

PACS: 52.80.Wq, 52.90.+b

А.И. Вовченко, Л.Ю. Демиденко

МЕХАНИЗМ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

Статья поступила в редакцию 19 мая 2016 года

На основании экспериментальных исследований и теоретических оценок выявлен и установлен обобщенный безразмерный параметр γ , характеризующий основной механизм силового воздействия на объект обработки при высоковольтном электрическом разряде (ВЭР) в ограниченных замкнутых объемах в диапазонах изменения запасенной энергии накопителя от 250 до 1250 J и объемов камер $(0.58-2.0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Обосновано, что для ВЭР в ограниченных замкнутых объемах при абсолютных значениях обобщенного безразмерного параметра $\gamma \leq 0.75$ преобладающим силовым механизмом, воздействующим на объект обработки, является квазистатическое давление P_{ks} , абсолютная величина которого зависит от параметра γ , а именно P_{ks} уменьшается с ростом γ .

Ключевые слова: разрядно-импульсные технологии, высоковольтный электрический разряд, камера ограниченного объема, механизм импульсного нагружения объекта, волна сжатия, квазистатическое давление, парогазовая полость, датчик эффективности силового воздействия, прогиб пластины

На підставі експериментальних досліджень і теоретичного оцінювання виявлено і встановлено узагальнений безрозмірний параметр γ , що характеризує основний механізм силової дії на об'єкт обробки при високовольтному електричному розряді (ВЕР) в обмежених замкнутих об'ємах у діапазонах змінювання запасеної енергії накопичувача від 250 до 1250 J і об'ємів камер $(0.58-2.0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Обґрунтовано, що для ВЕР в обмежених замкнутих об'ємах за абсолютних значень узагальненого безрозмірного параметра $\gamma \leq 0.75$ переважним силовим механізмом, діючим на об'єкт обробки, є квазістатичний тиск P_{ks} , абсолютна величина якого залежить від параметра γ , а саме P_{ks} зменшується зі зростанням γ .

Ключові слова: розрядно-імпульсні технології, високовольтний електричний розряд, камера обмеженого об'єму, механізм імпульсного навантаження об'єкта, хвиля стиску, квазістатичний тиск, парогазова порожнина, датчик ефективності силової дії, прогин пластины

При использовании разрядно-импульсных технологий (РИТ) на базе ВЭР в жидкости, как правило, электрический разряд осуществляется либо в открытых камерах большого объема (условно назван «безграничный

объем»), либо в ограниченных замкнутых или частично замкнутых объемах жидкости [1–3]. При этом применяются две технологические схемы воздействия на обрабатываемый объект: высоковольтный разряд между двумя электродами и разряд с высоковольтного электрода на объект обработки. При ВЭР в «безграничных объемах» основными силовыми факторами воздействия на объект обработки являются волны сжатия как в канале разряда, так и в среде, и гидротоки жидкости в зависимости от взаимного расположения канала разряда и объекта обработки. Для случая ВЭР в ограниченных замкнутых объемах доленое участие силового воздействия (ударной волны, гидротока и квазистатического давления) на объект обработки, по мнению многих исследователей, изменяется в зависимости от объема камеры, расположения канала разряда внутри камеры, энергии ВЭР, времени выделения энергии и т.п. [3,4]. Однако закономерности этих изменений до конца не выяснены. Поэтому актуален вопрос исследования физического механизма импульсного нагружения объектов обработки при ВЭР в ограниченных объемах.

Изучение происходящих явлений при ВЭР в ограниченных замкнутых объемах имеет не только научный, но и практический интерес, поскольку от механизма воздействия на объект обработки зависит эффективность конкретных РИТ.

В свете изложенного цель настоящей работы состоит в выявлении и установлении на базе экспериментальных исследований обобщенных параметров, характеризующих основной механизм силового воздействия на объект обработки в РИТ при ВЭР в замкнутых ограниченных объемах.

Экспериментальные исследования проводили в цилиндрической разрядной камере (рис. 1) с внутренним диаметром 70 мм, длиной 500 мм и толщиной стенок 15 мм. Электродная система (типа «острие–острие с коаксиальным токоподводом») располагалась вдоль оси камеры и была смонтирована на съемной части (крышке) камеры. С целью устранения неустойчивости и повышения эффективности разряда применяли иницирование ВЭР микропроводником, для чего каждый из противоположных электродов обеспечивали возможностью фиксировать микропроводник.

В качестве объекта обработки и одновременно датчика эффективности силового воздействия использовали тонкую (толщина 0.75 мм) круглую (диаметр 25 мм) свободно деформируемую пластину (мембрану) из меди М1, жестко заземленную по контуру.

Для изменения объема разрядной камеры в диапазоне $(0.58–2.0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ внутрь цилиндрической разрядной камеры вставляли сменные вставки, с помощью которых изменяли объем. При этом расстояние от канала разряда до объекта обработки (мембраны) сохраняли постоянным для всех исследуемых камер. Об эффективности воздействия ВЭР на объект обработки при различных условиях судили по величине максимального

прогиба в центре круглой пластины, защемленной по контуру в устройствах крепления, которые, в свою очередь, герметично фиксировали на боковой и торцевой стенках камеры (рис. 1).

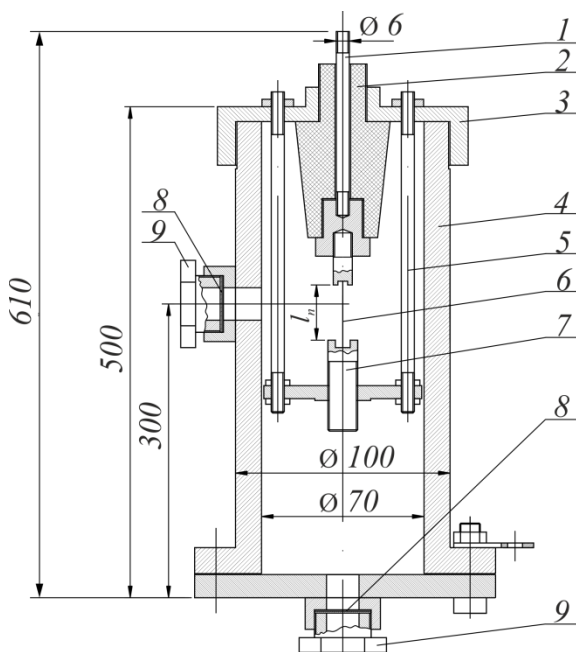


Рис. 1. Схема устройства разрядной камеры: 1 – потенциальный (плюсовой) электрод; 2 – изолятор; 3 – крышка камеры; 4 – корпус камеры; 5 – шпилька; 6 – микропроводник; 7 – минусовый электрод; 8 – объект обработки (пластина); 9 – фиксирование устройства крепления пластины

«безграничном объеме» соизмерим с объемом камеры. Максимальный радиус парогозовой полости a_m определяли из выражения [5]:

$$a_m = \alpha \left[0.26 \exp \left(-\frac{2 l P_0^{1/3}}{3 W_\tau^{1/3}} \right) + 0.14 \right]^\lambda, \quad (1)$$

где a_m – условный радиус, который имела бы ПГП при ВЭР с величиной выделившейся электрической энергии W_τ при ее пульсации в «безграничном объеме», м; α , λ – параметры, зависящие от геометрической формы ПГП; W_τ – выделившаяся электрическая энергия, величину которой определяли экспериментально по осциллограммам разрядного тока и напряжения, Дж; P_0 – гидростатическое давление, которое принимали равным атмосферному, Па; l – длина микропроводника (равна разрядному промежутку), м.

Наибольший интерес с практической точки зрения представляет максимальное давление на пластину, которое в зависимости от условий выделения энергии может определяться, как отмечалось выше, различными силовыми факторами. Согласно [3] в замкнутых камерах малого объема, соизмеримого с максимальным объемом послеразрядной парогозовой полости (ПГП) при ее пульсации в «безграничном объеме», механизм квазистатического давления (от развития ПГП) является основным, определяющим эффективность процесса деформирования.

Из условия обеспечения «малого объема» [3] для различных объемов разрядной камеры выбирали энергию ВЭР, при которой объем ПГП при ее свободном развитии в

При условии $W_\tau/l > 1 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-1}$ геометрической формой ПГП была в основном сфера [5], и для нее при $\lambda = 1/3$

$$\alpha = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{W_\tau}{P_0} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Представленные расчетные данные показывают, что для исследуемых разрядных камер выполняются условия «малого объема» для энергий ВЭР в диапазоне от 125 до 1000 J. При таких условиях можно предположить, что максимальное давление, действующее на пластину, характеризуется давлением сжатия жидкости, расширяющейся парогазовой полостью, т.е. квазистатическим давлением.

Таблица 1

Результаты расчета объема ПГП при ее свободном развитии

$W_0, \text{ J}$	125	250	400	500	750	1000
$W_\tau, \text{ J}$	118	178	282	312	420	605
$W_\tau/l, \text{ kJ/m}^{-1}$	3.9	6.2	9.4	12	17	23.5
$V_{\max} \cdot 10^{-3}, \text{ m}^3$	0.47	0.71	1.13	1.24	1.68	2.42

Для подтверждения вышеизложенного были проведены предварительные сравнительные эксперименты* в широком диапазоне энергий ВЭР в разрядной камере объемом $2.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ с измерением максимального прогиба двух пластин, расположенных на стенке камеры и на днище (рис. 1). Результаты показали, что с разбросом до 5% остаточный прогиб мембран одинаков.

В табл. 2 приведены усредненные значения максимальных прогибов пластин w_1 (на стенке камеры) и w_2 (на днище), полученные при разных энергиях ВЭР W_0 . Равенство максимальных прогибов мембран в торце и на стенке камеры, на взгляд авторов, подтверждает предположение о том, что основным силовым фактором в исследуемом диапазоне энергий и объеме камеры является квазистатическое давление, а вклад волны сжатия в работу деформации несущественный. В противном случае максимальный прогиб двух мембран был бы различный ввиду отличающихся более чем в 4 раза величин амплитуды волны сжатия соответственно на стенке камеры и ее торце [6].

В дальнейшем экспериментально исследовали влияние энергии ВЭР W_0 на величину относительного прогиба h/d пластины (где h – величина максимального прогиба, mm; d – диаметр отверстия матрицы (устройства

* В проведении экспериментальных исследований принимали участие ведущие инженеры ИИПТ НАН Украины А.Д. Блащенко, Е.К. Гнатенко, Е.П. Разменов.

крепления), mm) в закрытых камерах разных объемов. Изменение энергии W_0 достигали соответствующим изменением емкости конденсаторной батареи C , что позволяло поддерживать амплитуду волны сжатия, воздействующую на пластину на стенке камеры, практически неизменной во всем диапазоне изменения энергии W_0 [7]. При этом начальное напряжение U_0 оставалось постоянным: $U_0 = 20 \cdot 10^3$ V. Длина разрядного промежутка во всех случаях была $l = 3 \cdot 10^{-2}$ m.

Таблица 2

Усредненные значения максимальных прогибов пластин

W_0 , J	250	400	500	750	1000
w_1 , mm	2.40	2.82	3.00	3.22	3.44
w_2 , mm	2.50	2.80	3.02	3.20	3.44

Как уже отмечалось, оценку эффективности силового воздействия на объект обработки в камерах разных объемов проводили по относительным величинам прогиба, при этом число повторения опытов при постоянной величине энергии было не менее пяти.

Результаты проведенных экспериментов для камер разных объемов представлены на рис. 2 в виде зависимостей величины относительного прогиба пластины h/d от энергии емкостного накопителя W_0 . Из графиков видно, что с ростом энергии накопителя W_0 относительный прогиб увеличивается, что свидетельствует о повышении эффективности силового воздействия для камер всех объемов. Точно так же с уменьшением объема камеры эффективность силового воздействия при одной и той же запасенной энергии возрастает, что приводит к увеличению относительного прогиба пластины. Например, при $W_0 = 500$ J величина относительного прогиба $h/d = 0.17$ при $V = 1.6 \cdot 10^{-3}$ m³; 0.19 – при $V = 1.06 \cdot 10^{-3}$ m³ и 0.21 – при $V = 0.58 \cdot 10^{-3}$ m³.

В дальнейшем по результатам проведенных экспериментов для выбранного диапазона изменения энергии W_0 определяли влияние отношения объема камеры к объему парогазовой полости V_k/V_p (для удобства обозначим это отношение как обобщенный безразмерный параметр $\gamma = V_k/V_p$, где V_k – объем разрядной камеры, m³; V_p – объем парогазовой полости при ее свободном развитии, m³) на величину относительного прогиба пластины для камер разных объемов.

Полученные результаты представлены на рис. 3. Проведенная аппроксимация экспериментальных данных (обозначены точками) показана на рисунке степенной зависимостью, описываемой уравнением

$$h/d = 0.16\gamma^{-0.237}, \quad (3)$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0.972$.

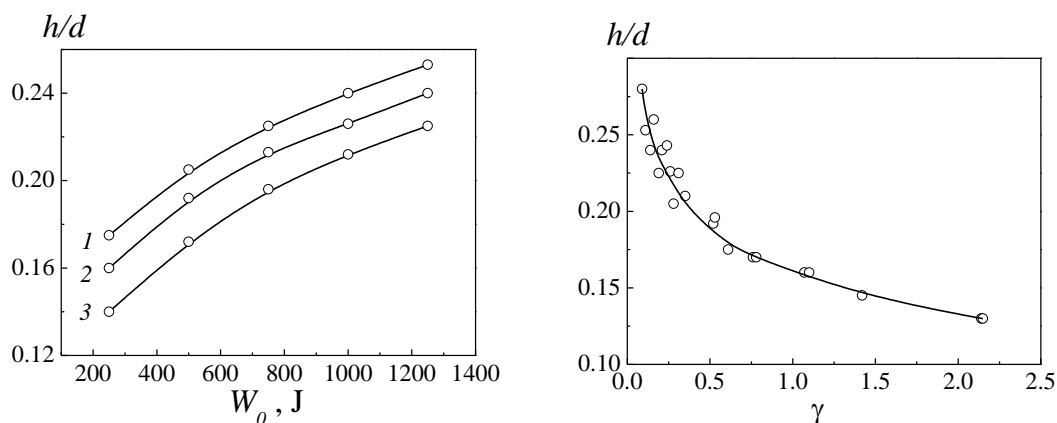


Рис. 2. Зависимость величины относительного прогиба пластины от энергии емкостного накопителя W_0 для камер различных объемов V , 10^{-3} м^3 : 1 – 0.58, 2 – 1.06, 3 – 1.6

Рис. 3. Зависимость относительного прогиба пластины от безразмерного обобщенного параметра $\gamma = V_k/V_p$

Анализ зависимости (рис. 3) показывает, что вначале с ростом безразмерного обобщенного параметра γ до значения $\gamma < 0.75$ относительный прогиб пластины достаточно интенсивно падает. При дальнейшем повышении параметра γ в диапазоне $\gamma > 0.75$ градиент изменения величины относительного прогиба h/d резко уменьшается. Так, при повышении γ в этом диапазоне более чем в 3.3 раза величина относительного прогиба h/d изменяется всего на 21%.

Это доказывает, что при малых значениях γ основным механизмом воздействия на объект обработки является квазистатическое давление, которое существенно превосходит амплитуду волны сжатия. С увеличением объема камеры и, следовательно, при возрастании γ давление от сжатия жидкости парогазовой полостью падает, и в процесс деформирования мембраны включается давление, создаваемое волной сжатия, особенно если расстояние от канала разряда до заготовки, как в нашем случае, остается постоянным. Поэтому дальнейший рост γ не приводит к существенному снижению величины деформации. Сказанное наглядно иллюстрируется табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения квазистатического давления P_{ks} и максимального давления от волны сжатия P_{max} в зависимости от величины γ

$W_0, \text{ J}$	1000					500			
γ	0.22	0.30	0.40	0.61	0.75	0.47	0.63	0.74	1.1
$P_{ks} \cdot 10^5, \text{ N/m}^2$	851	729	632	512	408	601	516	447	324
$P_{max} \cdot 10^5, \text{ N/m}^2$	212					185			

Оценку величины квазистатического давления проводили с использованием рекомендаций работы [4] из уравнения баланса энергии для случая, когда вся рассматриваемая энергия перейдет в потенциальную энергию сжатой жидкости.

При расчете максимальной амплитуды давления в волне сжатия использовали подход и соотношение, полученное в работе [7]:

$$P_{\max} = \frac{b_1(\Pi_k) \rho_1^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}} \text{ при } r \leq 2.5l. \quad (4)$$

Здесь r – расстояние от оси канала разряда до боковой стенки камеры (мембраны), равное 35 мм; ρ_1 – плотность жидкости, kg/m^3 ; L – индуктивность разрядного контура, Н; $b_1(\Pi_k)$ – коэффициент:

$$b_1(\Pi_k) \approx \Pi_k^{0.25}, \quad (5)$$

где Π_k – критерий подобия:

$$\Pi_k = \frac{Al}{U_0^2 \pi \sqrt{LC}}, \quad (6)$$

где A – искровая постоянная для разрядов, инициируемых микропроводником, равная $0.25 \cdot 10^5 \text{ V}^2 \cdot \text{s/m}^2$.

На основании экспериментальных данных и теоретических оценок делаем вывод о том, что величина γ может быть принята за обобщенный безразмерный параметр, характеризующий основной механизм силового воздействия при ВЭР в ограниченных объемах в диапазоне изменения запасенной энергии от 250 до 1250 Дж и объемов камер $(0.58\text{--}2.0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Выводы

1. Установлен обобщенный безразмерный параметр $\gamma = V_k/V_p$, характеризующий основной механизм силового воздействия на объект обработки в РИТ с ВЭР в ограниченных замкнутых объемах в рассматриваемых диапазонах объемов камер и запасенной энергии накопителя.

2. Обосновано, что для ВЭР в ограниченных замкнутых объемах при абсолютных значениях обобщенного безразмерного параметра $\gamma \leq 0.75$ преобладающим силовым механизмом, воздействующим на объект обработки, является квазистатическое давление P_{ks} . При этом абсолютная величина P_{ks} зависит от параметра γ , а именно P_{ks} уменьшается с ростом γ .

1. Н.В. Старков, ЭОМ **50**, № 1, 115 (2014).
2. Б.В. Мершин, Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий, Машиностроение, Ленинград (1985).

3. В.Н. Чачин, В.Л. Шадуя, А.Ю. Журавский, Г.И. Здор, Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер, Наука и техника, Минск (1985).
4. Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев, Электрогидравлический эффект в листовой штамповке, Наукова думка, Киев (1983).
5. А.И. Вовченко, В.В. Кучеренко, В.В. Шамко, ПМТФ № 6, 58 (1978).
6. Г.А. Барбашова, А.И. Вовченко, Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг, НТУ «ХП», Харьков, 2013, № 60 (1033), с. 31–37.
7. Е.В. Кривицкий, Динамика электровзрыва в жидкости, Наукова думка, Киев (1986).

A.I. Vovchenko, L.Yu. Demidenko

THE MECHANISM OF THE FORCE ACTION ON THE OBJECT TO BE PROCESSED BY ELECTRIC EXPLOSION IN LIMITED VOLUMES

The experimental tests and theoretical studies allow revealing and establishing of a generalized dimensionless parameter γ that characterizes the basic mechanism of the force action on the object to be processed during a high-voltage electric discharge (HVED) in confined limited volumes. The stored energy ranges from 250 to 1250 J and the volumes of chambers are $(0.58\text{--}2.0)\cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. It is proved that the prevailing force mechanism affecting the object to be processed is quasi-static pressure P_{ks} in the case of HVED in confined closed volumes at the absolute values of the generalized dimensionless parameter $\gamma \leq 75$. Thus, the absolute value of the quasi-static pressure depends on γ ; namely, P_{ks} decreases with increasing γ .

Keywords: discharge-pulse technology, high-voltage electric discharge, chamber of confined volume, pulse loading mechanism, compression wave, quasistatic pressure, steam-gas cavity, sensor of force impact efficiency, plate deflection

Fig. 1. Discharge chamber: 1 – potential (positive) electrode; 2 – insulator; 3 – cover; 4 – housing; 5 – stud; 6 – microconductor; 7 – negative electrode; 8 – the object being treated (plate); 9 – fixing of the plate mounting device

Fig. 2. Relative deflection of the plate vs. the storage capacitor energy W_0 at the varied chamber volume $V, \text{ m}^3$: 1 – $0.58\cdot 10^{-3}$, 2 – $1.06\cdot 10^{-3}$, 3 – $1.6\cdot 10^{-3}$

Fig. 3. Relative deflection of the plate vs. generalized dimensionless parameter $\gamma = V_k/V_p$