

Исследование влияния ограниченного объема на пульсацию парогазовой полости при высоковольтном электрическом взрыве в жидкости

А. П. Смирнов*, О. В. Хвоцан, Т. Д. Денисюк

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,

г. Николаев, 54018, Украина

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

Поступила в редакцию 13.07.2023

После доработки 28.11.2023

Принята к публикации 05.12.2023

Оценено влияние ограниченного объема на гидродинамические послеразрядные процессы при высоковольтном электрическом взрыве: высоковольтном электрохимическом взрыве (ВЭХВ) и электрическом взрыве тонкого иницирующего проводника (ЭВП), в жидкости и изучена динамика парогазовой полости (ПП). Экспериментальные исследования показали преимущество ВЭХВ в сравнении с ЭВП по энергии, вводимой в ПП, выраженное в увеличении периода пульсации ПП до 55%. Отмечено, что при ЭВП в ограниченном объеме разрядной камеры период пульсации ПП уменьшается до 7,5 раз по сравнению с ЭВП в неограниченном пространстве при тех же начальных условиях. Предложена методика расчета квазистатического давления при электрическом взрыве в ограниченном объеме с фиксированными геометрическими параметрами. Отмечена взаимосвязь расчетного квазистатического давления с амплитудой генерированной первой волны сжатия.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, высоковольтный электрохимический взрыв, парогазовая полость, период пульсации, квазистатическое давление, ограниченный объем

УДК 537.528

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.40>

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный электрический взрыв (ВЭВ), а именно пробой жидкого межэлектродного промежутка вследствие подачи высоковольтного напряжения, нашел широкое распространение в различных отраслях промышленности. Во время ВЭВ в определенном объеме (канале разряда) в течение малого промежутка времени образуется высокая плотность энергии и резко повышаются давление и температура. Это приводит к генерированию сильных волн давления, излучаемых в окружающую среду [1]. С помощью ВЭВ реализуются разнообразные разрядно-импульсные технологии (РИТ), характеризующиеся эффективностью, экологичностью, относительно низкой себестоимостью и простотой в реализации. Так, ВЭВ используется как источник акустических сигналов [2], для обработки различных материалов [3–5], в медицине [6], сельском хозяйстве [7] и нефтедобывающей промышленности [8–13].

Несмотря на то что ВЭВ и разработанные на его основе РИТ уже давно и эффективно применяются, в настоящее время продолжают работы по исследованию различных аспектов

ВЭВ, поиску путей повышения эффективности и расширению границ применения РИТ, уменьшению себестоимости и массогабаритных показателей электроразрядного оборудования.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Для многих РИТ основным действующим фактором воздействия на объект обработки являются волны давления, генерируемые ВЭВ в жидкости. При этом все происходящие гидродинамические процессы можно разбить два этапа.

На первом этапе на объект обработки воздействует волна давления (далее волна сжатия), источником которой является заполненная плазмой полость канала разряда, образованная в результате электрического пробоя межэлектродного промежутка. Давление в канале значительно превышает давление в окружающей жидкости, из-за чего канал начинает расширяться. Образовавшаяся при этом волна сжатия и следующий за ней поток жидкости распространяются по всему объему рабочей жидкости [14].

На втором этапе волновое воздействие на объект осуществляется вследствие пульсации

парагазовой полости (ПГП). ПГП образуется после окончания всех электрических процессов в канале разряда, когда прекращается течение тока через межэлектродный промежуток, и характеризуется высокими внутренними температурой и давлением. Качественно процесс ее динамики можно описать следующим образом. За счет давления в ПГП, которое значительно выше давления окружающей жидкости, ПГП начинает расширяться, действуя на окружающую жидкость как подвижный поршень, излучающий волну давления. При расширении ПГП ее внутреннее давление падает ниже уровня давления окружающей среды, вследствие чего рост ПГП прекращается и начинается ее уменьшение до определенного размера, после чего возможен ее повторный рост. Такие пульсации ПГП в зависимости от энергии импульса при единичном разряде в жидкости могут происходить несколько раз, причем для каждой последующей пульсации характерно уменьшение энергетике по сравнению с предыдущей [15]. Вполне естественно, что повышение энергетике ПГП приводит к соответствующему увеличению амплитудных значений пульсаций, временного промежутка между отдельными импульсами (периода пульсации ПГП) и времени действия ПГП. Одним из способов оценки энергетических параметров и действия ПГП является измерение периода ее пульсации.

Вышеописанное комплексное волновое воздействие повышает эффективность РИТ и является их значительным преимуществом, а соответственно, его исследование представляет собой актуальную научную задачу. Так, авторы [16] видят перспективу использования такого многоволнового воздействия в медицине. Исследованию волны сжатия первого этапа посвящены работы [17, 18], а пульсации ПГП изучались в [16, 19–21].

Особенностью некоторых РИТ является их использование в условиях ограниченного объема, при этом довольно часто расстояние от оси канала разряда до твердой стенки не превышает пятикратный радиус образовавшейся ПГП. В основном ограниченный объем не влияет на формирование первой волны давления. Это связано с тем, что ее формирование происходит во время первого полупериода разрядного тока, продолжительность которого в большинстве случаев исключает возможность воздействия отраженных волн давления на динамику канала разряда, при этом давление в канале разряда может составлять сотни мегапаскаль. В свою очередь ограниченный объем оказывает значительное влияние на динамику ПГП [22]. Известно, что период пульсации ПГП во время

ВЭВ в открытом объеме жидкости может достигать более 10 мс (так, период пульсации при свободном ВЭВ с запасенной энергией 600 Дж составляет 13,3 мс [23]). В то же время теоретические исследования пульсации парагазовой полости в ограниченном объеме при электрическом разряде накопленной энергии 4,5 кДж в жидкости показали, что в этом случае период пульсации не превышает 1 мс и зависит от количества пробегов волн давления между цилиндрической стенкой разрядной камеры и поверхностью канала разряда, а впоследствии – парагазовой полости [22]. Таким образом, период пульсации ПГП определяется взаимодействием генерированных в жидкости волн давления со стенками разрядной камеры и поверхностью ПГП. Соответственно период пульсации парагазовой полости зависит от радиуса разрядной камеры и значительно меньше в ограниченном объеме по сравнению с безграничным.

Исследованию гидродинамических послеразрядных процессов в замкнутых камерах посвящено значительное количество работ. Так, в работе [19] проведенные экспериментальные исследования позволили определить влияние накопленной в конденсаторах энергии и длины межэлектродного промежутка на развитие ПГП в разрядной камере размерами 500×500×500 мм. В цилиндрической камере внутренним диаметром 100 мм проводились экспериментальные исследования, которые позволили установить влияние гидростатического давления и зарядного напряжения на после-разрядные гидродинамические процессы [21]. Однако в работах не выполнялось сравнение характеристик развития ПГП в условиях ограниченного и неограниченного объема и не рассматривались различные способы осуществления ВЭВ в жидкости.

В настоящее время одним из перспективных направлений усовершенствования РИТ является использование высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) – осуществление ВЭВ с введением в межэлектродный промежуток специального вещества (экзотермической смеси – ЭС), способного к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений в плазменном канале. Использование ВЭХВ позволяет снизить стоимость и массогабаритные показатели высоковольтного электрооборудования, сохраняя и даже несколько повышая уровень силового и энергетического воздействия [14, 23]. Так, в [23] показано, что использование ВЭХВ приводит к увеличению периода пульсации ПГП и, соответственно, к повышению количества введенной в ПГП энергии в случае неограниченного объема

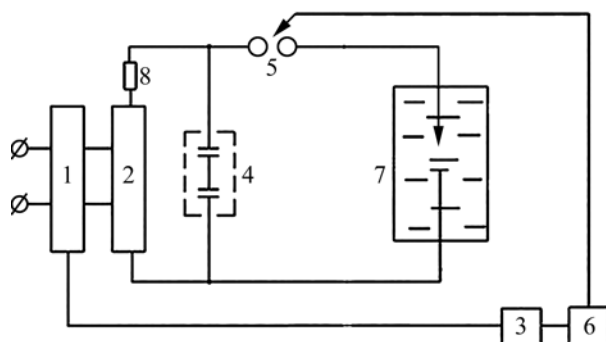
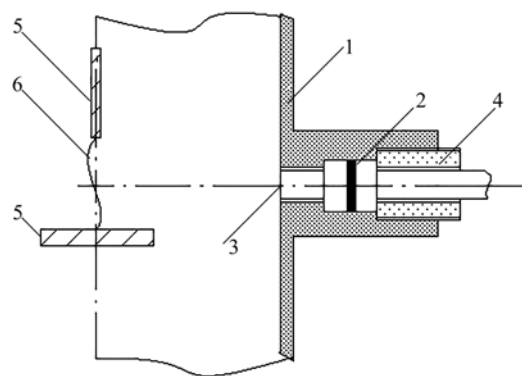


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: 1 – регулировочный трансформатор РТТМ 25/0,5; 2 – высоковольтный выпрямитель-трансформатор ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – разрядная камера; 8 – зарядное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



(a)



(б)

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

жидкости. Однако в этой работе отсутствуют результаты для ограниченного объема.

Исходя из всего вышеприведенного цель данной работы – оценить влияние ограниченного объема на гидродинамические послеразрядные процессы при ВЭВ в жидкости и исследовать в этих условиях динамику ПГП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1), позволяющем одновременно регистрировать временные зависимости электрических (разрядный ток и напряжение на разрядном промежутке) и гидродинамических (давление) параметров. По функциональности его можно разделить на три части: энергетическую, технологическую и измерительную.

Энергетическая часть стенда позволяет с помощью регулировочного трансформатора (1), выпрямителя-трансформатора (2) и зарядного сопротивления (8) зарядить батарею импульсных конденсаторов (4) до требуемого значения высоковольтного напряжения (свыше 1 кВ). После достижения требуемого напряжения с пульта управления (3) с помощью блока поджига (6) коммутируется воздушный разрядник (5), что ведет к выделению электрической энергии в

электродной системе, расположенной в цилиндрической разрядной камере (7) с замкнутым объемом жидкости $0,015 \text{ м}^3$ и внутренним диаметром 164 мм, относящейся к технологической части стенда. Электродная система электрически и механически соединена с верхним фланцем разрядной камеры. Боковая поверхность камеры содержит специальные отверстия для установки оснастки с волноводным датчиком давления.

В ходе экспериментальных исследований регистрировались временные профили волны давления, разрядного тока, напряжения между электродами электродной системы во время разряда.

Измерение разрядного тока проводилось с помощью омического коаксиального шунта [24]. Калибровка шунта выполнялась путем измерения его сопротивления и проверялась по методике [24]. Изменение напряжения между электродами фиксировали с помощью делителя напряжения типа PVM-2 компании NorthStar с коэффициентом деления 1:1000.

Для измерения параметров волны давления использовался волноводный пьезоэлектрический датчик импульсного давления типа ДТХ-1 [25]. Он закреплялся в экваториальной плоскости к каналу разряда. Общий вид установленного датчика давления и схема его крепления приведены на рис. 2.

Таблица 1. Параметры режимов исследований

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

Регистрация сигналов измерительных зондов осуществлялась с помощью цифрового четырехканального осциллографа OWON XDS 3104E (электрические процессы в канале разряда) и четырехканального цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024B (пульсация парогововой полости). Потребность в двух осциллографах возникла в связи с большой разницей во время регистрации между двумя этими процессами – продолжительность электрических процессов в канале разряда составляет десятки микросекунд, в то время как продолжительность пульсации парогововой полости – несколько миллисекунд.

В экспериментах изменялась накопленная электрическая энергия (W_0) от 203 до 458 Дж за счет изменения зарядного напряжения (U_0) от 20 до 30 кВ, параметры режимов представлены в табл. 1.

Другие параметры разрядного контура в ходе экспериментальных исследований оставались неизменными: емкость конденсаторной батареи (C) – 1,017 мкФ; индуктивность разрядного контура (L) – 4,122 мкГн; сопротивление разрядного контура (R) – 0,18 Ом.

При ВЭХВ в качестве ЭС была использована водонаполненная суспензия аммиачной селитры (окислителя) и алюминиевого порошка (горючего) [26–28] в соотношении 40 и 60% соответственно, что дает наибольшее выделение энергии при ее сгорании [23]. Масса ЭС варьировалась в диапазоне от 0,1 до 0,45 г. Длина патрона с ЭС (l) – 0,03 м.

В работе сравнивались характеристики ВЭХВ и инициирующего электрического взрыва проводника (ЭВП) малого диаметра, являющегося идеализированным случаем высоковольтного электрического взрыва в жидкости за счет приложения напряжения между электродами электродной системы. ЭВП позволяет воспроизвести динамику одиночного проводящего цилиндрического канала в жидкости при стабилизации длины канала разряда на уровне межэлектродного расстояния, а процесс выделения накопленной энергии осуществить с малыми предпробойными потерями [29]. При ЭВП использовался медный проводник диаметром 0,09 мм. Параметры разрядного контура при ВЭХВ и ЭВП были идентичны, а длина патрона из ВЭХВ была равна длине проводника. Для сравнения были

получены результаты при оптимальной по амплитуде первой волны сжатия длине инициирующего проводника, которая рассчитывалась согласно выражению (1) [30]:

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

где r – расстояние от оси канала разряда до точки измерения волны давления, м; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление разрядного контура; $W_0 = 0,5CU_0^2$ – накопленная энергия, Дж; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; L – индуктивность разрядного контура, Гн; U_0 – напряжение пробоя, В (для случая ЭВП значение напряжения пробоя равно значению зарядного напряжения); A – искровая постоянная ($A = 0,25 \times 10^5 \text{ В с/м}^2$ – для инициирующего ЭВП).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПГП В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЭХВ И ЭВП

Взаимосвязь между периодом пульсации ПГП, введенной в него энергией и параметрами среды описывается формулой Виллиса (2) [31]:

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

где P_0 – гидростатическое давление на глубине пульсации ПГП, Па; ρ – плотность среды, кг/м^3 ; T_n – период пульсации ПГП, с; W_B – энергия, которая была выделена в канале разряда и пошла на развитие ПГП, Дж.

В ходе экспериментальных исследований были получены данные по динамике ПГП (отдельные осциллограммы приведены на рис. 3), а именно по периоду пульсации ПГП. В работе рассматривались два способа ввода энергии. Первый – для ЭВП, когда в канале выделяется часть накопленной в конденсаторе энергии. Второй способ – при ВЭХВ, когда в канале выделяется как накопленная в конденсаторе энергия, так и дополнительно химическая энергия сгорания экзотермической смеси.

На рис. 4 представлены результаты исследования периода первой пульсации парогововой полости.

Анализ результатов (рис. 4) показывает преимущество ВЭХВ в сравнении с инициирующим ЭВП. Так, сравнение ВЭХВ и электрического взрыва инициирующего проводника длиной 30 мм демонстрирует, что период первой

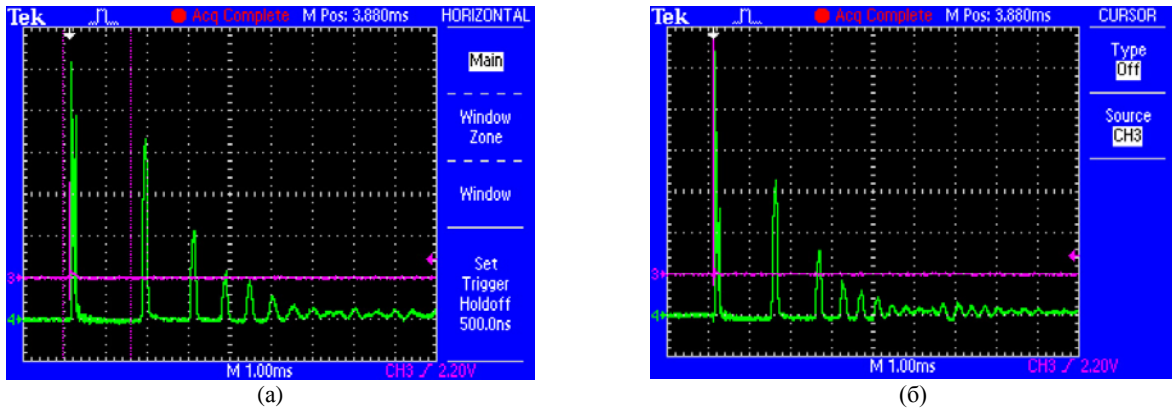


Рис. 3. Осциллограммы пульсации ПГП для разных способов инициирования при зарядном напряжении 27,5 кВ: (а) – ВЭХВ, масса ЭС – 0,3 г; (б) – ЭВП тонкого инициирующего проводника (длина проводника оптимальная).

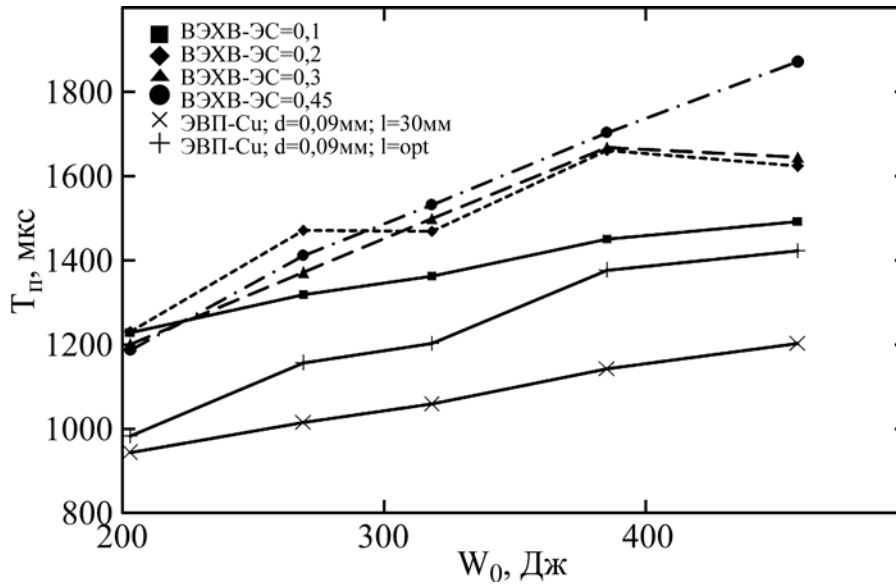


Рис. 4. Период первой пульсации ПГП в зависимости от способа инициирования ВЭВ.

пульсации при ВЭХВ больше до 55% (в зависимости от начальных параметров экспериментального режима). Когда ЭВП производился на оптимальной по амплитуде волне давления длине, то в этом случае период первой пульсации при ВЭХВ больше более чем на 30%.

Используя данные по пульсации (рис. 4) и формулу Виллиса (2), можно сравнить ВЭХВ и ЭВП по энергии, которая была введена в парогазовую полость. Известно [22], что в ограниченном объеме на период пульсации ПГП влияют гидродинамические процессы отражения волн давления от объектов (стенки камеры, элементы конструкции и электродной системы) и близость стенок камеры. В нашем случае остаются неизменными внутренняя геометрия разрядной камеры и начальные параметры рабочей среды – воды. Сделаем предположение о замене составляющей $(1,14\rho^{1/2} / P_0^{5/6})$ в (2) одним коэффициентом K_{ks} , преобразуя выражение (2) в (3).

$$T_n = K_{ks} W_B^{1/3}. \quad (3)$$

Примем допущение, что K_{ks} имеет одно и то же значение как в случае ВЭХВ, так и в случае ЭВП. Таким образом, в случае ЭВП выражение (3) запишется в виде (4), а ВЭХВ – в виде (5).

$$T_{n_ЭВП} = K_{ks} W_{B_ЭВП}^{1/3}. \quad (4)$$

$$T_{n_ВЭХВ} = K_{ks} W_{B_ВЭХВ}^{1/3}. \quad (5)$$

Используя (4) и (5), мы можем определить коэффициент K_E (6), который позволяет сравнить энергию, которая пошла на развитие ПГП в случае ЭВП ($W_{B_ЭВП}$) и ВЭХВ ($W_{B_ВЭХВ}$). Результаты расчетов приведены на рис. 5.

$$K_E = \frac{W_{B_ВЭХВ}}{W_{B_ЭВП}} = \frac{T_{n_ВЭХВ}^3}{T_{n_ЭВП}^3}. \quad (6)$$

Анализ результатов (рис. 5) показывает, что при прочих равных параметрах использование ВЭХВ позволяет увеличить энергию, которая была введена в ПГП, до 3,75 раз (в зависимости от режима ВЭХВ) по сравнению с ЭВП длиной 30 мм или до 2,2 раз при ЭВП на оптимальной по амплитуде волны давления длине проводника.

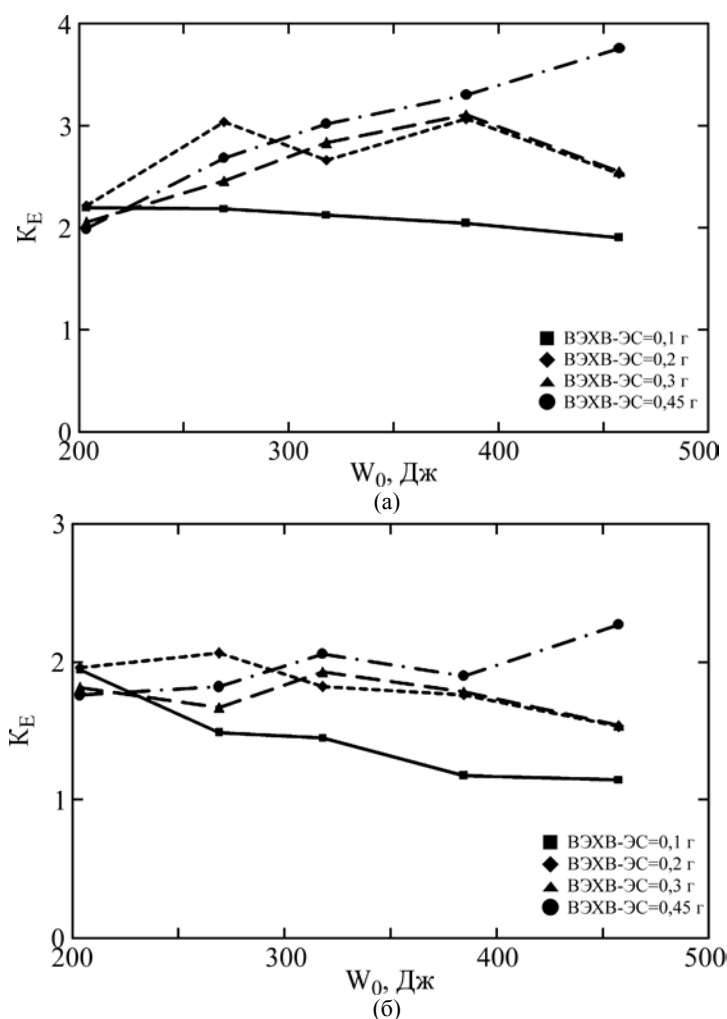


Рис. 5. Сравнение энергий, которые были введены в ПГП при ВЭХВ и при ЭВП: (а) – ЭВП, длина проводника 30 мм; (б) ЭВП – длина проводника, оптимальная по амплитуде волны давления.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА НА ПОСЛЕРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭВП

При ЭВП и ВЭХВ только часть энергии, которая выделилась в канале разряда, идет на развитие ПГП. И если для ЭВП, когда в канал разряда выделяется часть накопившейся энергии в конденсаторах, эту долю энергии можно подсчитать, то для ВЭХВ это сделать уже довольно проблематично – в этом случае в канал разряда выделяется как накопленная в конденсаторе электрическая энергия, так и химическая энергия сгорания определенной части ЭС. Поэтому при дальнейшем анализе влияния ограниченного объема на послеразрядные гидродинамические процессы мы будем ориентироваться только на ЭВП.

Для оценки влияния ограниченного объема на послеразрядные процессы при ЭВП с помощью формулы Виллиса (2) найдем период пульсации ПГП при ЭВП, но в неограниченном объеме. При расчетах считаем, что суммарная энергия, выделенная в канале разряда, неизменна как для ограниченного, так и для неограниченного

объема. Тогда энергия, которая была затрачена на развитие ПГП (W_B), может быть найдена по выражениям (7)–(9) [31]. После определения W_B по (2) выполняется расчет периода пульсаций ПГП при ЭВП в неограниченном объеме. В расчетах плотность жидкости – 1000 кг/м³, давление равнялось атмосферному – 101325 Па; значения $i(t)$ и $u(t)$ определены в ходе экспериментальных исследований. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

$$W_B = W_{F_ЭВП} \left[0,26 \exp\left(-\frac{2}{3}\beta\right) + 0,14 \right], \quad (7)$$

$$\beta = \left(\frac{W_{F_ЭВП}}{P_0} \right)^{1/3} \times \frac{1}{l}, \quad (8)$$

$$W_{F_ЭВП} = \int_0^{t_1} i(t)u(t) dt, \quad (9)$$

где $W_{F_ЭВП}$ – энергия, которая выделилась в канале разряда; β – безразмерный обобщенный параметр, который характеризует форму ПГП; $i(t)$ – временной профиль разрядного тока, А; $u(t)$ – временной профиль напряжения на разрядном промежутке, В; t_1 – длительность

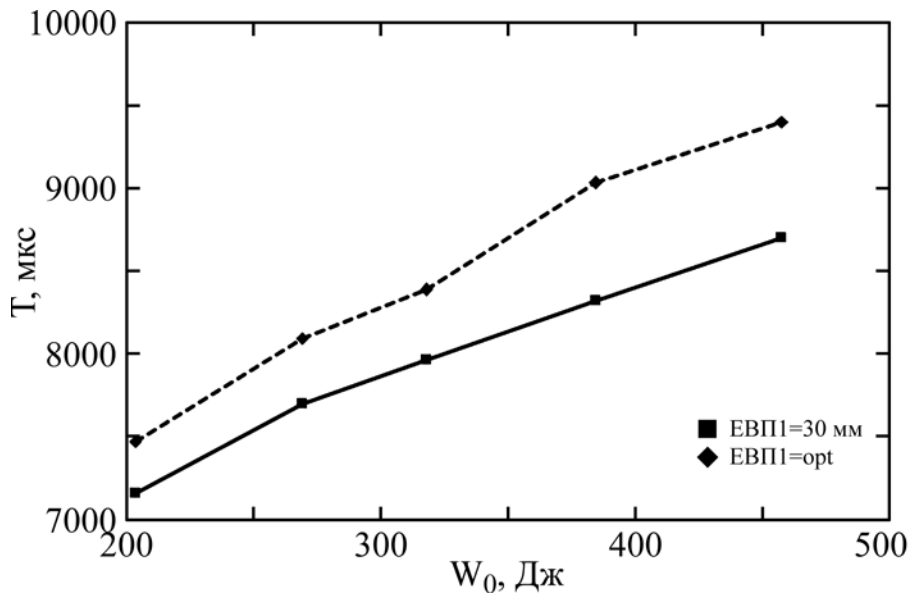


Рис. 6. Расчетный период первой пульсации ППП при электрическом взрыве тонкого инициирующего проводника в неограниченном объеме.

Таблица 2. Квазистатическое давление и амплитуда первой волны сжатия

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W_0 , Дж	≈203	≈269	≈318	≈385	≈458	≈203	≈269	≈318	≈385	≈458
l_0 , м	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,037	0,04	0,041	0,044	0,045
P_{max} , МПа	19,93	22,77	23,76	26,17	27,19	23,62	29,15	30,43	34,26	39,79
P_k , МПа	1,325	1,32	1,302	1,244	1,228	1,335	1,203	1,195	1,108	1,118

протекания электрических процессов, с; l – длина разрядного (межэлектродного) промежутка, м.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 4 и 6, показывает, что инициирующий ЭВП в неограниченном объеме характеризуется пульсацией парогазовой полости с периодом от 7,1 до 9,4 мс (в зависимости от параметров разрядной цепи). В ограниченном объеме при идентичных начальных условиях наблюдается уменьшение периода пульсации ППП до 7,5 раз (цилиндрическая камера объемом 0,015 м³ и внутренним диаметром 0,164 м).

Известно, что пульсация ППП оказывает определяющее влияние на формирование полей давления в жидкости в замкнутой разрядной камере, то есть в ограниченном объеме. Одновременно с этим анализ выражения (2) позволил предположить, что в этом случае на процессы развития ППП будут влиять динамические изменения плотности жидкости, заполняющей разрядную камеру, и поле давления, сформированное волнами сжатия, разрежения и отражения. Примем допущение, что воду можно считать несжимаемой жидкостью.

Глядя на вышеизложенное, мы можем констатировать, что на изменение гидродинамических процессов послеразрядной стадии в ограниченных объемах по сравнению с неограниченными, а именно на уменьшение периода пульсации, влияет динамическое поле давления

внутри камеры. Примем предположение о замене во время первой пульсации такого динамического давления квазистатическим давлением в замкнутом объеме P_k (далее квазистатическое давление). Для его определения воспользуемся выражениями (2) и (7), которые после преобразования сформируют систему уравнений зависимостей $W_B(P_k)$ (10). Плотность жидкости была принята 1000 кг/м³, значения T_n , $W_{F_ЭВП}$ получены в ходе экспериментальных исследований.

$$\begin{cases} W_B = W_{F_ЭВП} \left[0,26 \exp\left(-\frac{2}{3} \times \left(\left(\frac{W_{F_ЭВП}}{P_k} \right)^{1/3} \times \frac{1}{l} \right) + 0,14 \right) \right] \\ W_B = \left(\frac{P_k^{5/6} T_n}{1,14 \rho^{1/2}} \right)^3 \end{cases} \quad (10)$$

Для решения системы уравнений (10) использовался графический метод. Расчеты проводились для всех экспериментальных режимов с длиной проводника 30 мм и при оптимальной длине проводника по амплитуде волн давления. Результаты расчетов квазистатического давления (P_k) приведены в табл. 2. В ней же представлены экспериментально полученные при ЭВП амплитуды первой волны сжатия (P_{max}) (рис. 7).

Анализ полученных результатов показывает, что при ЭВП между P_k и P_{max} в рассматриваемом диапазоне параметров существует взаимосвязь. Выполненный с помощью стандартной функции MS Excel (=КОРРЕЛ) корреляционный анализ

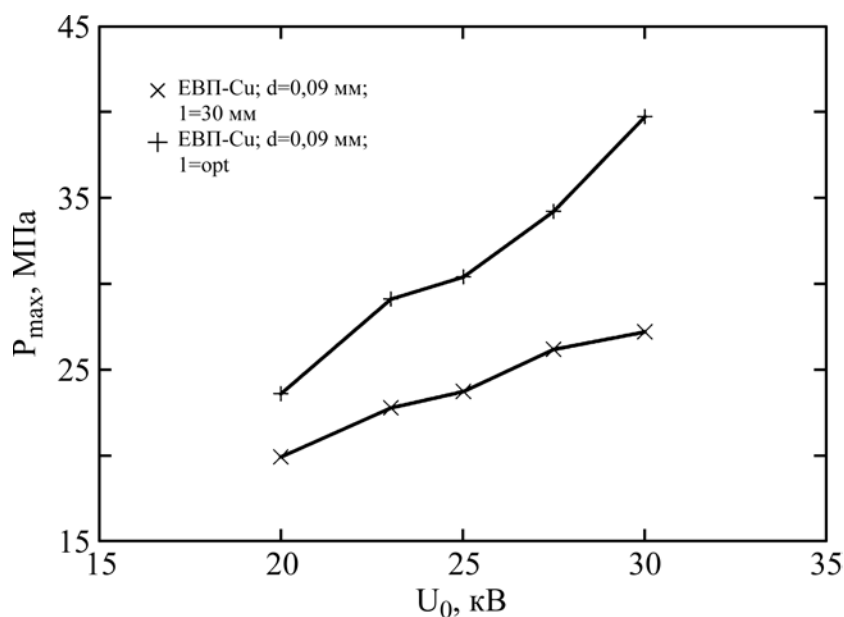


Рис. 7. Амплитуда первой волны сжатия при ЭВП на стенке разрядной камеры.

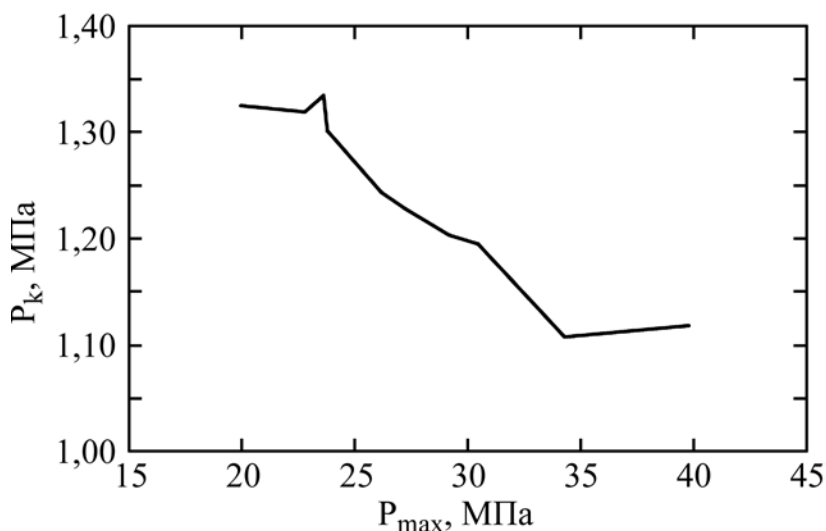


Рис. 8. Зависимость квазистатического давления от амплитуды первой волны сжатия при ЭВП.

показал наличие очень сильной отрицательной (коэффициент корреляции – 0,944) связи между этими параметрами. С физической точки зрения это можно объяснить следующим образом. Согласно данным работы [22], определяющее влияние на формирование поля давления в жидкости в замкнутой разрядной камере (а соответственно, и на квазистатическое гидродинамическое давление в ней) оказывает пульсация ПГП. В свою очередь период пульсации в этих условиях определяется взаимодействием волн давления со стенками разрядной камеры и поверхностью ПГП. Такое взаимодействие отраженных от стенки камеры волн с поверхностью ПГП является причиной уменьшения периода пульсации ПГП. В то же время увеличение амплитуды первой волны сжатия приводит к повышению значения отраженных от стенки камеры волн давления. Это, соответственно, влияет на период пульсации (а также радиус ПГП), уменьшая его, что, в свою очередь,

приводит к уменьшению квазистатического гидродинамического давления в жидкости в ограниченном объеме.

Качественным подтверждением описанной выше физической картины является вид зависимости, которая приведена на рис. 8.

В дальнейшем авторы статьи планируют подробнее остановиться на установлении более четкой взаимосвязи между геометрическими параметрами замкнутой среды, энергетическими параметрами ПГП и начальными параметрами разрядного контура.

ВЫВОДЫ

По результатам этой работы можно сделать следующие выводы:

- экспериментальное исследование динамики гидродинамических послеразрядных процессов показало преимущество ВЭХВ в сравнении с инициирующим ЭВП – период пульсации ПГП

при ВЭХВ больше до 55%, таким образом, использование ВЭХВ позволяет увеличить энергию, которая была введена в ППП, до 3,75 раза в сравнении с ЭВП;

– период пульсации ППП при электрическом взрыве инициирующего проводника в ограниченном объеме разрядной камеры уменьшается до 7,5 раза по сравнению с инициирующим ЭВП в неограниченном пространстве при тех же начальных условиях;

– предложена методика расчета квазистатического давления в ограниченном объеме с фиксированными геометрическими параметрами в результате электрического взрыва. Отмечена взаимосвязь определенного квазистатического давления с амплитудой генерированной первой волны сжатия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Кривицкий, Е. В., Шамко, В. В., *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
- Liang Qiao, Xiaobing Zhang, Bing Yan, Yang Liu, et al., An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum, *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 9, art. ID 095109. <https://doi.org/10.1063/5.0064322>
- 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
- Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., Milicevic, B., et al., High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste, *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 8, p. 4481. <https://doi.org/10.3390/su13084481>
- 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>
- Mitsuhiko, Sato, Takashi, Sakugawa, Tomohiko, Yamashita, Nushin, Hosano, et al., 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>
- Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K., Loncaric, A., et al., Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions, *Plants*, 2021, vol. 10, no. 10, p. 2137. <https://doi.org/10.3390/plants10102137>
- 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, art. ID 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>
- Kern, Lee, Kyoung-Jae, Chung, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, art. ID 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
- 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>
- Yan Bingnana, Zhou Jing, Zhao Liang, Liu Chongxin, et al., 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.
- Zhixiang Cai, Hui Zhang, Kerou Liu, Yufei Chen, et al., Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity, *Energies*, 2020, vol. 13, art. ID 5432. <https://doi.org/10.3390/en13205432>
- Khvoshchan, O.V. and Smirnov, A.P., Dependence of energy processes of high-voltage electric-discharge borehole complexes "SKIF" on characteristics of loading, *Techn. Electrodynam.*, 2022, no. 1, p. 58. <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
- Barbashova, G.A. and Vovchenko, A.I., Influence of the geometry of closed cylinder on hydrodynamic processes at a high-voltage electrochemical explosion, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, no. 2, p. 176. <https://doi.org/10.3103/S1068375516020034>
- Курец, В.И., Соловьев, М.А., Жучков, А.И., Барская, А.В., *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 272 с.
- Oshita, D., Hosano, H., Okuka, Y., Miyamoto, Y., et al., Characteristic of cavitation bubbles and shock waves generated by pulsed electric discharges with different voltages. *2012 IEEE Int. Power Modulator and High Voltage Conf. (IPMHVC)*, San Diego, CA, USA, 2012, p. 102. doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518690.
- 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>.
- Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Taftai, E.I., Khvoshchan, 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>

19. Yong Zhao, Yi Liu, He Zhang, Yi-Jia Ren, et al., Analysis of the bubble-pulsation process of underwater high current pulsed discharge. *J. Appl. Phys*, 2022, vol. 131, art. ID 083301. <https://doi.org/10.1063/5.0079162>
20. Minglei Shan, Bingyan Chen, Cheng Yao, Qingbang Han, et al., Electric characteristic and cavitation bubble dynamics using underwater pulsed discharge, *Plasma Sci. Technol.*, vol. 21, no. 7, art. ID 074002. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab0b62>.
21. Dong Yan, Decun Bian, Jinchang Zhao, Zhiqiang Yin, et al., Efficiency analysis of bubble pulsation formed by high-voltage discharge in nonfree field water, *Adv. Mechan. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 8, p. 1. <https://doi.org/10.1177/1687814016663391>.
22. Kosenkov, V.M., Effect of a vapor-gas cavity on the pressure field in a limited-volume discharge chamber with rigid walls, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 2, p. 197. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020046>.
23. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
24. 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. техніч. унів. «ХПИ»*, 2016, № 14, с. 34.
25. Zhekul, V.G., Smirnov, O.P., Taftaj, E.I., Khvoshchan, et al., Piezoelectric waveguide sensor for measuring pulse pressure in closed liquid volumes at high voltage electric discharge, *Electr. Eng. Electromechan.*, 2017, no. 5, p. 55. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.09>
26. Vovchenko, A.I., Demidenko, L.Yu., Kozyrev, S.S. and Ovchinnikova, L.E., High voltage electrochemical explosion in discharge-pulse technologies, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 6, p. 731. <https://doi.org/10.3103/S106837552206014X>
27. Rizun, 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.
28. 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.
29. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
30. Шамко, В.В., Кучеренко, В.В., *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. 52 с.
31. 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. 3, p. 518. <https://doi.org/10.3103/S1068375518050113>

Summary

The influence of a limited volume on the hydrodynamic post-discharge processes during a high-voltage electric explosion (HVVE) and an explosion of a thin initiating conductor (ETIC) in a liquid is estimated, and the dynamics of a vapor-gas cavity (VGC) under those conditions is studied. Experimental studies have shown the advantage of the HVVE in comparison with the ETIC in terms of the energy contributed into the VGC expressed in an increase of the period of the VGC pulsation up to 55%. It is noted that with the ETIC in a limited volume of the discharge chamber, the period of pulsation of the VGC decreases up to 7.5 times compared to the ETIC in an unlimited space under the same initial conditions. A method for calculating the quasi-static pressure during an electric explosion in a limited volume with limited geometric parameters was proposed. The correlation between the calculated quasi-static pressure and the amplitude of the generated first compression wave is mentioned.

Keywords: wire electric explosion, high-voltage electric explosion, vapor-gas cavity, pulsation period, quasi-static pressure, limited volume