергетические и гидродинамические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) в ограниченных объемах жидкости в зависимости от зарядного напряжения, запасаемой электрической энергии и массы сжигаемой экзотермической смеси. Проведено сравнение с другими способами инициирования электрического разряда в аналогичных условиях. Полученные результаты показали, что ВЭХВ дает возможность осуществить высоковольтный электрический разряд с малыми энергетическими потерями (менее 9%) и реализовать режим электрического пробоя, близкий к апериодическому. Установлено, что ВЭХВ генерирует волны сжатия с амплитудой до 37% и удельным импульсом до 45% большими (при зарядном напряжении 25 кВ и выше), чем при электрическом взрыве инициирующего металлического проводника при одинаковых начальных условиях. Выявлено, что повышение зарядного напряжения приводит к увеличению амплитуды и удельного импульса генерируемой волны сжатия по линейной зависимости. Комплексный анализ зависимостей энергетических и гидродинамических характеристик показал, что основное влияние на формирование удельного импульса волны сжатия при ВЭХВ оказывают как запасаемая электрическая энергия, так и взаимосвязь электрических параметров разрядного контура с массой сгорающей экзотермической смеси, что определяет форму разрядных характеристик.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, зарядное напряжение, экзотермическая смесь, волна сжатия, энергия, удельный импульс

УДК 537.528

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.5.42>

ВВЕДЕНИЕ

Электрический взрыв (высоковольтный электрический разряд – ВЭР) в жидкости, а именно пробой жидкого промежутка между электродами в результате подачи между ними высоковольтного напряжения нашел широкое применение в различных отраслях промышленности. В процессе электрического взрыва в определенном объеме (канале разряда) в течение малого промежутка времени образуется высокая плотность энергии и резко увеличиваются давление и температура. В дальнейшем происходит быстрое расширение канала разряда, в результате чего во внешнюю среду излучается волна давления [1].

Электрический взрыв в жидкости используется как источник акустических сигналов [2] и при обработке различных материалов [3–5], в медицине [6] и сельском хозяйстве [7], а также в нефтедобывающей промышленности [8–13]. Для многих электроразрядных технологий (например, дробление и измельчение материалов, декольматация скважин) основным

действующим фактором являются генерируемые электрическими взрывами волны давлений [14–15], исследованию которых посвящено большое количество работ [16–21].

В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины разработан целый ряд разрядно-импульсных технологий (РИТ), основанных на ВЭР в конденсированных средах, внедренных как в Украине, так и в других странах мира: США, Китае, Германии, Южной Корее и др. Эти технологии характеризуются эффективностью, экологической чистотой, относительно низкой себестоимостью и простотой в реализации. При этом продолжают работы по усовершенствованию РИТ, поиску путей повышения их эффективности, уменьшению себестоимости и массогабаритных показателей электроразрядного оборудования.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

На процесс электрического взрыва в жидкости, а соответственно и на характеристики генерируемой волны давления воздействуют

параметры разрядного контура и внешние условия (температура, гидростатическое давление, электропроводность рабочей жидкости). Влияние этих параметров и условий выражается в величине предпробойных потерь энергии, что снижает эффективность различных разрядно-импульсных технологий. Стохастичность электровзрывного процесса также негативно влияет на эффективность и стабильность электроразрядного воздействия. В первую очередь это связано с изменением длины канала разряда в технологической серии импульсов, причем длина канала вследствие его искривления превышает межэлектродный промежуток.

Все вышеперечисленные недостатки отсутствуют или сведены к минимуму в случае, когда электровзрывное преобразование энергии в жидкости реализуется подводным электрическим взрывом проводника (ЭВП) [15]. В этом случае электроды замыкает металлический проводник, который взрывается при подаче высокого напряжения. ЭВП характеризуют неизменная геометрия канала разряда (его длина равна длине проводника) и минимальные предпробойные потери. ЭВП позволяет не только инициировать электровзрыв, но и осуществлять управление электровзрывными процессами за счет согласованного выбора параметров проводника (его длины, диаметра, материала) и электрических характеристик разрядного контура.

Электрический взрыв тонкого (с диаметром, намного меньшим оптимального значения) инициирующего проводника позволяет воспроизвести динамику развития одиночного проводящего цилиндрического канала, расширяющегося со временем аналогично ВЭР в жидкости. При этом длина канала разряда стабильна и равна межэлектродному расстоянию, а процесс выделения накопленной энергии осуществляется с малыми предпробойными потерями за счет формирования и расширения канала в парах испарившегося металла [15], что и ведет к образованию волны давления.

Увеличение диаметра проводника с некоторого момента приводит к значительному повышению скорости выделения энергии на разрядном промежутке в сравнении с ВЭР в жидкости и инициированием тонким проводником за счет полного выделения накопленной энергии в процессе взрыва этого проводника. В данном случае основной фактор формирования волны давления – взрыв проводника. Варьированием согласованных параметров разрядного контура, геометрии и материала проводника можно управлять процессом выделения энергии в канале разряда и соответственно характе-

ристиками генерируемой волны давления [22–26].

Еще одним способом инициирования и управления электровзрывными процессами в конденсированных средах является высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ), который осуществляется с минимальными предпробойными потерями и постоянной пространственной геометрией канала разряда. В результате этого генерируется волна давления со стабильными характеристиками. Сущность ВЭХВ состоит в следующем. В межэлектродный промежуток вводятся вещества (экзотермические смеси), способные к экзотермическим химическим превращениям под действием высокой температуры и давления в плазменном канале. В результате таких преобразований энергия, выделяемая при химических реакциях, суммируется с тепловой, получаемой при протекании электрического тока, повышая тем самым интегральную энергию в канале разряда и удельную энергетiku воздействия [27]. Повышение энергетики воздействия достигается без роста массогабаритных характеристик электроразрядного оборудования. При этом экзотермические смеси (ЭС), применяемые при ВЭХВ, не входят в перечень взрывчатых веществ, поскольку инициируются электроразрядом и не требуют соблюдения особых условий техники безопасности [28]. В качестве ЭС используются водонаполненные суспензии окислителя (аммиачной селитры NH_4NO_3) и горючего (алюминиевого порошка типа ПА-2 и алюминиевой пудры типа ПАП-1) [29–31]. Данные гетерогенные смеси являются взрывобезопасными, доступными, простыми и относительно дешевыми в изготовлении. ВЭХВ позволяет управлять электровзрывными процессами в конденсированных средах за счет варьирования параметров разрядного контура, состава и массы ЭС и, следовательно, генерировать волны давления в широком диапазоне характеристик. ВЭХВ используют в электроразрядных технологиях разрушения неметаллических материалов, запрессовке труб в решетках теплообменных аппаратов, некоторых видах листовой штамповки и др.

Исследованию ВЭХВ посвящено большое количество научных работ [27–33]. Так, условия повышения эффективности протекания экзотермических процессов для случая открытого объема жидкости определены в [32, 33], а в ограниченном объеме жидкости – в [34]. При этом в [33] представлены результаты экспериментальных исследований волн давления. Изучению волн давления при ВЭХВ в ограниченных объемах в большинстве своем были посвящены

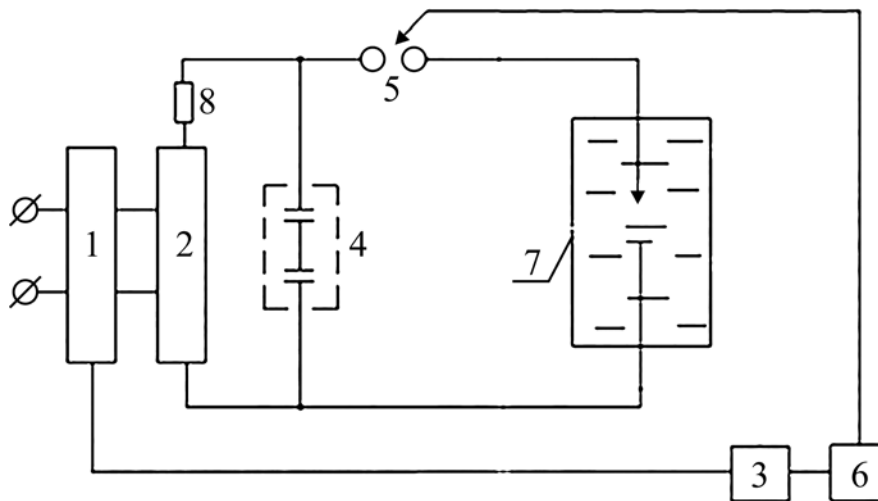


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: 1 – регулировочный трансформатор РТТМ 25/0,5; 2 – высоковольтный выпрямитель-трансформатор ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджога; 7 – разрядная камера; 8 – зарядное сопротивление.

теоретические работы. Так, в работе [27] с помощью математического моделирования исследовались характеристики канала разряда и окружающей жидкости при ВЭХВ в замкнутом цилиндрическом объеме с толстыми стенками. Полученные результаты показали, что размеры разрядных камер оказывают существенное влияние на происходящие в них процессы – так, в заполненной водой цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, при уменьшении диаметра с 0,07 м до 0,045 м давление жидкости возрастает в 1,4–2 раза. В работе [28] предложен теоретический метод оценки волновых полей давления высоковольтного электрохимического взрыва в закрытых объемах с использованием излучения энергии из подвижных границ при сгорании экзотермической смеси. Анализ существующих литературных источников показал недостаточность экспериментальных исследований характеристик волны давления при ВЭХВ в ограниченных объемах жидкости. В то же время возможность использования ВЭХВ, например в гидротехническом строительстве, предполагает его осуществление в ограниченных, причем часто малых объемах жидкости [27, 34], что определяет актуальность таких исследований.

Таким образом, цель настоящей работы – экспериментально исследовать электрические, энергетические и гидродинамические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва в ограниченных объемах жидкости в зависимости от зарядного напряжения, запасаемой электрической энергии и массы сжигаемой экзотермической смеси, а также провести сравнение с другими способами инициирования электрического разряда в аналогичных условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (схема приведена на рис. 1), который в себя включает оборудование, обеспечивающее осуществление ВЭХВ в ограниченных объемах жидкости.

С помощью регулировочного трансформатора (1), выпрямителя-трансформатора (2) и зарядного сопротивления (8) заряжается батарея импульсных конденсаторов (4) до требуемого значения высоковольтного напряжения (свыше 1 кВ). После достижения требуемого напряжения с пульта управления (3) посредством блока поджога (6) коммутируется воздушный разрядник (5), что ведет к выделению электрической энергии в электродной системе, расположенной в камере высокого давления (7). Анод и катод электродной системы оснащены специальными пружинными контактами для установки в межэлектродный промежуток патронов с ЭС с гарантированным электрическим контактом.

Электрический разряд (ВЭХВ, ЭВП) осуществляется в разрядной камере (7, рис. 1) внутренним диаметром 0,164 м и внутренним объемом 0,015 м³. Размеры камеры исключают влияние отраженных от элементов стенда волн на процесс формирования волны давления. Внешний вид разрядной камеры представлен на рис. 2. Электродная система электрически и механически подсоединена к верхнему фланцу камеры, а боковая поверхность камеры содержит специальные отверстия для установки оснастки с волноводными датчиками давления.

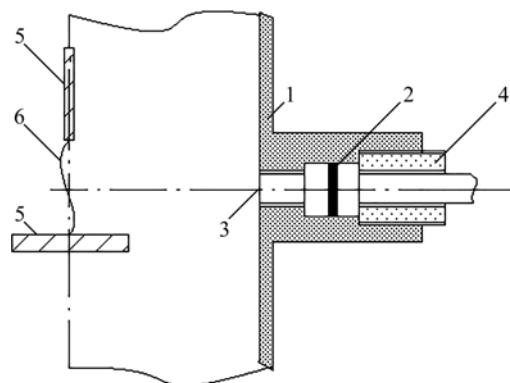
Экспериментальный стенд позволяет одновременно исследовать электрические (разрядный ток и напряжение на межэлектродном промежутке) и гидродинамические



Рис. 2. Разрядная камера с ограниченным объемом жидкости.



(а)



(б)

Рис. 3. Внешний вид (а) и схема крепления (б) датчика давления на корпусе разрядной камеры: 1 – корпус разрядной камеры; 2 – уплотнительное резиновое кольцо; 3 – доньшко датчика; 4 – прижимная гайка; 5 – электроды; 6 – канал электрического разряда.

(волна давления) характеристики процессов при электрическом разряде в жидкости.

Для измерения разрядного тока используется омический коаксиальный шунт [35] с сопротивлением $R_{ш} = 0,00068$ Ом. Изменение разрядного напряжения между электродами электродной системы фиксировали с помощью делителя напряжения типа PVM-2 компании NorthStar с коэффициентом деления 1:1000.

Для измерения характеристик волны давления использовался волноводный пьезоэлектрический датчик импульсного давления типа ДТХ-1 [36]. Датчик ДТХ-1 закрепляли в специальном отверстии на боковой стенке разрядной камеры с помощью оснастки в экваториальной плоскости канала разряда. Общий вид установленного датчика давления и схема его крепления приведены на рис. 3.

Регистрация сигналов измерительных зондов осуществлялась с помощью цифрового четырехканального осциллографа OWON XDS 3104E.

Одним из способов управления гидродинамическим воздействием на объект при ВЭР или ВЭХВ является изменение режима ввода энергии в канал разряда за счет варьирования параметров разрядного контура. Известно, что наибольшее

влияние на амплитуду волны давления оказывает зарядное напряжение и индуктивность [15, 21]. Наиболее простым вариантом изменения режима работы электроразрядных установок является варьирование величины зарядного напряжения. Для достижения поставленной цели в работе неизменными поддерживались следующие параметры разрядного контура: емкость конденсаторной батареи $C = 1,017$ мкФ; индуктивность разрядного контура $L = 4,122$ мкГн; сопротивление разрядного контура $R = 0,18$ Ом; расстояние между электродами патрона, наполненного ЭС, $l = 0,03$ м.

Как показали предварительные испытания ВЭР и ВЭХВ на лабораторном стенде, для обеспечения надежной работы датчиков при стабильном выделении накопленной энергии в нагрузку за микросекундные диапазоны времени напряжение заряда конденсаторной батареи U_0 варьировалось от 17 до 30 кВ.

Варьирование величины зарядного напряжения приводит к изменению запасенной энергии (см. таблицу).

Согласно данным [33], рекомендуется использовать ЭС с составом горючего и окислителя 60 и 40% соответственно. Для настоящих исследо-

Таблица. Параметры режимов исследования

Режим	1	2	3	4	5	6
C, Φ	$1,017 \times 10^{-6}$	$1,017 \times 10^{-6}$	$1,017 \times 10^{-6}$	$1,017 \times 10^{-6}$	$1,017 \times 10^{-6}$	$1,017 \times 10^{-6}$
$U_0, \text{В}$	17000	20000	23000	25000	27500	30000
$W_0, \text{Дж}$	≈ 147	≈ 203	≈ 269	≈ 318	≈ 385	≈ 458
$l_0, \text{м}$	–	0,037	0,04	0,041	0,044	0,045

ваний были изготовлены патроны цилиндрической формы с неизменным расстоянием между электродами (0,03 м), заполненные ЭС этого состава, причем масса ЭС варьировалась в диапазоне от 0,1 до 0,45 г.

В данной работе выполнялось сравнение силового (волнового) воздействия при ВЭХВ и электрическом взрыве тонкого (диаметром 0,09 мм) медного проводника, инициирующего ВЭР. Параметры разрядного контура при ВЭХВ и ЭВП были идентичны, длина наполненной ЭС части патрона была равна длине проводника. Кроме того, фиксировались электрические и гидродинамические характеристики ЭВП данного диаметра при его оптимальной (по амплитуде волны давления) длине, рассчитанной согласно выражению (1) и приведенной в таблице:

$$l_0 = 0,36 \left(r^2 z W_0 / A \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где r – расстояние от оси канала разряда, м; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление контура, Ом; $W_0 = 0,5CU^2$ – энергия, выделившаяся в разрядном контуре, Дж; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; L – индуктивность разрядного контура, Гн; U – напряжение пробоя, В; A – искровая постоянная ($A = 0,25 \times 10^5 \text{ В с/м}^2$ – для инициирующего ЭВП; $A = 10^5 \text{ В с/м}^2$ – электрический взрыв за счет пробоя межэлектродного промежутка высоковольтным напряжением).

Известно, что для обеспечения максимальной скорости выделения энергии в разрядном промежутке при ЭВП необходимо выполнение условия согласования его длины и диаметра [15]. В этом случае длина и диаметр проводника зависят от параметров разрядного контура и материала проводника и могут быть рассчитаны по выражениям (2) и (3) соответственно. В данной работе на одном экспериментальном режиме (зарядное напряжение 20 кВ) был произведен электрический взрыв медного проводника с геометрическими размерами, близкими к согласованным – диаметр проводника 0,14 мм, длина проводника 58 мм:

$$l_{01} = 2 \times 10^{-3} U_0 \sqrt{LC}, \quad (2)$$

$$d_{01} = 2 \left[\frac{W_0}{z \rho_w \sigma_{w0} (\lambda_w + \gamma_w)} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

где ρ_w – плотность материала проводника, кг/м³; σ_{w0} – удельная электропроводность материала проводника, См/м; λ_w – удельная теплота плавления, Дж/кг; γ_w – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Также выполнялось сравнение результатов экспериментов с расчетными данными, полученными с помощью полуэмпирической методики расчета (ПЭМР) параметров волны давления (амплитуды) подводного электровзрыва в экваториальной плоскости к каналу разряда [37]. При этом считалось, что электрический взрыв осуществлялся за счет пробоя межэлектродного промежутка высоковольтным напряжением (самопробоем), длина межэлектродного промежутка определялась по выражению (1).

Волновое воздействие при ВЭХВ (как и в любой другой импульсной технологии, в основе которой лежит ВЭР) происходит в два этапа. На первом этапе источником воздействия является волна сжатия, генерированная электрическим пробоем межэлектродного промежутка. После замыкания межэлектродного промежутка образуется заполненная плазмой полость канала разряда. Давление в нем значительно выше давления в окружающей жидкости. Канал начинает расширяться. Образовавшаяся при этом волна сжатия и последующий за ней поток жидкости распространяются по всему объему рабочей жидкости (в нашем случае – разрядной камеры) [27]. За волной сжатия следует волна разряднения. На втором этапе волновое воздействие на объект осуществляется в результате пульсации парогазовой полости (ПП). В данной работе будет исследовано волновое действие первого этапа.

Схематическое изображение генерированной волны сжатия для этого случая приведено на рис. 4.

В ходе эксперимента исследовались временные профили волны давления, а также разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке. При цифровой обработке осциллограмм волны давления определялись и вычислялись:

- амплитуда волны сжатия, P_{\max} , Па;
- длительность волны сжатия, τ , с (на спаде волны сжатия до значения $0,1P_{\max}$);
- удельный импульс волны сжатия J , Па за время τ . Удельный импульс определялся согласно выражению (4):

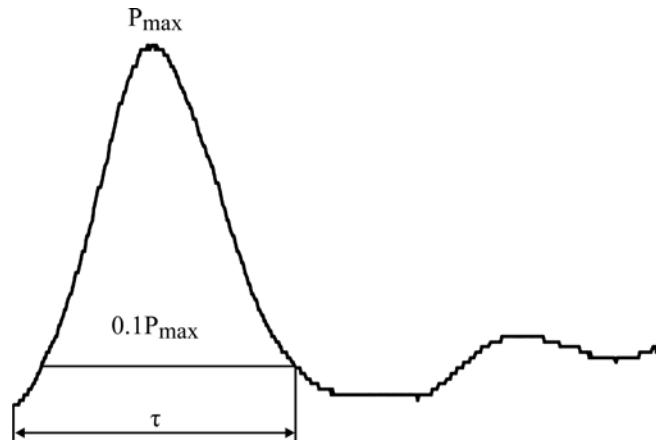


Рис. 4. Схематическое изображение волны давления, которая была генерирована ВЭХВ в жидкости.

$$J = \int_0^{\tau} (t) dt. \quad (4)$$

При цифровой обработке осциллограмм разрядного тока и напряжения определялись и вычислялись:

- длительность первого полупериода разрядного тока (τ_1);
- максимальная электрическая мощность $N_{\max} = \max [U(t) \times I(t)]$;
- энергия, выделенная в канале разряда (W_F):

$$W_F = \int_0^t IU dt, \quad (5)$$

где I – разрядный ток, А; U – напряжение на разрядном промежутке, В; t – время, с;

- энергия, выделившаяся в первый полупериод тока (W_1):

$$W_1 = \int_0^{\tau_1} IU dt. \quad (6)$$

В некоторых режимах (в частности, при ЭВП) малое значение активного сопротивления нагрузки (медного проводника, замыкающего противозлектроды, и образовавшегося при ЭВП канала разряда) приводило к значительному фазовому сдвигу между измеряемыми осциллографом временными характеристиками тока и напряжения и проблемами непосредственно вычисления электрической мощности, выделяющейся на активном сопротивлении межэлектродного промежутка. Для искусственного удаления фазового сдвига, согласно выражению (7), рассчитывалась величина компенсирующего напряжения, которая динамически суммировалась с осциллограммой напряжения на разрядном промежутке до достижения пересечения осциллограмм тока и напряжения в их нулевых значениях:

$$U_L = L_1 \frac{dI}{dt}, \quad (7)$$

где U_L – компенсирующее напряжение, В; L_1 – компенсирующий коэффициент, Гн; t – время, с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты экспериментальных исследований волн сжатия приведены на рис. 5–7. На них и в дальнейшем были приняты следующие сокращенные названия экспериментальных режимов: ВЭХВ-ЭС = 0,1 г – высоковольтный электрохимический взрыв, масса экзотермической смеси 0,1 г; ВЭХВ-ЭС = 0,2 г – высоковольтный электрохимический взрыв, масса экзотермической смеси 0,2 г; ВЭХВ-ЭС = 0,3 г – высоковольтный электрохимический взрыв, масса экзотермической смеси 0,3 г; ВЭХВ-ЭС = 0,45 г – высоковольтный электрохимический взрыв, масса экзотермической смеси 0,45 г; ПЭМР – полуэмпирическая методика расчета; ЭВП-Cu; $d = 0,09$ мм; $l = 30$ мм – электрический взрыв инициирующего медного проводника диаметром 0,09 мм и длиной 30 мм; ЭВП-Cu; $d = 0,09$ мм; $l = \text{опт}$ – электрический взрыв инициирующего медного проводника диаметром 0,09 мм и оптимальной длиной, при которой генерируется волна давления с наибольшей амплитудой; ЭВП – согласованный режим – электрический взрыв проводника в согласованном режиме.

Анализ результатов эксперимента (см. рис. 5–7) показывает, что использование ВЭХВ в сравнении с электрическим взрывом, инициируемым тонким медным проводником длиной 30 мм, позволяет увеличить все исследуемые характеристики волны сжатия – амплитуду, удельный импульс, продолжительность. Так, при зарядном напряжении 30 кВ использование ВЭХВ дает увеличение импульса более чем на 70%, амплитуды – более чем на 60%, длительности – более чем на 9%. Более того, сравнение характеристик волн давления при ВЭР с замыканием межэлектродного промежутка

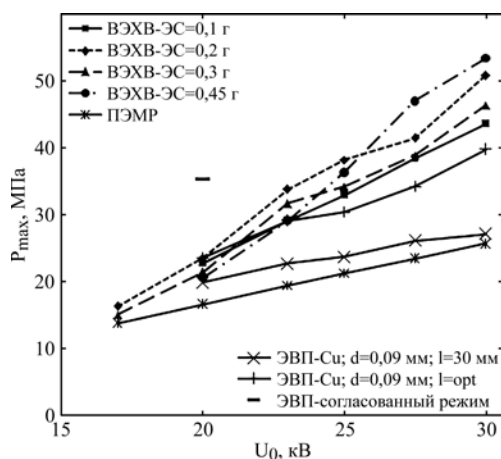


Рис. 5. Амплитуда волны давления при электрическом взрыве в воде в зависимости от типа инициирования.

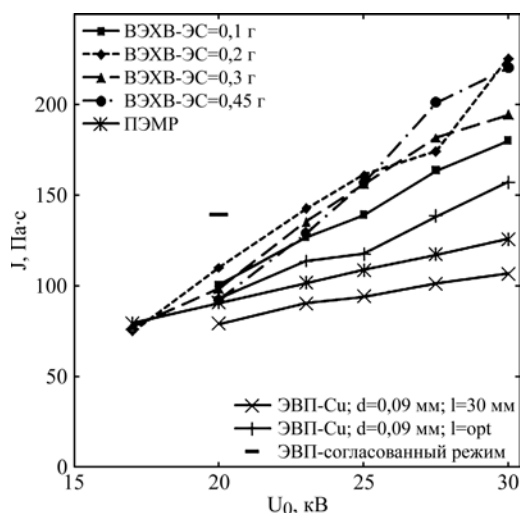


Рис. 6. Удельный импульс волны давления при электрическом взрыве в воде в зависимости от типа инициирования.

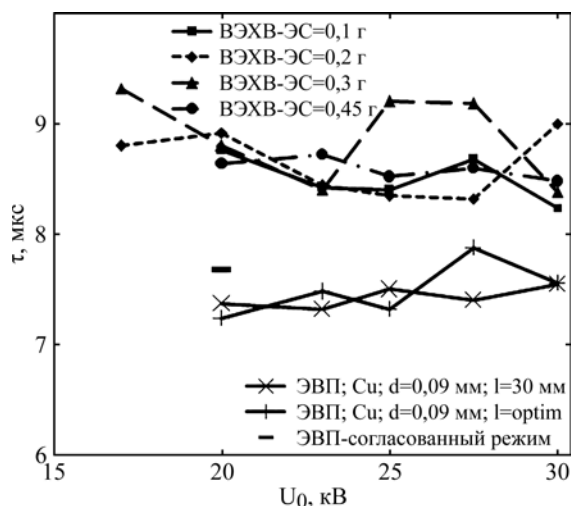


Рис. 7. Длительность волны давления при электрическом взрыве в воде в зависимости от типа инициирования.

тонким проводником оптимальной длины (который позволяет получить наибольшую величину амплитуды волны давления при ВЭР) и при ВЭХВ показывает возможность увеличения во втором случае амплитуды более чем на 8% и удельного импульса более чем на 18% при зарядном напряжении U_0 свыше 23 кВ.

При согласованном режиме ЭВП можно ожидать генерирования волны сжатия с большей амплитудой. Это допущение было подтверждено

экспериментальными результатами: в сравнении с ВЭХВ согласованный режим ЭВП позволяет увеличить амплитуду волны сжатия более чем на 50%, а удельный импульс – более чем на 25%, в то время как длительность более чем на 12% меньше.

Сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами расчетов по ПЭМР (рис. 5 и 6) показало, что на режимах с зарядным напряжением 23 кВ и выше при ВЭХВ генери-

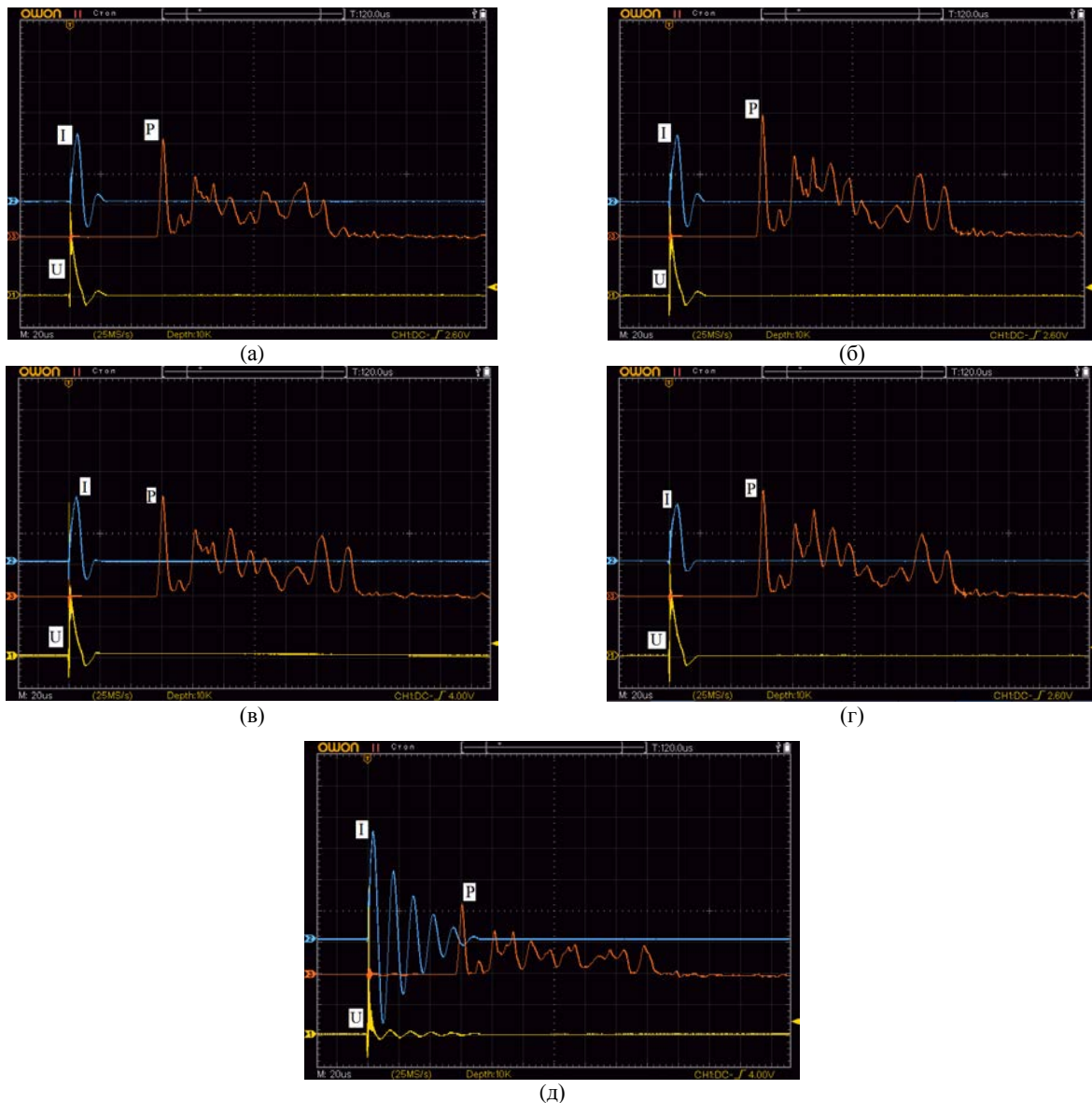


Рис. 8. Типовые осциллограммы экспериментальных режимов при зарядном напряжении 25 кВ: ВЭХВ, масса ЭС 0,1 г (а); ВЭХВ, масса ЭС 0,2 г (б); ВЭХВ, масса ЭС 0,3 г (в); ВЭХВ, масса ЭС 0,45 г (г); ЭВП, материал проводника Cu, длина 30 мм (д).

руется волна сжатия с большими амплитудой и удельным импульсом, чем при пробое водного промежутка приложением к аноду высокого напряжения (без средств инициирования), – амплитуды более чем на 49% и удельного импульса более чем на 24%.

Анализ массива полученных результатов позволил сделать вывод, что с повышением зарядного напряжения наблюдается увеличение амплитуды и удельного импульса генерируемой при ВЭХВ волны сжатия. Так, с повышением зарядного напряжения от 20 кВ до 30 кВ амплитуда волны сжатия увеличивается более чем на 90%, а удельный импульс – более чем на 78%. При этом в обоих случаях зависимость носит линейный характер, коэффициент достоверности аппроксимации 0,976 и выше. Кроме того, повышение напряжения не влияет на длительность волны сжатия, поскольку при ВЭР

на данный параметр существенно влияет емкость конденсаторной батареи, которая во время эксперимента оставались неизменной.

Результаты исследований также показывают некоторое влияние массы ЭС на амплитуду и импульс волны давления при ВЭХВ на режимах с зарядным напряжением до 25 кВ включительно (все результаты укладываются в диапазон 16%). Начиная с 27,5 кВ этот диапазон расширяется (при зарядном напряжении 27,5 кВ более 20%). Анализируя влияние массы ЭС на гидродинамические характеристики ВЭХВ, стоит отметить ощутимо меньшие значения амплитуды и удельного импульса волны сжатия при взрыве 0,1 г смеси и большие (особенно при высоких значениях зарядного напряжения) – при 0,45 г. Использование ЭС массой 0,2–0,3 г при ВЭХВ с зарядным напряжением свыше 23 кВ не дает четкого представления о влиянии массы,

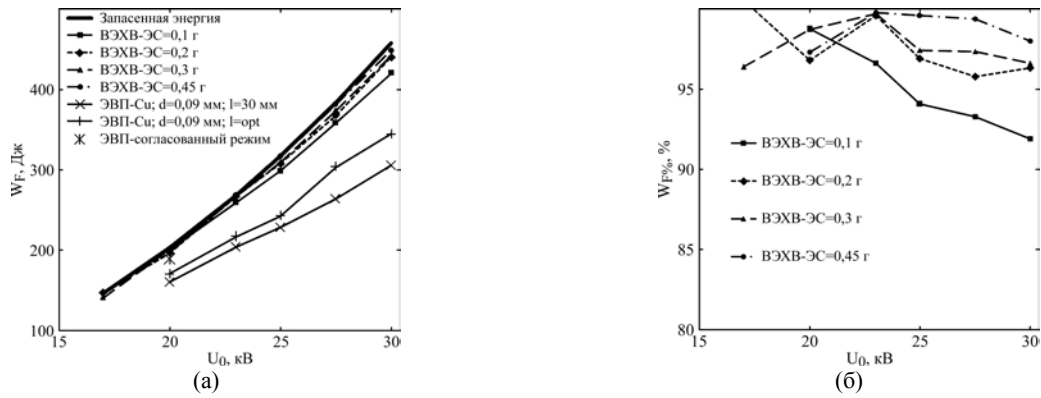


Рис. 9. Энергия, которая выделилась в канале разряда на разных режимах инициирования (а) и только на режимах ВЭХВ (б).

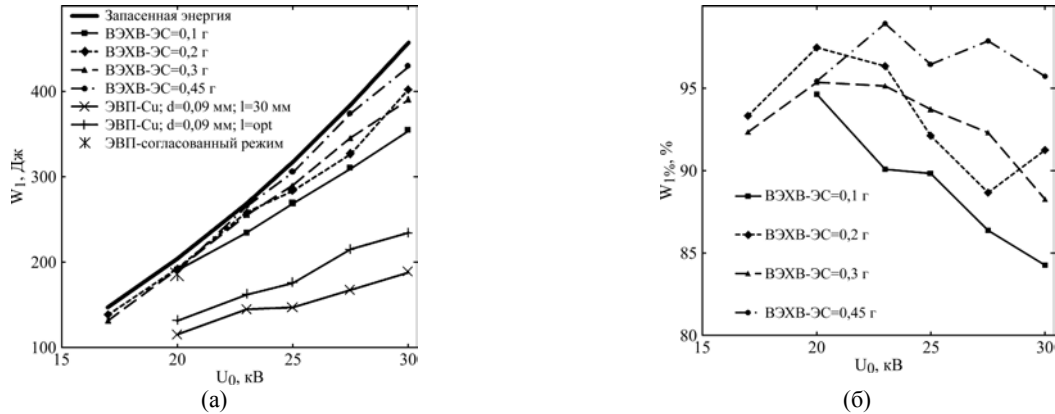


Рис. 10. Энергия, которая выделилась в канале разряда за первый полупериод тока на разных режимах инициирования (а) и только на режимах ВЭХВ (б).

поскольку разброс амплитуды и удельного импульса волны сжатия в этом случае лежит в пределах до 8%.

Также отмечается слабое влияние массы ЭС на продолжительность генерируемой волны сжатия – все полученные результаты лежат в диапазоне 13% между собой. Это позволяет предположить, что в данном диапазоне параметров разрядного контура и при массе ЭС от 0,1 до 0,45 г длительность генерируемой волны давления можно считать величиной неизменной.

Для подтверждения предположения выполним анализ осциллограмм разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке. На рис. 8 приведены осциллограммы разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке и генерируемой волны сжатия для режимов ВЭХВ с разными массами ЭС и режима ЭВП длиной 30 мм и диаметром 0,09 мм при зарядном напряжении 25 кВ. Их анализ показывает, что ВЭХВ, как и ЭВП, характеризуется незначительными предпробойными потерями. Также можно отметить, что при ВЭХВ реализуется менее колебательный (близкий к апериодическому) режим, чем при электровзрыве, который был инициирован тонким медным проводником. Соответственно большая часть запасенной энергии выделяется в первый полупериод разрядного тока и принимает участие в форми-

ровании волны сжатия, что ведет к генерированию волны сжатия с большей амплитудой и удельным импульсом.

Более детальный анализ энергии, выделившейся в канале разряда (см. рис. 9 и 10), свидетельствует, что при ВЭХВ наблюдаются меньшие потери энергии в сравнении с электрическим взрывом инициирующего проводника. Для качественного анализа и сравнения (см. рис. 9б и 10б) перейдем от абсолютных значений к относительным. Были рассчитаны и подвергнуты анализу значения энергии, выделившейся в канале разряда за все время ($W_{F\%}$) (8) и за первый полупериод разрядного тока ($W_{1\%}$) (9) в процентах от запасенной энергии:

$$W_{F\%} = (W_F / W_0) \times 100\%, \quad (8)$$

$$W_{1\%} = (W_1 / W_0) \times 100\%. \quad (9)$$

При ВЭХВ в канале разряда выделяется более 91% (а при исключении режима с массой ЭС 0,1 г – более 95%) от запасенной энергии, тогда как при электрическом взрыве инициирующего проводника (длиной 30 мм) от 66 до 78%, а на режимах с оптимальной длиной проводника – от 75 до 84%. Согласованный режим ЭВП по выделившейся суммарной энергии в нагрузке близок к ВЭХВ – 93% от накопленной энергии. Если рассматривать энергию, выделившуюся только в первый полупериод разрядного тока (см. рис. 10), во время которого осуществляется

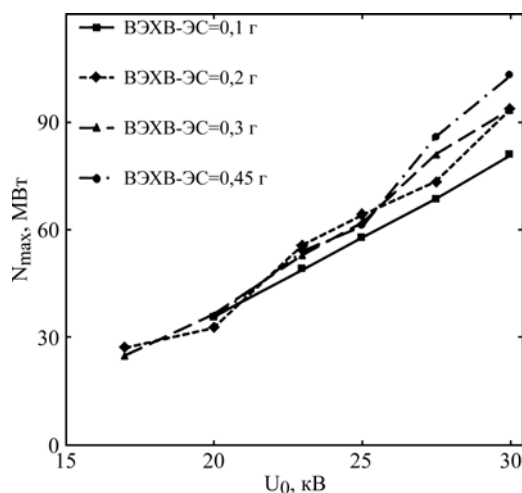


Рис. 11. Максимальная мощность на разных режимах ВЭХВ.

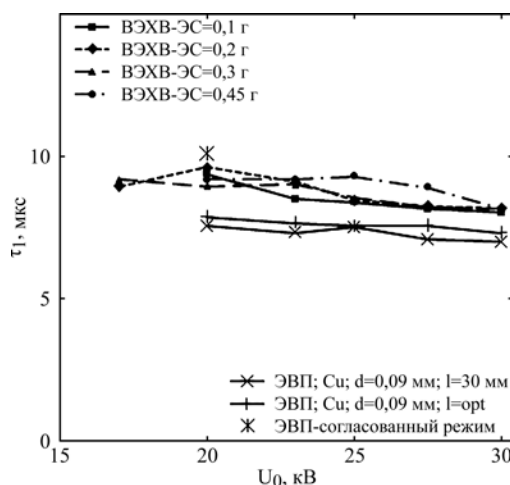


Рис. 12. Длительность первого полупериода разрядного тока для разных режимов инициирования.

формирование волны сжатия [14], то в данном случае преимущество ВЭХВ перед электрическим взрывом иницирующего проводника еще более выражено. При ВЭХВ в первый полупериод тока выделяется от 84% (масса ЭС 0,1 г, 30 кВ) до 98% (масса ЭС 0,45 г, 27,5 кВ), тогда как при ЭВП (длина проводника 30 мм) от 41 до 56% от накопленной энергии. На режимах с оптимальной длиной проводника ситуация несколько лучше – от 51 до 64%. При согласованном режиме ЭВП получаем значение, близкое к ВЭХВ – 90% от накопленной энергии выделяется в первый полупериод.

При ВЭХВ (рис. 11) наблюдается увеличение максимальной мощности с повышением накопленной энергии за счет зарядного напряжения. При этом на режимах до 23 кВ масса ЭС не влияет на величину максимальной мощности. При напряжениях свыше 23 кВ (накопленная энергия 269 Дж) данная характеристика при массе ЭС 0,1 г имеет меньшие значения в сравнении с режимами с другими массами. Начиная с зарядного напряжения 27,5 кВ (385 Дж) на режимах ВЭХВ с массой ЭС 0,45 г наблюдается большая максимальная мощность, чем при других массах ЭС.

Анализ длительности первого полупериода разрядного тока (см. рис. 12) показывает, что при ЭВП реализуются режимы с меньшей (до 20% в зависимости от режима) длительностью, чем при ВЭХВ. Если рассматривать только режимы ВЭХВ, то можно отметить слабое влияние всего рассматриваемого диапазона параметров на длительность первого полупериода тока (менее 20%).

Влияние зарядного напряжения на характеристики ВЭХВ можно наблюдать на рис. 13 и 14. Полученные данные (см. рис. 8–14) позволяют предположить, что для каждого сочетания параметров разрядного контура существует некоторая рациональная масса ЭС, при которой реализуется ВЭХВ с максимальной мощностью в близком к апериодическому режиму разряда. Так, при ВЭХВ с массой ЭС 0,1 г режим, близкий к апериодическому, реализуется только при зарядном напряжении 20 кВ (рис. 13), а при массе ЭС 0,45 г подобный режим был реализован во всем диапазоне исследуемого напряжения (рис. 14).

Анализ электрических и энергетических характеристик ВЭХВ показал, что основное влияние на форму этих характеристик, степень

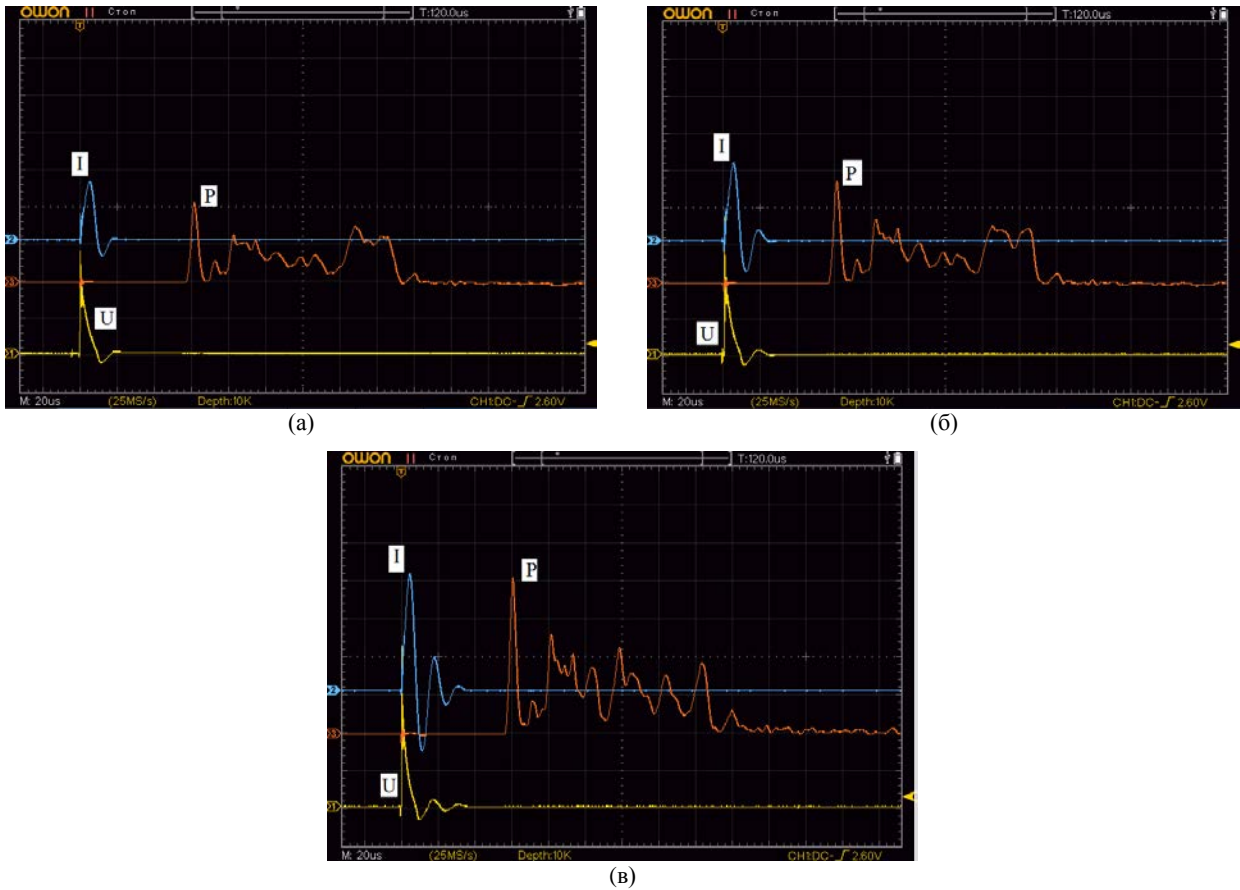


Рис. 13. Осциллограммы разрядного тока (I), напряжения на разрядном промежутке (U), генерированной волны давления (P) при ВЭХВ с массой ЭС 0,1 г: зарядное напряжения 20 кВ (а); зарядное напряжения 23 кВ (б); зарядное напряжения 30 кВ (в).

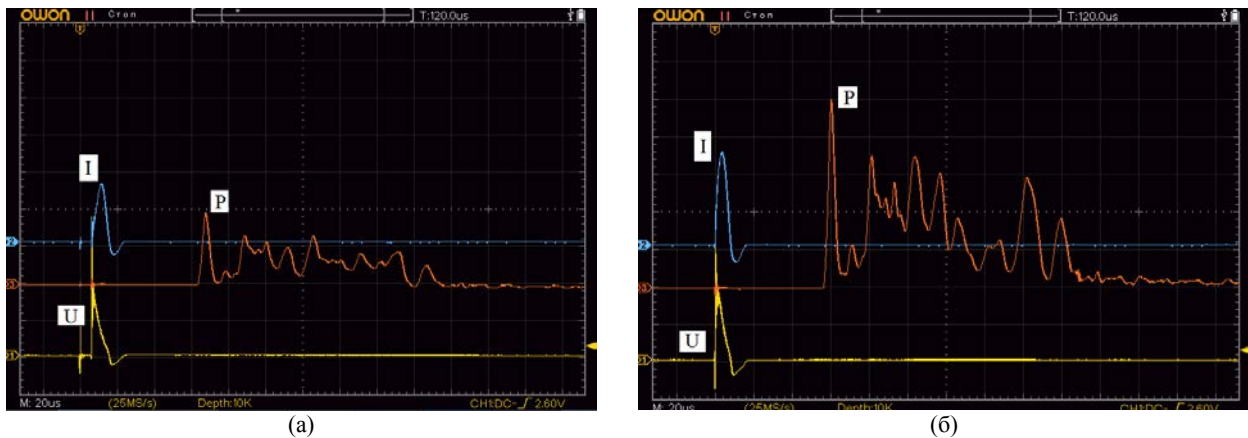


Рис. 14. Осциллограммы разрядного тока (I), напряжения на разрядном промежутке (U), генерированной волны давления (P) при ВЭХВ с массой ЭС 0,45 г: зарядное напряжения 20 кВ (а); зарядное напряжения 30 кВ (б).

выделения электрической энергии в первом полупериоде разрядного тока и формирование волны сжатия оказывают как зарядное напряжение, так и масса сгорающей экзотермической смеси. При этом, несмотря на слабо выраженные обратные зависимости $W_{F\%}(U_0)$ и $W_{1\%}(U_0)$ (см. рис. 9 и 10 соответственно), наблюдается пропорциональный рост гидродинамических характеристик ВЭХВ $P_{\max}(U_0)$ и $J(U_0)$ (см. рис. 5 и 6 соответственно) при взрыве ЭС всего рассматриваемого диапазона масс за счет пропорционального увеличения $N_{\max}(U_0)$ (см. рис. 11) при неизменной длительности $\tau(U_0)$ (см. рис. 12).

В то же время более высокие показатели $P_{\max}(U_0)$ и $J(U_0)$ ВЭХВ относительно ЭВП оптимальной длины, по всей видимости, демонстрируют некоторое влияние степени сгорания ЭС на дополнительное выделение энергии в канале разряда во время протекания первой полуволны разрядного тока и гидродинамические характеристики образовавшейся волны сжатия.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1) ВЭХВ является способом инициирования и управления параметрами электрического разряда в жидкости. Он позволяет осуществить высоковольтный электрический взрыв в жидкости с малыми энергетическими потерями (менее 9%) и реализовать режим электрического пробоя, близкий к апериодическому (в первый полупериод тока выделяется более 84% накопленной в конденсаторной батарее энергии);

2) использование ВЭХВ позволяет генерировать в ограниченном объеме волны сжатия с параметрами (амплитуда, длительность и удельный импульс), большими, чем при электрическом взрыве инициирующего металлического проводника при одинаковых начальных условиях;

3) изменение начальных условий осуществления ВЭХВ за счет повышения зарядного напряжения приводит к увеличению амплитуды и удельного импульса генерируемой волны сжатия по линейной зависимости (коэффициент достоверности аппроксимации более 0,976) – при повышении зарядного напряжения от 20 кВ до 30 кВ амплитуда волны давления больше, чем на 90%, а импульс – больше, чем на 78%. При этом повышение напряжения не влияет на длительность волны сжатия;

4) зарядное напряжение в рассматриваемом диапазоне параметров существенно не влияет на долю накопленной энергии, которая выделилась в канале разряда за все время и первый полупериод разрядного тока. При этом наблюдается прямая зависимость доли выделившейся энергии от массы ЭС;

5) рассмотренное в экспериментальных исследованиях изменение начальных условий существенно не влияет на длительность первого полупериода тока при ВЭХВ – все полученные данные лежат в диапазоне менее 20%;

6) повышение за счет зарядного напряжения накопленной энергии приводит к увеличению максимальной мощности ВЭХВ. При этом на режимах до 23 кВ (накопленная энергия 269 Дж) масса ЭС не влияет на величину максимальной мощности. Начиная с 23 кВ (накопленная энергия 269 Дж), мощность режима ВЭХВ с массой ЭС 0,1 г начинает отставать от режимов с другими массами, а с зарядного напряжения 27,5 кВ (385 Дж) на режимах ВЭХВ с массой ЭС 0,45 г наблюдается большая максимальная мощность, чем при других массах ЭС;

7) комплексный анализ зависимостей энергетических и гидродинамических характеристик ВЭХВ позволил заключить следующее:

– основное влияние на форму электрических и энергетических характеристик ВЭХВ, степень выделения электрической энергии в первом

полупериоде разрядного тока и формирование волны сжатия оказывают как зарядное напряжение, так и масса ЭС;

– для каждого сочетания параметров разрядного контура существует некоторая рациональная масса ЭС, при которой реализуется ВЭХВ с максимальной мощностью в близком к апериодическому режиме разряда;

– анализ гидродинамических характеристик ВЭХВ показал некоторое влияние массы ЭС на дополнительное выделение энергии в канале разряда во время протекания первой полуволны разрядного тока и параметры образовавшейся волны сжатия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривицкий, Е.В., Шамко, В.В., *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
2. Liang, Qiao, Xiaobing, Zhang, Bing, Yan, Yang, Liu, et al., An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum, *AIP Adv.*, 2021, no. 11, art. ID 095109. doi: 10.1063/5.0064322
3. Titova, Y.V., Stokozenko, V.G. and Maximov, A.I., Application of underwater discharge for modification of cellulose materials, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, vol. 38, no. 4, p. 933. doi: 10.1109/TPS.2010.2042181
4. Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., Milicevic, B., et al., High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste, *Sustainability*, 2021, no. 13, p. 4481. <https://doi.org/10.3390/su13084481>
5. Rizun, A.R., Denisyuk, T.D. and Domershchikova A.O., Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2017, vol. 53, no. 6, p. 592. <https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
6. Mitsuhiro, Sato, Takashi, Sakugawa, Tomohiko, Yamashita and Nushin, Hosano, Effects of voltage and current waveforms on pulse discharge energy transfer to underwater shock waves for medical applications, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2020, vol. 48, no. 7, p. 2639. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2992638>
7. Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K. and Loncaric, A., Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions, *Plants*, 2021, no. 10, p. 2137. <https://doi.org/10.3390/plants10102137>.
8. Bian, D.C., Yan, D., Zhao, J.C. and Niu, S.Q., Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 2018, no. 3, p. 1. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>.

9. Lee, K., Chung, K.-J., Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *J. Appl. Phys.*, 2017, no. 121, art. ID 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
10. Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning, *Curr. Appl. Phys.*, 2015, vol. 15, no. 9, p. 977. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010>
11. Yan, Bingnana, Zhou, Jing, Zhao and Liang, Liu, Chongxin, Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal, *J. Power Technol.*, 2016, vol. 96, no. 4, p. 261.
12. Zhixiang, Cai, Hui, Zhang, Kerou, Liu and Yufei, Chen, Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity, *Energies*, 2020, no. 13, p. 5432. <https://doi.org/10.3390/en13205432>
13. Хвощан, О.В., Смирнов, О.П., Залежність енергетичних процесів високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів "СКІФ" від характеристик навантаження, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 1, с. 58. <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
14. Курец, В.И., Соловьев, М.А., Жучков, А.И., Барская, А.В., *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*. Томск: Изд. Томского политехнич. унив., 2012. 272 с.
15. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
16. Qingming, Liu, Yunming and Zhang, Shock wave generated by high-energy electric spark discharge, *J. Appl. Phys.*, 2014, no. 116, art. ID 153302. <https://doi.org/10.1063/1.4898141>
17. Osamu, Higa, Ryo, Matsubara, Katsuya, Higa, Yoshitaka, Miyafuji, et al., Mechanism of the shock wave generation and energy efficiency by underwater discharge, *Int. J. Multiphys.*, 2012, vol. 6, no. 2, p. 89.
18. Touya, G., Reess, T., Pécastaing, L., Gibert, A., et al., Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, vol. 39, p. 5236. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/24/021>
19. Smirnov, A.P., Kosenkov, V.M., Zhekul, V.G. and Poklonov, S.G., The study of the effect of the electrodischarge action modes on viscous deposits in cylindrical channels, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 237. <https://doi.org/10.3103/S1068375510030087>
20. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Taftai, E.I., Khvoshchan, O.V., et al., Effect of parameters of liquids on amplitudes of pressure waves generated by electric discharge, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 84. <https://doi.org/10.3103/S1068375519010149>
21. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Mel'kher, Yu.I., Taftai, E.I., et al., Experimental investigation of the pressure waves generated by an electric explosion in a closed volume of a fluid, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 5, p. 475. <https://doi.org/10.3103/S1068375518050101>
22. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Taftai, E.I., Khvoshchan, O.V., et al., Experimental study of pressure waves upon the electrical explosion of wire under the conditions of elevated hydrostatic pressure, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 2, p. 192. <https://doi.org/10.3103/S1068375520020155>
23. Xingwen, Li, Youchuang, Chao, Jian, Wu, Ruoyu, Han, et al., Study of the shock waves characteristics generated by underwater electrical wire explosion, *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, art. ID 023301. <https://doi.org/10.1063/1.4926374>
24. Ruoyu, Han, Haibin, Zhou, Jiawei, Wu, Aici, Qiu, et al., Relationship between energy deposition and shock wave phenomenon in an underwater electrical wire explosion, *Phys. Plasmas*, 2017, vol. 24, art. ID 093506. <https://doi.org/10.1063/1.4989790>
25. Ruoyu, Han, Jiawei, Wu, Haibin, Zhou, Yongmin, Zhang, et al., Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation, *Matter Radiat. Extremes*, 2020, vol. 5, art. ID 047201. <https://doi.org/10.1063/1.5135725>
26. Krasik, Y.E., Grinenko, A., Sayapin, A., Efimov, S., et al., Underwater electrical wire explosion and its applications, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, vol. 36, no. 2, p. 423.
27. Барбашова, Г.А., Вовченко, А.И., Влияние геометрии замкнутого цилиндра на гидродинамические процессы, происходящие в нем при высоковольтном электрохимическом взрыве, *ЭОМ*, 2016, т. 52, № 2, с. 51.
28. 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.
29. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Козырев, С.С., Овчинникова, Л.Е., Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсных технологиях, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 85. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.85>
30. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Поздеев, В.А., Денисюк, Т.Д., Разработка технологического процесса разрушения прочных грунтов воздействием электроразряда, инициированного экзотермическими композициями, *ЭОМ*, 2007, т. 43, № 5, с. 114.
31. Rizon, A.R., Goleni, Yu.V. and 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.
32. Vovchenko, A.I. and Demidenko, L.Y., Parameters of high-voltage electrochemical explosion under controlled electrical energy supply, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 1, p. 101.
33. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования*

энергии в конденсированных средах. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.

34. Vovchenko, A.I., Demidenko, L.Y. and Starkov, I.N., Energy conversion processes at a high-voltage electrochemical explosion in limited volumes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 5, p. 518.
35. Жекул, В.Г., Поклонов, С.Г., Смирнов, А.П., Макаренко, В.С., Комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости, *Вісник нац. технічн. унів. «ХП»*. Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг, 2016, № 14, с. 34.
36. Жекул, В.Г., Смирнов, А.П., Тафтай, Э.И., Хвощан, О.В., Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде, *Електротех. електромехан.*, 2017, № 5, с. 55. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.09>
37. Шамко, В.В., Кучеренко, В.В., *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. 52 с.

Summary

In this paper, the dependence of the charging voltage, stored electrical energy, and the mass of the combusted

exothermic mixture on electrical, energy and hydrodynamic characteristics of a high-voltage electrochemical explosion (HVEE) in limited volumes of liquid on is experimentally studied. A comparison with other methods of initiating an electric discharge under similar conditions was made. The results established that the HVEE makes it possible to carry out a high-voltage electric discharge with low energy losses (less than 9%) and to realize an electrical breakdown mode close to aperiodic. It has been found that HVEE can generate pressure waves with an amplitude up to 37% and a pulse up to 45% larger (at a charging voltage of 25 kV or higher) than that of an electric explosion of an initiating metallic conductor of optimum length under the same initial conditions. It was found that an increase in the charging voltage leads to an increase in the amplitude and pulse of the generated pressure wave along a linear dependence. A comprehensive analysis of the dependences of the energy and hydrodynamic characteristics showed that the main influence on the formation of the pressure wave pulse during the HVEE is provided by both the stored electrical energy and the interconnection between the electrical parameters of the discharge circuit and the mass of the burning exothermic mixture, which determines the shape of the discharge characteristics.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, charging voltage, exothermic mixture, pressure wave, energy, impulse