

12

Экспериментальное исследование поля давления электрического взрыва плоской кольцевой фольги

© А.Л. Суркаев, В.И. Усачев

Волгоградский государственный технический университет
Волжский политехнический институт (филиал), Волжский
E-mail: vpf@volpi.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований поля давления ударно-акустической волны в замкнутой камере с конденсированной средой, возникающей вследствие электрического взрыва плоской кольцевой фольги, ток разряда по которой протекает в радиальном направлении. Наличие ярко выраженного максимума давления относительно оси электродной системы можно интерпретировать как эффект нелинейного взаимодействия элементов ударно-акустических волн, возбуждаемых с диаметрально противоположных сторон взрывающейся кольцевой фольги.

Электрический взрыв проводников (ЭВП) широко используется как в фундаментальных научных исследованиях, так и в различных технологических процессах [1,2] уже немало лет. Определенный интерес представляет электрический взрыв плоской кольцевой фольги [3], для реализации которого разность потенциалов подается на ее центральную и периферийную области.

Целью данной работы является экспериментальное исследование поля давления ударно-акустической волны, генерируемой электрическим взрывом плоской кольцевой фольги в замкнутой камере с конденсированной средой, ток разряда по которой протекает в радиальном направлении.

Энергетическая установка представляет собой накопитель энергии конденсаторного типа с сопутствующим оборудованием. Генератор импульсных токов (ГИТ) собирался из конденсаторов в количестве 32 шт. марки КБГ-П-2 kV и емкостью $C = 10 \mu\text{F} \pm 10\%$ каждая, соединенных между собой параллельно. Полная электрическая емкость батареи

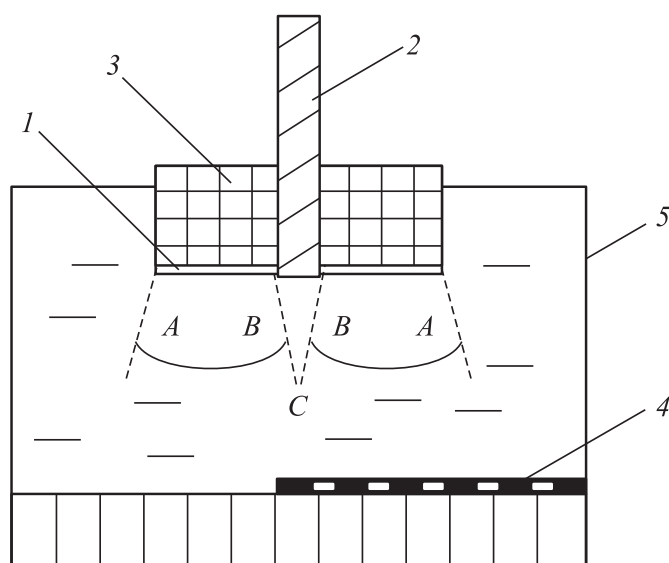


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — кольцевая фольга, 2 — электродная система, 3 — диэлектрический цилиндр, 4 — пьезокерамические датчики, 5 — взрывная камера.

составляла $C = 320 \mu\text{F}$. Индуктивность разрядного контура определялась с помощью измерителя иммитанса Е7-14 и составила $L = 7.8 \mu\text{H}$. Активное сопротивление разрядного контура без учета сопротивления кольцевой фольги $R = 0.2 \Omega$. Эксперименты проводились при зарядном напряжении $U_0 = 2 \text{ kV}$. Максимальная запасенная энергия в накопителе составляла $W = 640 \text{ J}$. Для определения энергетических характеристик разряда использовались пояс Роговского и высокоомный делитель напряжения, электрический сигнал которых регистрировался запоминающим осциллографом. Давление регистрировалось пьезокерамическими преобразователями в количестве 6 шт., расположенными линейно вдоль радиуса взрывной камеры. Для визуализации распределения поля давления использовался пластически деформируемый пластинчатый датчик с жестко зацепленными краями.

Взрывающаяся плоская кольцевая фольга из алюминия 1 соединена (рис. 1) надежным электрическим контактом со стержневым электродом 2 и располагается на торце прочного диэлектрического цилиндра 3 . В качестве регистратора поля давления использовалась линейка пьезокерамических преобразователей (ЦТС-19) в виде таблеток 4 , которые располагались вдоль радиуса камеры на массивной диэлектрической подложке. Пьезотаблетки использовались производства одной серии, равных размеров и коэффициента преобразования [4]. Вторым кольцевым электродом является крышка цилиндрической взрывной камеры 5 . Размеры взрывающейся фольги: наружный диаметр $d_1 = 25 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний диаметр $d_2 = 12 \cdot 10^{-3}$ м, толщина $h_f = 10 \mu\text{m}$. Геометрические размеры взрывающейся кольцевой фольги выбирались из условия протекания электрического взрыва, близкого к оптимальному [2], согласованному режиму [5], в частности реализация энергии конденсаторного накопителя осуществлялась в первой половине периода разряда. Взрывная камера наполнена дистиллированной водой.

На рис. 2 представлены временные осциллограммы тока, получаемого с пояса Роговского, и давления ударно-акустической волны, регистрируемого центральным (a) и третьим от центра (b) пьезокерамическими преобразователями. Осциллограммы тока демонстрируют полную реализацию энергии взрыва в первой половине периода, что свидетельствует о квазиоднородном взрыве фольги и режиме протекания электрического взрыва, близком к согласованному. Амплитуда импульса давления в центральной области поля достигала $p_1 = 19.5$ МПа, в то время как в области, находящейся непосредственно над центральной частью взрывающейся фольги, амплитуда была порядка $p_3 \approx 8.5$ МПа. Интерпретировать полученные результаты можно следующим образом. Ударно-акустическая волна электрического взрыва плоской кольцевой фольги имеет расходящийся волновой фронт кольцевой геометрии (рис. 1, линия AB). В некоторой точке C в центральной области взрывной камеры произойдет взаимодействие ударных волн, генерируемых диаметрально противоположными участками взрывающейся фольги. В силу нелинейности уравнений гидродинамики амплитуду ударно-акустической волны можно представить [6] в виде суммы двух членов: волны малой амплитуды p' , соответствующей линеаризованным уравнениям, и p'' -квадратичной поправки, $p = p' + p''$. Для плоской волны в лагранжевых координатах справедливо волновое

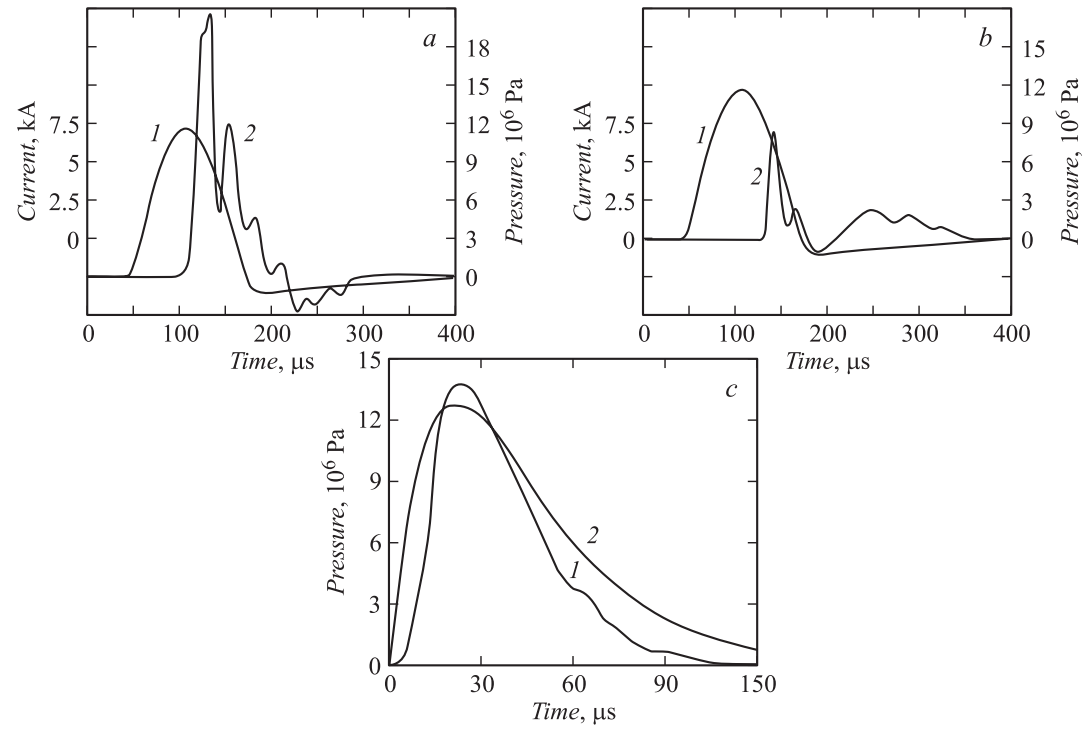


Рис. 2. Осциллограммы зависимости тока (1) и импульса давления (2) от времени, регистрируемого центральным (a) и третьим (b) пьезопреобразователем. Графики импульса давления (c), полученные экспериментально (1) и предлагаемой экспоненциальной зависимостью (2).

уравнение $p'_{tt} - c_0^2 p'_{\xi\xi} = 0$, где индексы обозначают соответствующие производные. Для квадратичной поправки уравнение выглядит следующим образом: $p''_{tt} - c_0^2 p''_{\xi\xi} = G(p'^2)_{tt}$, где G — коэффициент нелинейности:

$$G = \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \left[1 + \frac{1}{2} \rho_0 \left(\frac{dc^2}{dp} \right) \right],$$

c_0, c — скорость распространения по невозмущенной и возмущенной среде соответственно. Сама квадратичная поправка для плоской волны представляется в виде $p'' = \frac{1}{2} G t (p'^2)_t$. При рассмотрении нелинейного взаимодействия двух плоских волн [6] нарушается справедливый для линейного случая принцип суперпозиции, и квадратичная поправка представляется в виде: $p'' = \frac{1}{2} G t (p'_1{}^2)_t + \frac{1}{2} G t (p'_2{}^2)_t + G t (p'_1 p'_2)$, где индексы 1, 2 соответствуют первой и второй волнам. При взрыве кольцевой фольги с учетом эквивалентности волн, излучаемых с противоположных сторон фольги, получаем результирующую волну давления с квадратичной поправкой

$$p = 2p' + 2Gt(p'^2)_t. \quad (1)$$

Воспользуемся уравнением состояния среды в форме Тэта: $p = B[(\rho/\rho_0)^n - 1]$, где коэффициенты для воды $B = 3.045 \cdot 10^8$ Па, $n = 7.15$, ρ, ρ_0 — плотности жидкости возбужденного и равновесного состояния. Коэффициент нелинейности для идеальной жидкости можно представить в виде

$$G = \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \left(\frac{n^2(n-1)}{2} + 1 \right). \quad (2)$$

Рассмотрим волну давления [7] с экспоненциальной зависимостью в виде

$$p = a t e^{-rt}, \quad (3)$$

где $a = 9.5 \cdot 10^{11}$, $r = 4 \cdot 10^4$ — некоторые коэффициенты. На рис. 2, с представлены графики давления волны согласно экспериментальным осциллограммам (кривая 1) и предлагаемой теоретической (3) зависимости (кривая 2), построенные с помощью программы „Mathcad“. Таким образом, используя выражения (1), (2) и (3), можно получить давление результирующей волны

$$p = 2a t e^{-rt} \left[1 + (1 - rt) \frac{2at}{\rho_0 c_0^2} \left(\frac{n^2(n-1)}{2} + 1 \right) e^{-rt} \right]. \quad (4)$$

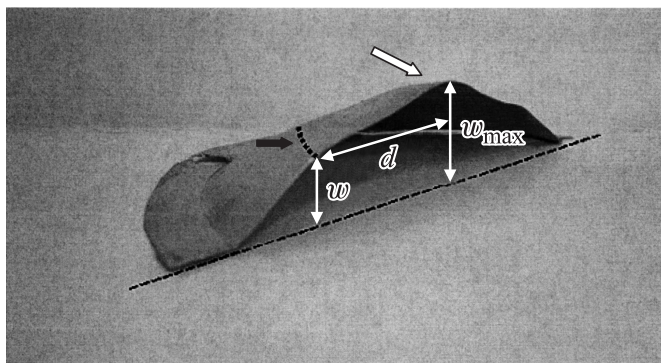


Рис. 3. Пластинчатый датчик давления после пластической деформации. Величины деформации w_{\max} в центре пластины. Кольцевое ребро показано черной стрелкой и пунктирной линией, высота w и диаметр d расположены симметрично относительно центра пластины.

Подстановка численных значений дает для амплитуды давления значение $p_{\max} = 21.1$ МПа, что достаточно убедительно согласуется с экспериментом.

Для визуализации распределения поля давления ударно-акустической волны электрического взрыва плоской кольцевой фольги в качестве регистратора применялся пластинчатый датчик в виде круглой тонкой пластины, которая подвергается пластической деформации. Пластина расположена и жестко закреплена на торце полой цилиндрической подложки. Представленная конструкция располагалась во взрывной камере на фиксированном расстоянии от взрывающейся фольги, которое в процессе проведения экспериментов менялось $l = 11-15$ мм. При осуществлении электрического взрыва фольги возникшая ударно-акустическая волна воздействует на круглую пластину (в нашем случае из алюминия А12), пластически деформируя ее. Величина и геометрия деформации могут служить источником информации о параметрах ударно-акустической волны, в частности о распределении поля давления. Диаметр активной зоны пластины $D = 100 \cdot 10^{-3}$ м, толщина стенки $h = 68 \mu\text{m}$.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены образцы (рис. 3) пластически деформированной круглой пластины. Визуально наблюдается (показано белой стрелкой) наличие ярко выраженной симметричной деформации в центре пластины по отношению к другим ее участкам. Величина деформации составляла порядка $w_{\max} \approx 20$ мм. Кроме того, на поверхности пластины имеется своеобразное кольцевое ребро (показано черной стрелкой и пунктирной линией) диаметром $d \approx 65$ мм и высотой $w \approx 10$ мм, расположенное также симметрично относительно центра пластины. Наличие кольцевого ребра на поверхности круглой пластины можно рассматривать как границу между расходящейся ударно-акустической волной и просто акустической (звуковой) волной. Угол расхождения составил $\alpha = (26-28)^\circ$. Используя классическую модель Кирхгофа–Ляве о равномерно рассредоточенном воздействии на круглую пластину из упругопластического материала, жестко заземленную по контуру, можно оценить давление по стреле прогиба $p = 16Eh^3/3R^4(1 - \mu^2)w_{\max}$, где E — модуль Юнга, h — толщина, R — радиус; w_{\max} — стрела прогиба центральной части пластинки. Оценка давления дает результат меньшего значения $p \approx 4.6$ МПа, что объясняется, в частности, неучетом эффекта нелинейности взаимодействия волн.

Таким образом, экспериментально и теоретически исследовано поле давления ударно-акустической волны, возникающей вследствие электрического взрыва плоской кольцевой фольги, ток разряда по которой протекает в радиальном направлении.

Список литературы

- [1] Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоиздат, 1990. 217 с.
- [2] Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 205 с.
- [3] Суркаев А.Л., Суркаев В.А., Кумыш М.М. Электрогидроимпульсный способ запрессовки труб в труднодоступных местах: Пат. 2378075 РФ, МПК В 21 D 26/10–2010.

- [4] *Суркаев А.Л., Муха Ю.П., Кумыш М.М., Усачев В.И.* // Известия ВолгГТУ. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 6: Межвуз. сб. науч. ст. Волгоград, 2012. С. 69–74.
- [5] *Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 36. В. 23. С. 97–104.
- [6] *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
- [7] *Суркаев А.Л., Муха Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 15. С. 43–45.