

12

## **Исследование миллисекундного электрического взрыва металлических проводников**

© А.Л. Суркаев, В.И. Усачев, М.М. Кумыш

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

Поступило в Редакцию 27 мая 2011 г.

Рассмотрены условия протекания согласованного режима при миллисекундном электрическом взрыве цилиндрического проводника. Даны оценки геометрических размеров фольги, выполненной в виде кольца, для согласованного режима электрического взрыва и представлены экспериментальные результаты электрического взрыва плоской кольцевой фольги, ток разряда по которой протекает в радиальном направлении.

Широкое использование электрического взрыва проводников в различных технологических процессах и в фундаментальных научных исследованиях является одним из основных факторов, определяющих актуальность проблемы [1,2]. Определенный интерес представляет электрический взрыв проводников, выполненных в виде плоской кольцевой фольги [3], для реализации которого разность потенциалов подается на ее центральную и периферийную области.

Целью данной работы являются определение условий согласованного режима при миллисекундном электрическом взрыве цилиндрических проводников, оценка геометрических размеров кольцевой фольги для согласованного режима взрыва и экспериментальные исследования электрического взрыва плоской кольцевой фольги, ток разряда по которой протекает в радиальном направлении.

Наиболее эффективное преобразование энергии электрического поля конденсаторной батареи в энергию гидродинамического возмущения осуществляется при протекании электрического взрыва в согласованном (оптимальном) режиме. Часто цитируемые условия согласованного режима электрического взрыва цилиндрических проводников были

получены [2]

$$d_{opt} = \left( \frac{W_0}{\gamma_{cond} \sigma_{cond} (\lambda_{cond} + \chi_{cond}) \sqrt{LC}} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

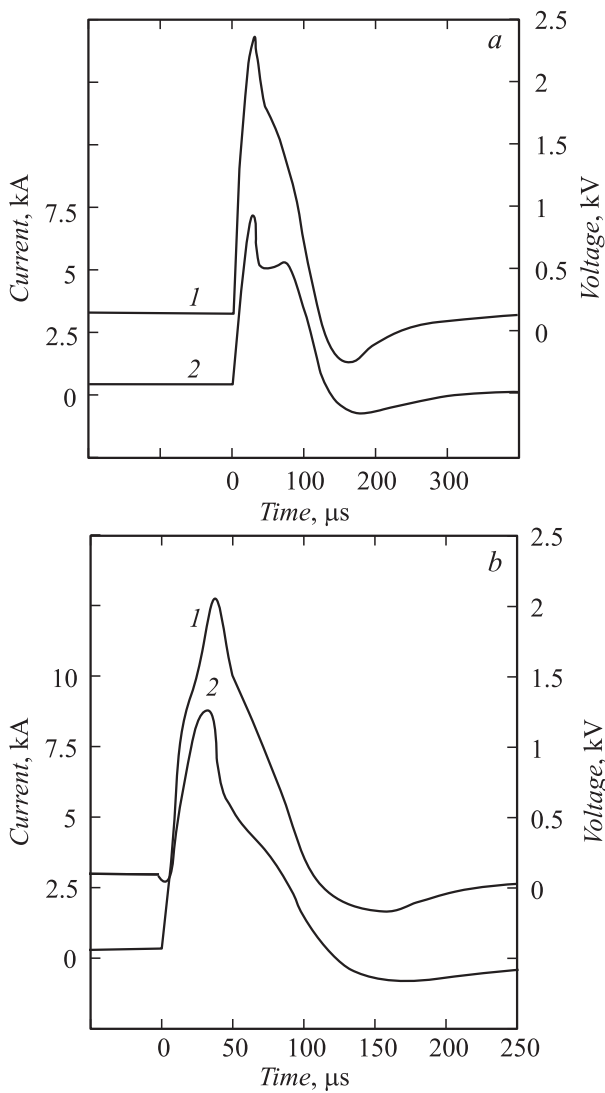
$$l_{opt} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}, \quad (2)$$

где  $W_0$  — запасенная энергия конденсаторной батареи;  $U_0$  — начальное напряжение;  $C$  — емкость батареи;  $L$  — индуктивность контура;  $\gamma_{cond}$ ,  $\sigma_{cond}$  — плотность и удельная электропроводность,  $\lambda_{cond}$ ,  $\chi_{cond}$  — удельная теплота плавления и парообразования проводника.

Выражения (1) и (2), полученные эмпирически в ходе анализа многочисленных данных, убедительно согласуются с результатами экспериментов для микросекундных и наносекундных взрывов. При использовании энергетических установок [4], работающих в миллисекундном диапазоне, в частности, с конденсаторами большой емкости  $C = 2000 \mu\text{F}$  и сравнительно не высокого напряжения  $U_0 = 6 \text{ kV}$ , соотношение (1) хорошо согласуется с экспериментом, а соотношение (2) неудовлетворительно. Аналогичный результат наблюдается и для маломощной энергетической установки с параметрами:  $W_0 = 640 \text{ J}$ ,  $U_0 = 2 \text{ kV}$ ,  $C = 320 \mu\text{F}$ ,  $L = 7.8 \mu\text{H}$ ,  $R = 0.2 \Omega$ . Следует заметить, что в выражении (2) не отражены физические свойства взрывающегося металла, из чего следует равенство длин цилиндрических проводников вне зависимости от характеристик металла. Поэтому, используя элементы теории размерности, предлагается несколько скорректировать выражение (2) и представить в виде

$$l_{opt} = \frac{\alpha U_0 R \sqrt[4]{LC}}{z \sqrt{\rho_{cond} \gamma_{cond} (\chi_{cond} + \lambda_{cond})}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — некоторый поправочный коэффициент, который, видимо, должен зависеть от запасаемой энергии и от физико-химических свойств металлов, в частности от потенциала ионизации, подвижности электронов и т.д.;  $R$  и  $z = \sqrt{L/C}$  — активное и волновое сопротивление разрядного контура соответственно;  $\rho_{cond} = 1/\sigma_{cond}$  — удельное сопротивление проводника. Несомненно, значение коэффициента  $\alpha$  требует более детального рассмотрения и уточнения.



**Рис. 1.** Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) для электрического взрыва медного (Cu) проводника (a) и алюминиевого (Al) проводника (b).

Согласно (1), диаметр медного проводника  $d_{(Cu)opt} = 3.8 \cdot 10^{-4}$  м, диаметр алюминиевого проводника  $d_{Al,opt} = 5.0 \cdot 10^{-4}$  м. Согласно (2), длина проводника при согласованном режиме и для меди (Cu), и для алюминия (Al) одинакова  $l_{opt} = 28 \cdot 10^{-3}$  м, в то же время из выражения (3) имеем  $l_{(Cu)opt} = 48 \cdot 10^{-3}$  м и  $l_{(Al)opt} = 72 \cdot 10^{-3}$  м при значениях поправочного коэффициента  $\alpha \approx 1.1-1.44$ . На графиках представлены характерные осциллограммы тока и напряжения для электрического взрыва медного (рис. 1, *a*) и алюминиевого (рис. 1, *b*) проводников в воде согласно выражениям (1), (3). Данные графики иллюстрируют существование „паузы тока“ и полную реализацию энергии взрыва в первой половине периода, соответственно можно говорить о состоятельности выражения (3).

В работе [5] показано, что удельная плотность энергии, согласно выражениям (1) и (2), является постоянной величиной и зависит только от свойств материала

$$\omega_{opt} = \left( \frac{W_0}{m} \right) = \left[ \frac{\sigma_{cond}(\lambda_{cond} + \chi_{cond})}{8\pi^2 \gamma_{cond}} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Применяя аналогичную методику расчета с соотношениями (1) и (3), получаем выражение для удельной плотности энергии, которое несколько не согласуется с (4), в виде

$$\omega_{opt} = \left( \frac{W}{m} \right) \frac{\sqrt{8}(\lambda_{cond} + \chi_{cond})z}{\alpha \pi R}. \quad (5)$$

Из полученного выражения следует, что основной вклад в значение удельной плотности энергии вносят теплофизические параметры материала взрывающегося проводника. Результат также зависит от параметров разрядного контура, что отражает физические свойства процесса; в противном случае возникает ситуация, в которой возможно осуществление электрического взрыва проводника с любыми параметрами разрядного контура.

Для осуществления квазиоднородного электрического взрыва кольцевой фольги при протекании тока в радиальном направлении необходимо, в частности, чтобы плотность тока была одинакова по всему проводнику, т. е.  $j = \text{const}$ , следовательно, необходимо применять взрывающуюся фольгу переменного сечения. А так как сила тока  $I$  в любом

кольцевом сечении одинакова, то площадь сечения  $S$  также должна быть одинаковой, т. е.

$$S = 2\pi r h = 2\pi r_1 h_1 = 2\pi r_2 h_2, \quad (6)$$

$$h = \frac{r_1 h_1}{r} = \frac{d_1 h_1}{d}, \quad (7)$$

где  $d_1 = 2r_1$  и  $d_2 = 2r_2$  — внутренний и внешний диаметр кольца соответственно;  $h_1$  и  $h_2$  — высота кольца в центре и на периферии. Как видно, высота кольца должна иметь в радиальном направлении гиперболическую зависимость от радиуса  $h(r) \sim 1/r$ . Взрывающуюся фольгу в виде кольца можно рассматривать как систему цилиндрических проводников, лежащих в одной плоскости и расположенных радиально. Принимая условие равенства сопротивлений, объемов и поверхностей цилиндрических проводников и кольцевой фольги, можно оценить параметры фольги гиперболического профиля при условии согласованного режима. Сопротивление  $n$  радиально расположенных проводников, соединенных параллельно, и сопротивление гиперболического кольца в радиальном направлении определяется как

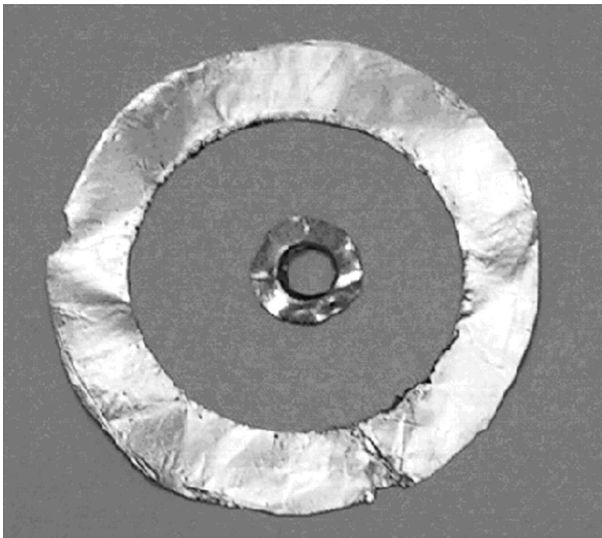
$$R_{cyl} = \rho \frac{l}{nS}, \quad R = \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{dl}{2\pi l h} = \frac{\rho}{2\pi h_1 r_1} (r_2 - r_1). \quad (8)$$

Объемы гиперболического кольца и цилиндрических проводников соответственно равны

$$V = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} r h dr = 2\pi r_1 h_1 (r_2 - r_1) = \frac{\pi d_1 h_1 (d_2 - d_1)}{2}, \quad V_{cyl} = \frac{n\pi d^2 l}{4}. \quad (9)$$

Поверхность гиперболического кольца после ряда преобразования равна

$$S = \pi h_1 r_1 \left[ \left( \sqrt{\frac{(h_1 r_1)^2}{r_1^4} + 1} - \sqrt{\frac{(h_1 r_1)^2}{r_2^4} + 1} \right) + \ln \left( \frac{r_2^2 + \sqrt{(h_1 r_1)^2 + r_2^2}}{r_1^2 + \sqrt{(h_1 r_1)^2 + r_1^2}} \right) \right]. \quad (10)$$



**Рис. 2.** Плоская кольцевая фольга после электрического взрыва.

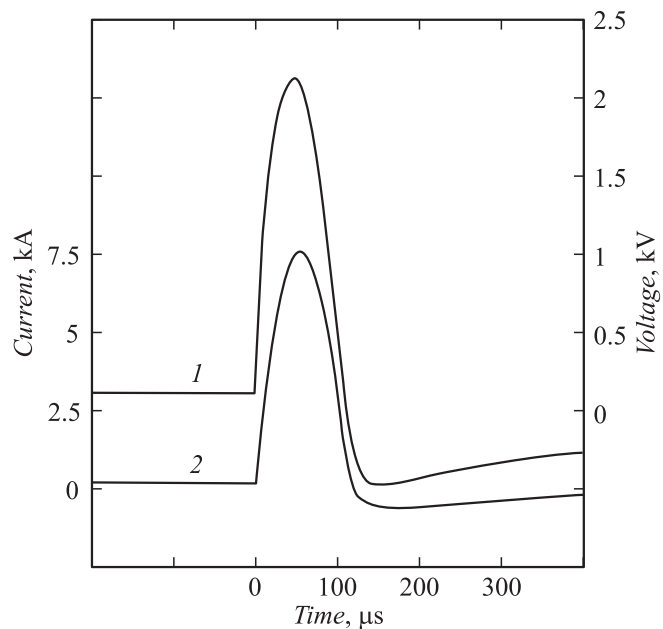
Разложив в ряд и ограничившись первыми двумя слагаемыми, получаем

$$S = \frac{2\pi h_1^3}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^4 \right). \quad (11)$$

Решая полученную систему (8)–(11), можно получить, в частности:

$$d_{opt} l_{opt} = \frac{2h_1^3}{nr_1} \left( 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^4 \right), \quad l_{opt} = r_2 - r_1. \quad (12)$$

С технической точки зрения изготавливать кольцевую фольгу с гиперболическим профилем достаточно проблематично. Тем не менее использование плоской фольги, выполненной в виде кольца, позволяет в принципе осуществить электрический взрыв и сгенерировать ударно-акустическую волну. Учитывая, что сопротивление плоской кольцевой



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) электрического взрыва плоской кольцевой фольги.

фольги равно

$$R_{ring} = \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{dl}{2\pi lh} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (13)$$

и проделывая аналогичные выкладки, можно прийти к результату

$$h_{ring} = \frac{\alpha d_{opt}}{2} = \frac{\beta}{2} \left( \frac{nW_0}{\gamma_{cond} \sigma_{cond} (\lambda_{cond} + \chi_{cond}) \sqrt{LC}} \right)^{1/4}. \quad (14)$$

Дальнейшие преобразования приводят к связи между геометрическими размерами взрывающейся плоской кольцевой фольги:

$$\sqrt{\frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\alpha n U_0 R \sqrt{LC}}{z \sqrt{\rho_{cond} \gamma_{cond} (\chi_{cond} + \lambda_{cond})}}. \quad (15)$$

Данное выражение упрощается, в частности, для случая, отношения радиусов кольца в пределах одного порядка в силу малости величины логарифма их отношений.

Используемая энергетическая установка является маломощной, тем не менее геометрические размеры кольцевой фольги  $r_1 = 3 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_2 = 12.5 \cdot 10^{-3}$  м,  $h = 15 \cdot 10^{-6}$  м, применяемые в экспериментах, позволяют осуществить ее электрический взрыв. На фотографии (рис. 2) представлен результат электрического взрыва, видны полное отсутствие вещества взорванной фольги в межэлектродном пространстве и четкая граница оставшейся фольги в зоне центрального и цилиндрического электродов. Осциллограммы тока и напряжения (рис. 3) демонстрируют полную реализацию энергии взрыва в первой половине периода, что свидетельствует о квазиоднородном взрыве фольги.

Таким образом, предложено выражение, определяющее длину взрывающегося цилиндрического проводника, при осуществлении согласованного режима взрыва. С помощью соотношения, определяющего геометрические параметры цилиндрических проводников для определения условий согласованного режима электрического взрыва, дана оценка аналогичных параметров взрывающейся кольцевой фольги, ток разряда по которой протекает радиально.

## 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. / Патент 2378075 РФ, МПК В 21 D 26/10–2010.
- [4] Суркаев А.Л., Кульков В.Г., Талызов Г.Н. // Неоднородные конструкции. Труды XXX Уральского семинара. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 91–98.
- [5] Хайнацкий С.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 7. С. 15–20.