

**Г. А. БАРБАШОВА**, канд. физ.-мат. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**А. И. ВОВЧЕНКО**, д-р техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ**

С помощью численных методов исследовано давление в канале разряда и жидкости в цилиндрическом замкнутом объеме с толстыми стенками во время высоковольтного электрического разряда. Сделана оценка влияния энергии, которая образуется во время окисления алюминиевой пудры, на величину давления.

**Ключевые слова:** канал разряда, электрический разряд, давление.

### **1 Введение**

В некоторых разрядноимпульсных технологиях (например, разрушение негабаритов и сейсмоакустическое профилирование морского дна) для увеличения вводимой энергии используют электрический разряд в химически активных конденсированных средах – высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) [1]. ВЭХВ реализуется при введении в зону канала разряда веществ, способных к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений в плазменном канале. В результате таких превращений энергия, выделяющаяся при химических реакциях, суммируется с электрической, увеличивая интегральную энергию.

В монографии [1] авторами обобщены результаты экспериментальных исследований процессов ВЭХВ в воде. При выполнении экспериментов диэлектрическую трубочку заполняли экзотермической смесью (ЭС), в состав которой входили порошок алюминия, алюминиевая пудра и водный раствор окислителя. Трубочку помещали в промежуток между электродами. После подачи высокого напряжения происходил пробой ЭС, в результате чего образуется канал сквозной проводимости. Продолжительность прогрева алюминиевой пудры составляет порядка  $10^{-8}$  с [2], то есть экзотермическая реакция начинается еще в процессе ввода электрической энергии. Время горения используемых порошков составляет несколько миллисекунд [2], поэтому энергия, получаемая при окислении порошка, расходуется, в основном, на увеличение энергии парогазовой полости. В работе [1] 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 приводится зависимость давления в окружающей канал разряда жидкости, необходимого для самоподдерживающейся экзотермической реакции, от процентного содержания алюминия в ЭС. Эта зависимость получена сотрудниками РХТУ им. Д.И. Менделеева. В случае 60 % содержания алюминия, согласно приводимым данным, необходимое давление должно быть не менее 22,5 МПа. Приводимые в [1] результаты определены при электрическом разряде в камере больших размеров. Но интенсивное использование в настоящее время ВЭХВ в строительстве (технология для устройства свай и анкером [3]), при разрушении негабаритов [4] и в других технологиях предусматривает его выполнение в ограниченных, причем часто малых, объемах. Поэтому актуален вопрос исследования процессов, сопровождающих ВЭХВ, в таких объемах.

Целью настоящей работы является изучение давления жидкости в цилиндрическом замкнутом объеме с толстыми стенками при высоковольтном электрическом разряде при помощи вычислительного эксперимента. В частности, оценка влияния энергии, выделяющейся при окислении алюминиевой пудры, на величину давления.

## 2 Постановка задачи и метод ее решения

При построении математической модели полагали, что цилиндрический замкнутый объем (разрядная камера) имеет жесткие неподвижные стенки и заполнен идеальной сжимаемой жидкостью; трубочка с ЭС находится на оси симметрии (в центре) цилиндра; образующийся при ВЭХВ канал разряда заполнен идеальной низкотемпературной плазмой в период ввода энергии и идеальным газом после окончания ее ввода. Полагали также, что алюминиевая пудра сгорела во время ввода электрической энергии.

Соответствующая принятым допущениям математическая модель включает в себя:

- систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [5]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4;$$

$$F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T; \quad F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e+p)v_z]^T;$$

$$F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e+p)v_r]^T; \quad F_4 = [0, p, 0, 0]^T;$$

- двучленное уравнение состояния [5]:

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

- уравнение баланса энергии в канале разряда [6]:

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

- условия динамической совместности на ударной волне [5]:

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

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

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

– условие непротекания на неподвижной жесткой поверхности [5]:

$$v_n = 0.$$

Здесь  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $v_r, v_z, v_n$  – радиальная, осевая и нормальная компоненты вектора скорости жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e = \rho \left[ \varepsilon + (v_r^2 + v_z^2) / 2 \right]$ ,  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\kappa = 7,15$ ;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости;  $\gamma = 1,26$ ;  $p_a(t), V(t)$  – 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 конечно-разностным методом Годунова [5]. Стенка канала разряда является внутренней границей расчетной области, а внешней границей – сначала ударная волна, а после достижения волной стенки цилиндра – жесткая поверхность.

### 3 Результаты решения задачи

Схема разрядной камеры показана на рис. 1. Здесь 1 – поверхность цилиндра, 2 – заполняемая ЭС трубочка.

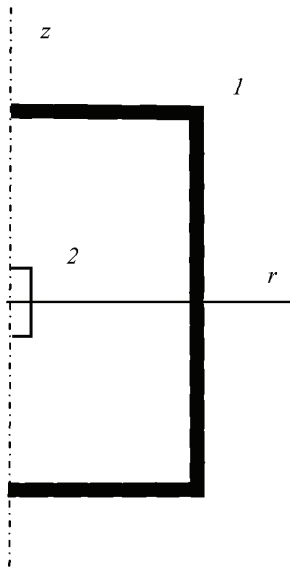


Рисунок 1 – Схема разрядной камеры

Закон ввода энергии в канал разряда в связи с отсутствием эксперимен-

тальных зависимостей разрядного тока и напряжения на канале разряда в замкнутом объеме моделировался треугольником [6]. В данном случае это допустимо, поскольку при ВЭХВ, как было установлено в работе [1], форма зависимости мощности от времени близка к равнобедренному треугольнику. Электрическая энергия вычислялась при следующих параметрах электрической цепи [1]: начальное напряжение  $U_0 = 20$  кВ, емкость конденсаторной батареи  $C = 3$  мкФ, индуктивность разрядной цепи  $L = 3,4$  мкГн, длина межэлектродного промежутка  $l = 0,04$  м. Величина энергии при этом равна 600 Дж. 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 [1] и содержит 0,027 г пудры, поэтому при сгорании пудры выделяется 837 Дж. Законы ввода энергии в канал разряда приведены на рис. 2 (линия 1 – вводимая электрическая энергия, 2 – суммарная энергия).

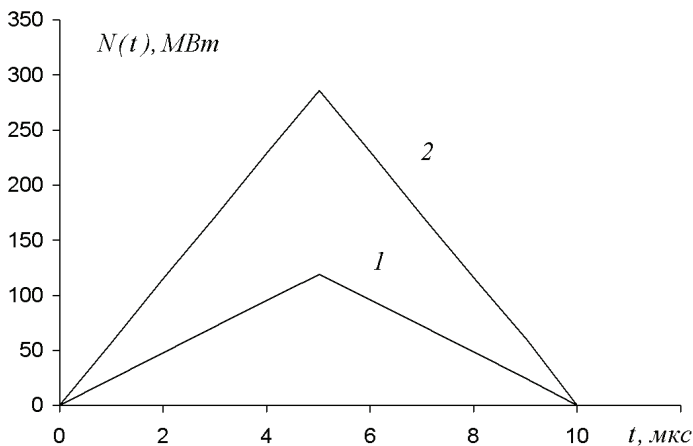


Рисунок 2 – Закон ввода энергии в канал разряда

Были выполнены расчеты в неограниченном пространстве и в цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, а диаметр – 0,07 м и 0,045 м. При этом рассматривался электрический разряд в воде с учетом и без учета энергии, получаемой при сгорании алюминиевой пудры.

Рассмотрим сначала результаты расчетов при электрическом разряде без учета энергии, получаемой в результате химической реакции. После замыкания межэлектродного промежутка образуется заполненная плазмой полость – канал разряда. Давление в ней значительно выше давления в окружающей среде. Канал начинает расширяться. Образовавшаяся при этом волна сжатия и следующий за ней гидрпоток распространяются по всему объему разрядной камеры. Отраженные от поверхности цилиндра волны давления приходят к каналу и сжимают его, повышая давление вещества в канале. Как

только это давление превысит давление в окружающей жидкости, начинается новое расширение канала. Давление в канале разряда в рассмотренных замкнутых объемах и в жидкости зависит от диаметра цилиндра и в 2–3 раза превышает давление в неограниченном пространстве.

Уменьшение диаметра цилиндра приводит к росту давления во всем замкнутом объеме. Давления в канале разряда после прихода отраженных от поверхности волн увеличивается в 1,5–1,7 раза, давление жидкости, примыкающей к каналу, возрастает в 1,5–2 (при  $z = 0$ ) раза, а давление на стенку цилиндра в плоскости срединного сечения канала – в 1,7 раза.

Сказанное выше иллюстрируют рис. 3 и 4, где номером 1 отмечена зависимость давления от времени в неограниченной области, 2 – в цилиндре диаметра 0,07 м, 3 – в цилиндре диаметра 0,045 м.

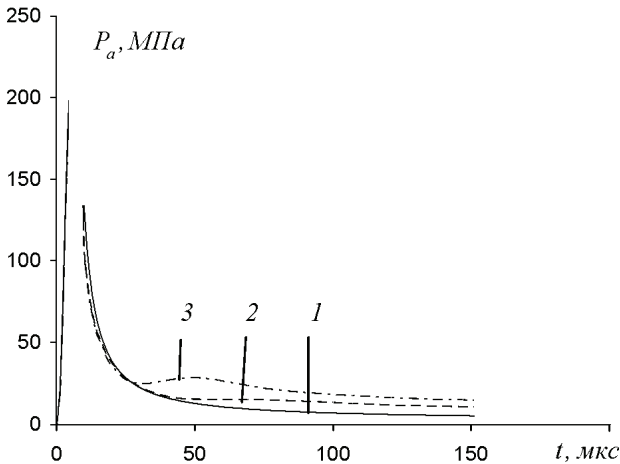


Рисунок 3 – Давление в канале разряда

В том случае, когда учитывается энергия, выделяющаяся при сгорании алюминиевой пудры, энергия, вводимая в канал разряда, возрастает в 2,4 раза. Крутизна нарастания мощности, которая, как известно [1], является основной величиной, определяющей состояние вещества в канале разряда, также увеличивается в 2,4 раза. Амплитуда давления в канале разряда и жидкости в замкнутом объеме возрастает в 1,6–1,8 раз. Величина давления в канале и в прилегающей к нему жидкости равно или превосходит давление, необходимое для экзотермической реакции окисления алюминиевого порошка в течение всего рассматриваемого периода времени.

Результаты расчетов в замкнутом объеме диаметра 0,07 м при учете только электрической энергии и энергии суммарной приведены на рис. 5 и 6. Здесь номером 1 обозначена зависимость давления от времени при учете только электрической энергии, 2 – при вводе суммарной энергии.

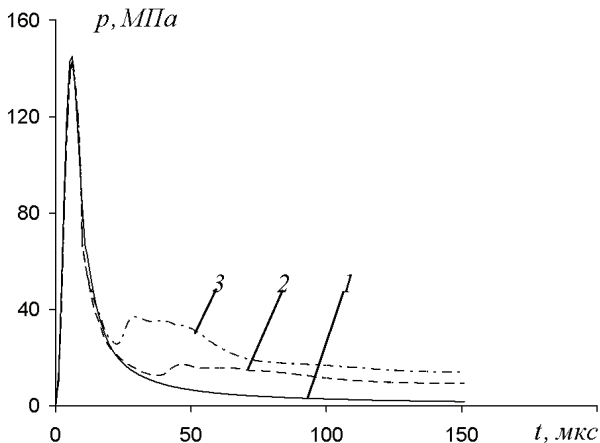


Рисунок 4 – Давление жидкости у стенки канала при  $z = 0$

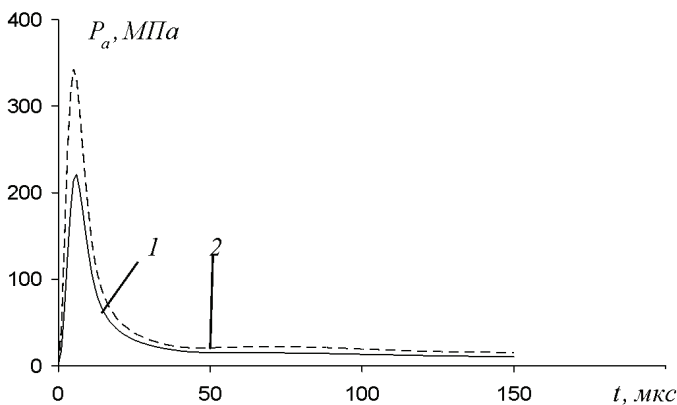


Рисунок 5 – Давление в канале разряда

#### 4 Выводы

В заполненной водой цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, а диаметр – 0,07 м или 0,045 м, при электрическом разряде давление в канале и окружающей его жидкости после прихода к каналу разряда отраженных от поверхности цилиндра волн в 2–3 раза превышает аналогичные характеристики в неограниченном объеме.

В случае ввода в разрядный канал электрической энергии и энергии, получаемой при сгорании алюминиевой пудры, давление в рассмотренных разрядных камерах превышает 22,5 МПа. Это создает благоприятные условия для начала самоподдерживающейся экзотермической реакции горения порошка алюминия.

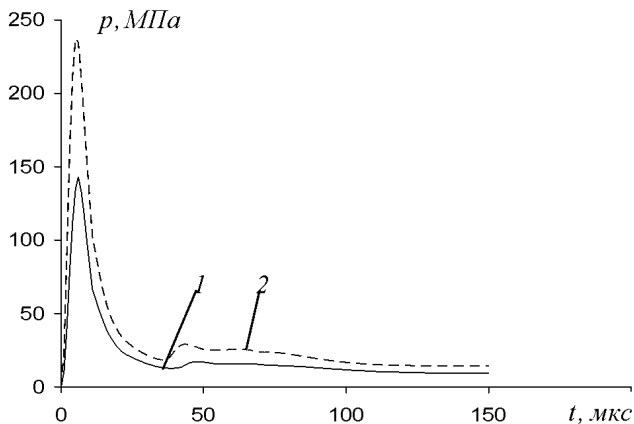


Рисунок 6 – Давление жидкости у стенки канала при  $z = 0$

**Список литературы:** 1. Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. – К: Наукова думка, 1992. – 168 с. 2. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972. – 294 с. 3. Рытов С.А. Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций // Жилищное строительство. – 2010. – № 5. – С. 47-50. 4. Ризун А.Р., Поздеев В.А., Голень Ю.В. Одноразовые электродные системы при высоковольтном электрическом разрушении природных и искусственных негабаритов // ЭОМ. – 2010. – № 3. – С. 78-81. 5. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К.Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 6. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

Поступила в редколлегию 28.10.2013

УДК 532:537

**Определение давления жидкости в замкнутом цилиндре при высоковольтном электрическом разряде / Г. А. Барбашова, А. И. Вовченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 31-37. – Бібліогр.: 6 назв.**

За допомогою чисельних методів досліджено тиск в каналі розряду і рідині в циліндричному замкнутому об'ємі з товстими стінками під час високовольтного електричного розряду. Зроблено оцінку впливу енергії, що утворюється під час окислення алюмінієвої пудри, на величину тиску.

**Ключові слова:** канал розряду, електричний розряд, тиск.

The pressure in the discharge channel and the fluid in the cylindrical closed container with thick walls during a high-voltage electrical discharge is numerically explored. The impact of the energy generated during aluminum powder oxidization on the pressure value is estimated.

**Keywords:** discharge channel, electrical discharge, pressure.