

Влияние геометрии замкнутого цилиндра на гидродинамические процессы, происходящие в нем при высоковольтном электрохимическом взрыве

Г. А. Барбашова, А. И. Вовченко

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpte@ipt.com.ua*

Рассматриваются характеристики канала разряда и окружающей его жидкости при высоковольтном электрохимическом взрыве в цилиндрическом замкнутом объеме с толстыми стенками; оценена их зависимость от размеров цилиндра.

Ключевые слова: высоковольтный электрохимический взрыв, давление в канале разряда и жидкости, замкнутый объем, математическое моделирование.

УДК 532:537

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время во многих отраслях промышленности применяются технологии, основанные на использовании эффектов, которые сопровождают электрический разряд в конденсированных и газообразных средах [1–3]. В разрядно-импульсных технологиях основными силовыми характеристиками являются волны сжатия и гидротоки, возникающие при пульсации парогазовой полости [4]. Для увеличения удельной энергетики применяют электрический разряд в химически активных конденсированных средах – высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ). В этом случае в межэлектродный промежуток вводятся вещества, способные к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений в образующемся плазменном канале. В результате таких превращений энергия, выделяющаяся при химических реакциях, суммируется с тепловой, получаемой при протекании электрического тока. ВЭХВ успешно используется, например, при разрушении негабаритов и сейсмоакустическом профилировании морского дна [5], а также в геотехническом строительстве (технология для устройства свай и анкеров [6]).

В ИИПТ НАН Украины был выполнен большой объем работ по экспериментальному исследованию процессов ВЭХВ в воде. Результаты обобщены в монографии [7]. При выполнении экспериментов экзотермическая смесь (ЭС), состоящая из порошка алюминия (диаметром $(1-3) \cdot 10^{-5}$ м), алюминиевой пудры (размер частиц около 1 мкм) и водного раствора окислителя, помещалась в промежуток между электродами. После подачи высокого напряжения происходит пробой ЭС, в результате чего образуются каналы (их может быть несколько) сквозной проводимости, форма которых стохастически изменяется от

разряда к разряду. Продолжительность прогрева алюминиевой пудры составляет порядка 10^{-8} с [8], то есть экзотермическая реакция начинается еще в процессе протекания электрического тока и, следовательно, влияет на характеристики жидкости в рабочей среде. Горение алюминиевого порошка составляет несколько миллисекунд [8], поэтому энергия, получаемая при окислении порошка, расходуется в основном на увеличение энергии парогазовой полости [7].

В работе [7] рассмотрено несколько вариантов состава ЭС и определено, что больше всего тепловой энергии выделяется в том случае, когда смесь состоит из 60% порошка алюминия (из них 15% составляет пудра) и 40% окислителя. Там же приводятся результаты работы сотрудников РХТУ им. Д.И. Менделеева по определению минимального давления (в зависимости от процентного содержания алюминия в ЭС), необходимого для самоподдерживающейся экзотермической реакции. В случае 60% содержания алюминия это давление должно быть равным не менее 22,5 МПа.

Приводимые в [7] результаты получены при электрическом разряде в камере больших размеров. Но интенсивное использование в настоящее время, как было отмечено выше, ВЭХВ, в частности в гидротехническом строительстве, предусматривает его выполнение в ограниченных, причем часто малых объемах. Поэтому актуален вопрос исследования гидродинамических процессов, сопровождающих ВЭХВ в таких объемах.

Цель настоящей работы – численное изучение влияния радиуса и длины цилиндрического замкнутого объема с толстыми стенками на гидродинамические процессы, происходящие в нем в начальный период ВЭХВ (до момента времени, равного 150 мкс) при вводе энергии в канал раз-

ряда в течение первого полупериода ВЭХВ, что соответствует времени, примерно равному 10^{-5} с.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

– цилиндрический замкнутый объем (разрядная камера) имеет жесткие неподвижные стенки и заполнен идеальной сжимаемой жидкостью;

– образующийся при ВЭХВ канал разряда находится на оси симметрии (в центре) цилиндрической камеры и в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, объем которого равен объему ЭС; канал заполнен идеальной низкотемпературной плазмой в период ввода энергии и идеальным газом после окончания ее ввода;

– алюминиевая пудра сгорает во время протекания электрического тока;

– пульсация парогазовой полости [4] и энергия, получаемая при сгорании порошка алюминия, не учитываются.

Соответствующая принятым допущениям математическая модель включает в себя:

– систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_r]}{\partial r} = 0; \end{cases}$$

– двучленное уравнение состояния [9]:

$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)] / [\rho(\kappa - 1)];$$

– уравнение баланса энергии в канале разряда [4]:

$$1/(\gamma - 1) d(p_a(t) \cdot V(t)) / dt + p_a(t) \cdot dV(t) / dt = N(t);$$

– условия динамической совместности на ударной волне [9]:

$$[\rho]D - [\rho v_n] = 0,$$

$$[\rho v_n]D - [\rho v_n^2 + p] = 0,$$

$$[\rho(\varepsilon + v_n^2/2)]D - [\rho v_n(\varepsilon + v_n^2/2) + p v_n] = 0;$$

– условие непротекания на неподвижной жесткой поверхности [9]:

$$v_n = 0.$$

Здесь t – время; r, z – цилиндрические координаты; v_r, v_z, v_n – радиальная, осевая и нормальная компоненты вектора скорости жидкости; p – давление; ρ – плотность; $e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2]$,

ε – удельная внутренняя энергия; $\kappa = 7,15$; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости; $\gamma = 1,26$, когда канал заполнен плазмой, $\gamma = 1,4$, если канал содержит газ; $p_a(t), V(t)$ – давление в канале разряда и его объем; $N(t)$ – вводимая в разрядный канал мощность; D – скорость ударной волны; $[f] = f_1 - f_2$; f_1, f_2 – значения функции слева и справа от ударной волны.

Начальные значения гидродинамических параметров равны своим значениям в невозмущенной среде при нормальных условиях. Задача решается конечноразностным методом Годунова [9]. Внутренней границей расчетной области является стенка канала разряда, а внешней границей – сначала ударная волна, а после достижения волной поверхности цилиндра – жесткая неподвижная стенка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Схема разрядной камеры показана на рис. 1. Здесь 1 – поверхность цилиндра; 2 – разрядный канал ВЭХВ в начальный момент времени.

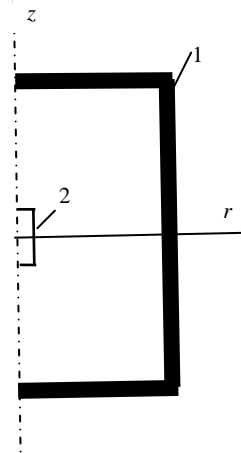


Рис. 1. Схема разрядной камеры: 1 – поверхность цилиндра; 2 – ЭС, помещаемая в межэлектродный промежуток.

В настоящей работе полагали, что вся запасаемая в емкостном накопителе энергия вводится в канал разряда в течение первого полупериода разряда. Мощность, выделяющуюся в канале разряда, моделировали равнобедренным треугольником [4]:

$$N(t) = \begin{cases} \frac{4 \cdot t}{\tau^2} \cdot E, & 0 \leq t \leq 0,5 \cdot \tau, \\ \frac{4 \cdot (\tau - t)}{\tau^2} \cdot E, & 0,5 \cdot \tau \leq t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau, \end{cases}$$

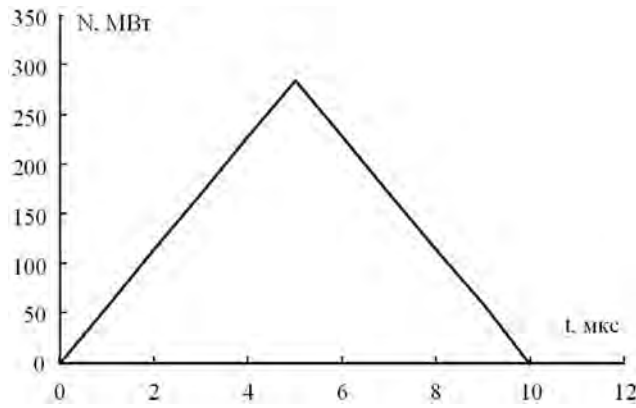


Рис. 2. Закон ввода энергии в канал разряда

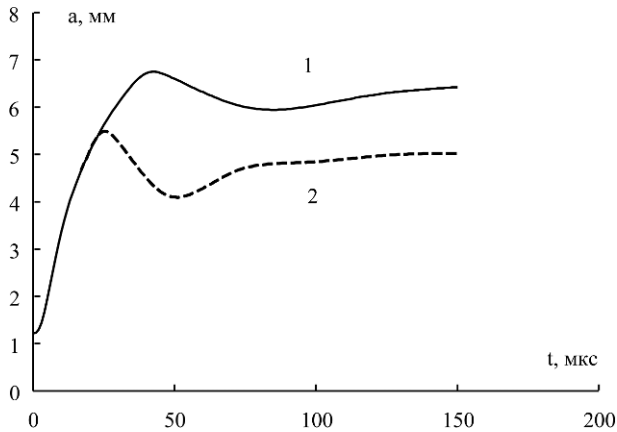


Рис. 3. Радиус канала разряда в плоскости срединного сечения канала при $L_K = 0,3$ м: 1 – $D_K = 0,07$ м; 2 – $D_K = 0,045$ м.

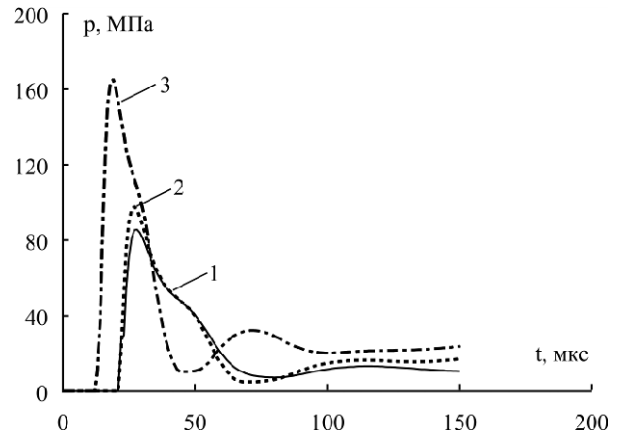


Рис. 4. Давление жидкости на стенку цилиндра в плоскости срединного сечения канала разряда, м: 1 – $L_K = 0,5$ и $D_K = 0,07$; 2 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,07$; 3 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,045$.

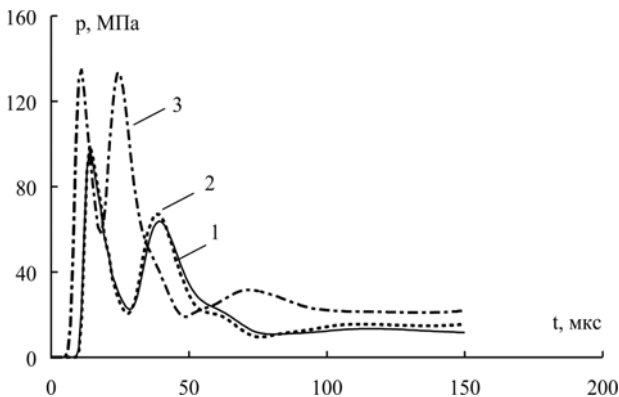


Рис. 5. Давление жидкости на расстоянии $D_K/4$ от оси симметрии цилиндра в плоскости срединного сечения канала разряда, м: 1 – $L_K = 0,5$ и $D_K = 0,07$; 2 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,07$; 3 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,045$.

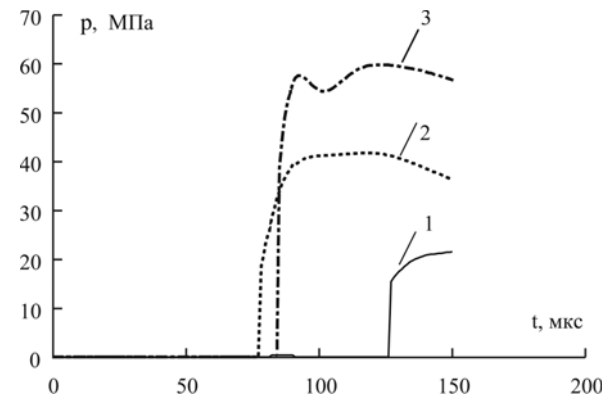


Рис. 6. Давление жидкости на торец цилиндра, м: 1 – $L_K = 0,5$ и $D_K = 0,07$; 2 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,07$; 3 – $L_K = 0,3$ и $D_K = 0,045$.

где

$$E = E_0 + E_{\sigma},$$

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C},$$

E – вводимая в канал энергия; $E_0 = C \cdot U_0^2 / 2$ – энергия емкостного накопителя; E_{σ} – энергия, получаемая при сгорании алюминиевой пудры; τ – длительность ввода энергии; U_0 – начальное напряжение; C – емкость конденсаторной батареи; L – индуктивность разрядной цепи.

В данном случае такое выполнение закона ввода мощности допустимо, поскольку при ВЭХВ, как было установлено в работе [7], форма

зависимости мощности от времени близка к равнобедренному треугольнику.

Вводимая энергия вычислялась при следующих параметрах электрической цепи [7]: $U_0 = 20$ кВ, $C = 3$ мкФ, $L = 3,4$ мкГн, длина межэлектродного промежутка $l = 0,04$ м. Величина энергии емкостного накопителя при этом равна $E_0 = 600$ Дж, время ее ввода $\tau = 10$ мкс. Энергия, получаемая при сгорании алюминиевой пудры, определялась следующим образом. Известно, что при сгорании 1 г алюминия выделяется примерно 31 кДж энергии, а масса используемой ЭС равна 0,3 г [7] и содержит 0,027 г пудры, поэтому

при сгорании пудры выделяется 837 Дж. Эту тепловую энергию суммируем с энергией емкостного накопителя. Получаемая при этом энергия возрастает в 2,4 раза по сравнению с энергией емкостного накопителя. Закон ввода мощности в канал разряда приведен на рис. 2.

Были выполнены расчеты в следующих цилиндрических разрядных камерах, м: длина цилиндра $L_K = 0,5$, диаметр $D_K = 0,07$; $L_K = 0,3$, $D_K = 0,07$ и $L_K = 0,3$, $D_K = 0,045$. Диаметр цилиндра с ЭС равнялся 1,2 мм.

После замыкания межэлектродного промежутка образуется заполненная плазмой полость – канал разряда. Давление в нем значительно выше давления в окружающей жидкости. Канал начинает расширяться. Образовавшаяся при этом волна сжатия и следующий за ней поток жидкости распространяются по всему объему разрядной камеры. Повышается давление в жидкости. После отражения от поверхности цилиндра волны давления приходят к каналу и сжимают его, повышая давление вещества в канале. Как только это давление превысит давление в окружающей среде, начинается новое расширение канала. И так далее.

Приведем некоторые полученные результаты.

Уменьшение длины разрядной камеры при $D_K = 0,07$ м ($L_K = 0,5$ м и $L_K = 0,3$ м) практически не влияет на гидродинамические и кинематические характеристики канала разряда в плоскости его срединного сечения. Разница между соответствующими величинами возрастает по мере удаления от этой плоскости. В частности, амплитуда давления жидкости на торец цилиндра возрастает почти в два раза.

Как и следовало ожидать, наиболее существенное изменение гидродинамических процессов в цилиндре происходит при уменьшении его диаметра (в частности, с $D_K = 0,07$ м на $D_K = 0,045$ м при $L_K = 0,3$ м). В этом случае в связи с более быстрым приходом к каналу разряда отраженных от боковой поверхности цилиндра волн давления уменьшается радиус канала разряда (амплитуда в плоскости срединного сечения меньше примерно на 20%). Скорость расширения канала и давление в нем совпадают до прихода отраженных волн, но существенно разнятся после этого (например, величины второго максимума давления разнятся в два раза). Существенно изменяется соответственно и картина течения жидкости.

Уменьшение диаметра цилиндра приводит к росту давления во всем замкнутом объеме. Давление жидкости, примыкающей к каналу, возрастает в 1,5–2 (при $z = 0$) раза, давление на стенку цилиндра в плоскости срединного сечения

канала – в 1,7 раза, а амплитуда давления на торец цилиндра – в 1,4 раза.

Сказанное выше иллюстрируют рис. 3–6.

На рис. 3 показана зависимость радиуса канала разряда в плоскости срединного сечения канала от времени при $L_K = 0,3$ м, а $D_K = 0,07$ м (кривая 1) и $D_K = 0,045$ м (кривая 2).

Давление жидкости на стенку цилиндра в плоскости срединного сечения канала разряда, на расстоянии $D_K/4$ в этой же плоскости и на торец цилиндра приведено на рис. 4, 5 и 6 соответственно. На всех рисунках кривая 1 получена при $L_K = 0,5$ м и $D_K = 0,07$ м, кривая 2 – при $L_K = 0,3$ м и $D_K = 0,07$ м, кривая 3 – при $L_K = 0,3$ м и $D_K = 0,045$ м.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что размеры разрядных камер существенно влияют на процессы, происходящие в них. Это необходимо учитывать при численном и физическом моделировании процессов ВЭХВ (особенно в разрядных камерах малых размеров).

В частности, при уменьшении длины цилиндра с $L_K = 0,5$ м на $L_K = 0,3$ м характер течения в плоскости срединного сечения канала разряда не меняется на протяжении рассматриваемого периода времени. Но амплитуда давления на торец цилиндра возрастает вдвое.

В заполненной водой цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, при уменьшении диаметра с 0,07 до 0,045 м давление жидкости в зависимости от области течения возрастает в 1,4–2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sizonenko O., Vovchenko A. Pulsed Discharge Technologies of Processing and Obtainment of Materials (review). *International virtual journal for science, technical and innovations for the industry*. 2014, (12), 41–44.
2. Grosu F.P., Bologa M.K. Thermoelectrohydrodynamic Methods of Energy Conversion. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2010, **46**(6), 582–588.
3. Electric Discharge Techniques for Synthesizing Carbon Nanomaterials and Features of their Structural State / A.D. Rud, N.I. Kuskova, V.Yu. Baklar, L.I. Ivaschuk, L.Z. Boguslavskii, I.M. Kiryan. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2011, **75**(11), 1435–1441.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
5. Rizun A.R., Posdeev V.A., Golen Yu.V. One-Shot Electrode Systems for High-Voltage Electrochemical Destruction of Natural and Artificial Lumps. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2010, **46** (3), 263–266.

6. Рытов С.А. Эффективность применения электро-разрядных технологий для устройства геотехнических конструкций. *Жилищное строительство*. 2010, (5),47–50.
7. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
8. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачёв В.С. *Горение порошкообразных металлов в активных средах*. М.: Наука, 1972. 294 с.
9. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

*Поступила 17.12.14
После доработки 29.12.14*

Summary

Pressure and other characteristics of the discharge channel and its surrounding liquid at a high-voltage electrochemical explosion in a cylindrical closed volume with thick walls are numerically investigated. The cylinder size influence on these characteristics is evaluated.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, pressure in the discharge channel and liquid, closed volume, mathematical modeling.