

УДК 532.59-537.52

## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПЛОСКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ФОЛЬГИ

А.Л. Суркаев<sup>1</sup>, Ю.П. Муха<sup>2</sup>, М.М. Кумыш<sup>1</sup><sup>1</sup>*Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ*<sup>2</sup>*Волгоградский государственный технический университет*✉ [vpf@volpi.ru](mailto:vpf@volpi.ru)

В данной работе рассматривается электрический взрыв металлических проводников, выполненных в виде плоского кольца. Используя соответствующую электродную систему, ток разряда протекает в радиальном направлении от центральной части кольца к периферийной. Представлены экспериментальные результаты электрического взрыва плоской кольцевой фольги, выполненной из алюминия. Рассмотрена возможность применения профиля фольги в виде гиперболической функции. Рассмотрена задача электрического взрыва плоской фольги, играющей роль инициатора электрического разряда и считая, что процесс протекания разряда является квазистатическим, дана оценка давления, генерируемых в конденсированной среде ударно-акустических волн.

Ключевые слова: электрический взрыв, проводник в виде плоской кольцевой фольги, давления, ударно-акустических волн.

## ELEMENTS OF HYDRODYNAMIC OF ELECTRICAL EXPLOSION OF THE PLATE RING FOIL

A.L. Surkaev<sup>1</sup>, Yu.P. Muha<sup>2</sup>, M.M. Kumysh<sup>1</sup>*The Volga polytechnical institute (branch)*<sup>2</sup>*The Volgograd state technical university*✉ [vpf@volpi.ru](mailto:vpf@volpi.ru)

The electric explosion of the flat shaped metal conductors such as a flat ring is examining there in the present work. By using an appropriate electrode system, the discharge current proceeds in a radial direction from the central part of a ring to its peripheral. Experimental results of electric explosion of the flat ring aluminum foil are submitting in living issue. The opportunity of using a foil ring having hyperbolic shape is considered. The problem of electric explosion of the flat foil which is playing a role of the initiator of the electric discharge is considered and including quasi-static process of the discharge. The estimation of the pressure, shock — acoustic wave's generation in the condensed environment are given in the present work.

Keywords: electric explosion, flat ring aluminum foil, shock-acoustic wave's pressure.

Целью данной работы является исследование электрического взрыва плоской кольцевой фольги и оценка амплитуды давления генерируемых ударно-акустических волн.

Электрический разряд в конденсированных средах представляет собой уникальное явление, одними из аспектов которого является скоротечность процесса и эффективность воздействия на обрабатываемый объект. История генерирования и использования высокоскоростного выделения энергии электрического поля относится к 60-м годам прошлого столетия [1]. Широкий спектр физических эффектов, сопровождающих электрический взрыв проводников — генерация электромагнитных излучений, формирование ударно-акустических возмущений, получение наноразмерных порошков и т.д. — находят многостороннее применение в фундаментальных исследованиях и технологических процессах, поэтому требуют проведения дальнейших научных исследований для получения достоверной информации о физических свойствах наблюдаемых явлений [2 — 6].

Для того чтобы протекание процесса осуществлялось в согласованном режиме, т.е. при котором полная реализация энергии конденсаторного накопителя происходила в первой половине периода разряда, необходимо выполнение ряда условий. Условия оптимальности (1), часто цитируемые, удачные и убедительно согласующиеся с экспериментом в случае проводников в виде проволочек, эмпирически были получены автором [3], а также предложено выражение (2) для определения  $\ell_{\text{созл}}$  авторами [8]:

$$d_{\text{созл}} = \left( \frac{W_0}{\gamma_{\text{np}} \sigma_{\text{np}} (\lambda_{\text{np}} + \chi_{\text{np}}) \sqrt{L/C}} \right)^{1/4},$$

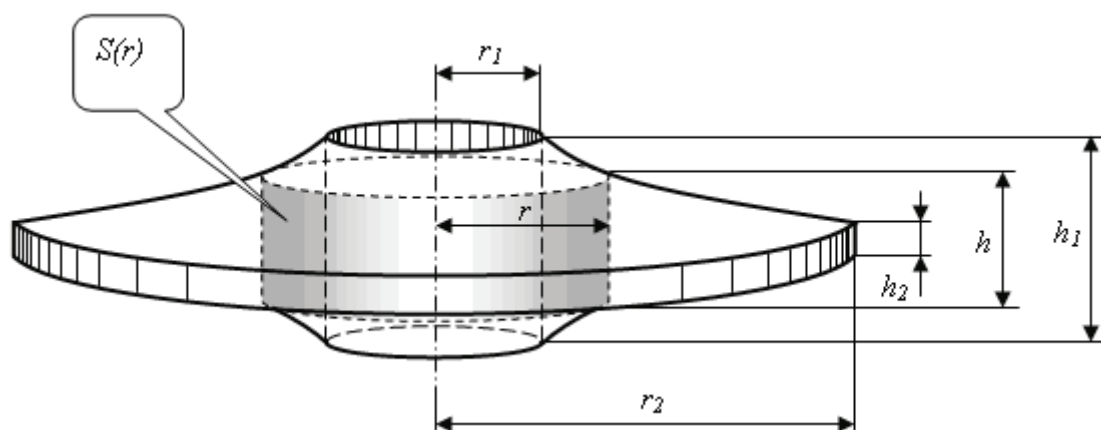
$$\ell_{\text{созл}} = 2 \cdot 10^{-3} U_0^4 \sqrt[4]{LC} \quad (1)$$

$$\ell_{\text{созл}} = \frac{U_0^4 \sqrt[4]{LC}}{\sqrt{\beta \rho_{\text{np}} \gamma_{\text{np}} (\chi_{\text{np}} + \lambda_{\text{np}})}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{созл}}$ ,  $\ell_{\text{созл}}$  — диаметр и длина взрывающегося проводника, соответствующие протеканию разряда в согласованном режиме,  $W_0$  — запасенная энергия накопителя;  $U_0$  — начальное напряжение;  $C$  — емкость конденсаторной батареи;  $L$  — индуктивность разрядного контура;  $\gamma_{\text{np}}$ ,  $\sigma_{\text{np}}$  — плотность и удельная электропроводность металлического проводника,  $\lambda_{\text{np}}$ ,  $\chi_{\text{np}}$  — удельная теплота плавления и парообразования металла,  $\beta$  — коэффициент, зависящий от металла проводника,  $\rho_{\text{np}}$  — удельное сопротивление проводника.

Определенный интерес вызывает электрический взрыв проводников, выполненных в виде плоского кольца из фольги [8], при котором разность потенциалов подается на центральную и периферийную ее части. Но в силу неоднородности распределения электрического поля в проводнике плотность разрядного тока  $j$  не является одинаковой вдоль радиуса. Для осуществления однородного электровзрыва при протекании тока в радиальном направлении необходимо, чтобы плотность тока  $j$  была одинакова по всему проводнику. А так как сила тока  $I$  в любом кольцевом сечении одинакова (рис. 1), то площадь сечения  $S(r)$  так же должна быть одинаковой; т.е.

$$S(r) = 2\pi r h = 2\pi r_1 h_1 = 2\pi r_2 h_2, \text{ тогда:}$$



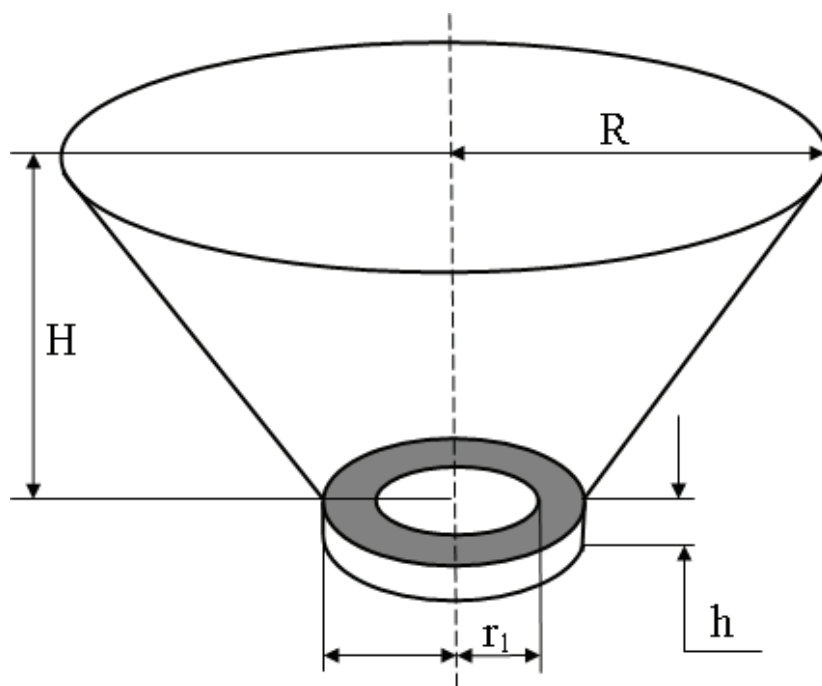
$$h = \frac{r_1 h_1}{r} = \frac{d_1 h_1}{d} \quad (3)$$

где  $d_1=2r_1$  — внутренний диаметр кольца;  $d_2=2r_2$  — внешний диаметр кольца;  $h_1$  — толщина на внутреннем диаметре;  $h_2$  — толщина на внешнем диаметре. Как видно, толщина кольца по радиальному сечению должна иметь гиперболическую зависимость от радиуса  $h(r) \sim 1/r$ . Сопоставляя кольцевую фольгу с системой радиально распо-

ложенных и цилиндрических проводников и принимая условие равенства объемов проводников  $V_u$  с размерами в соответствии (1) и (2) кольцевой фольги  $V_k$  с профилем (3) имеем:

$$V_k = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} r h(r) dr = 2\pi r_1 h_1 (r_2 - r_1) = \frac{\pi d_1 h_1 (d_2 - d_1)}{2} \quad (4)$$

$$V_u = \frac{n\pi d_{\text{созл}}^2 \ell_{\text{созл}}}{4} \quad (5)$$



Приравнявая (4) и (5) получим высоту  $h_1$  центральной части:

$$h_1 = \frac{nd_{\text{центр}}^2 \ell_{\text{центр}}}{2d_1(d_2 - d_1)} = \frac{n}{4d_1} \sqrt{\frac{W_0}{\beta \gamma_{\text{нр}} \sigma_{\text{нр}} (\lambda_{\text{нр}} + \chi_{\text{нр}})}} \sqrt{L/C} \quad (6)$$

Использование предлагаемой геометрии взрывающегося проводника позволяет генерировать в окружающем пространстве плоскую ударно-акустическую волну [9]. Для оценки давления ударной волны плоскую кольцевую фольгу, имеющую малую толщину и незначительную разницу внешнего и внутреннего диаметров, предлагается рассматривать в качестве инициатора электрического разряда и не рассматривать физические процессы, протекающие в металлической фазе. Также считаем, что процесс протекания разряда является квазистатическим [10], т.е., время достижения максимального значения тока разряда на много больше времени прохождения звуковой волны до стенки камеры.

Далее следуя [10], имеем условие сохранения массы воды  $\rho V' = \text{const}$ , где  $\rho$  — плотность жидкости в области между стенкой камеры и плазменным образованием;  $V'$  — объем жидкости. Тогда:

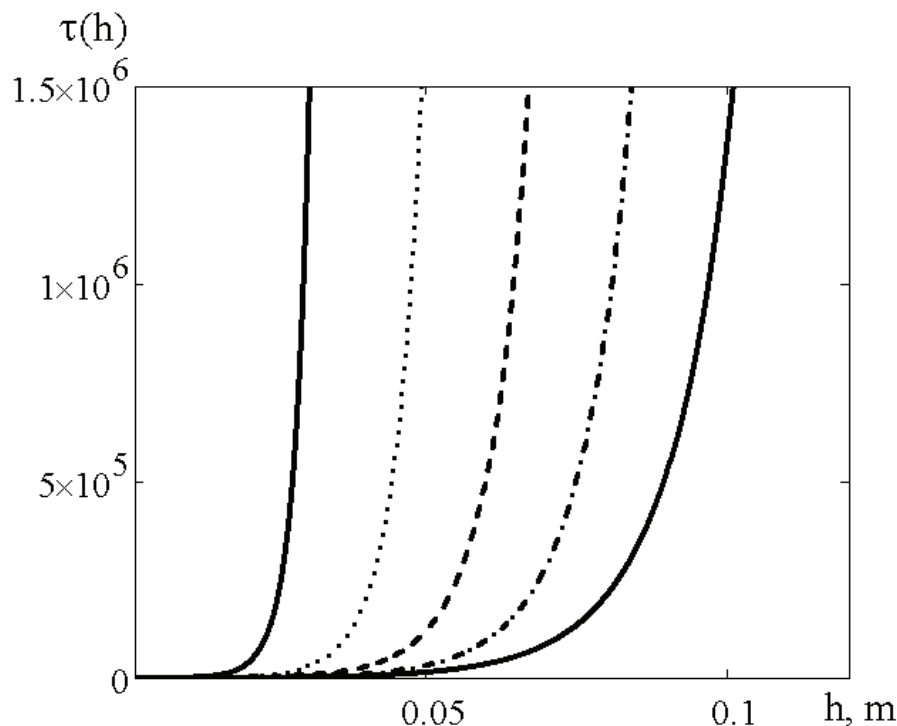
$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV'}{V'} \quad (7)$$

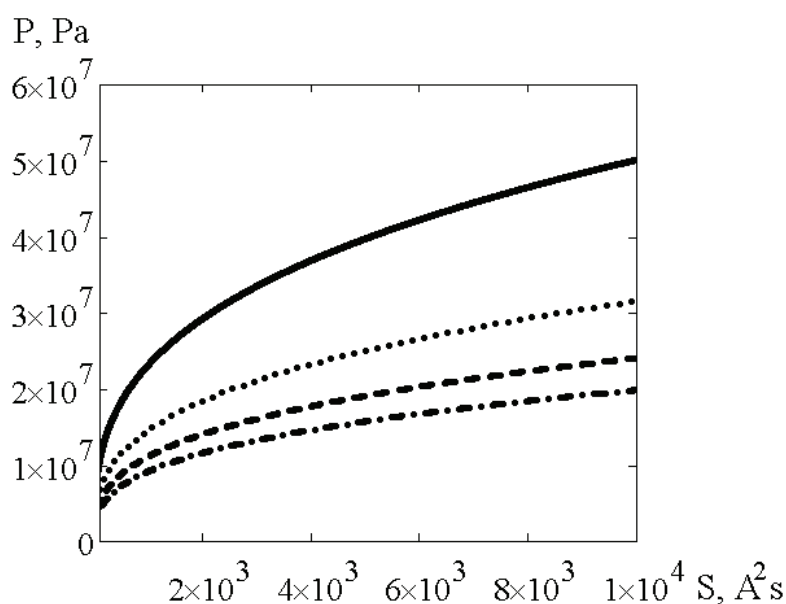
Уравнение состояния жидкости представляется в форме Тэта:

$$P \approx P_0 + A \left[ \left( \rho / \rho_0 \right)^\alpha - 1 \right] \quad (8)$$

где  $P$  — давление в камере равное давлению в канале разряда для квазистатического режима; для воды коэффициенты  $A = 3.05 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ ,  $\alpha = 7.15$ . Считаем, что объем жидкости, вовлеченной в процесс возмущения электрическим взрывом плоского кольца из фольги, представляет собой усеченный конус (рис. 4), объем которого определяет-

ся:  $V'_0 = \frac{\pi H}{3} (R^2 + r^2 + Rr)$ , а также расширение плазменного образования происходит





только вследствие увеличения высоты  $h$ , уравнение (7) сводится к виду:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{V'_0}{V'} = \frac{H(R^2 + r^2 + Rr)}{H(R^2 + r^2 + Rr) - 3h(R_k^2 - r_k^2)}, \quad (9)$$

вводя обозначения

$$\chi = (R^2 + r^2 + Rr), \quad \delta = (R_k^2 - r_k^2), \quad x = \frac{3h\delta}{H\chi},$$

и подставляя в (8) получим для давления:

$$P \approx A [(\rho/\rho_0)^\alpha - 1] = A \left[ \left( \frac{H\chi}{H\chi - 3h\delta} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (10)$$

Уравнение баланса энергии в канале разряда [11] представляется:

$$I^2 R_c = P \frac{dV'}{dt} + \frac{1}{(\gamma-1)} \frac{d(PV')}{dt}, \quad (11)$$

Вводя новую переменную

$$\tau = \frac{1}{AV'} \int I^2(t) R dt, \quad \text{имеем:}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{(\gamma-1)d\tau} (x\theta) + \theta \frac{d}{d\tau} x \quad (12)$$

Решением уравнения (12) относительно  $\tau$  является:

$$\tau = \frac{x^2}{(\gamma-1)\theta} + \frac{(\gamma-2)}{(\gamma-1)} \left[ \frac{x(1-x)^{-\alpha+1}}{(\alpha-1)} + \frac{1-(1-x)^{-\alpha+2}}{(\alpha-1)(\alpha-2)} - \frac{x^2}{2} \right] \quad (13)$$

$$P(S) = 3 \cdot \left[ \frac{\alpha A}{\pi H(R^2 + Rr + r^2)} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left[ \frac{(\gamma-1)(R_1^2 - r_1^2) \cdot \ln(R_1/r_1)}{2\sigma(\gamma+1)} \cdot S \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14).$$

Используя начальные параметры взрывающегося кольца и возмущенной среды  $r_k=3 \cdot 10^{-3}m$ ;  $R_k=7.5 \cdot 10^{-3}m$ ;  $R=15 \cdot 10^{-3}m$ , выражение (13) позволяет определить величину объемной плотности энергии  $E(h)$  переданной среде (рис. 5) в зависимости от изменения высоты  $h=(0 \div 8) \cdot 10^{-3}m$  плазменного канала, выполняющего роль поршня, при различных значениях высоты усеченного конуса  $H=(30 \div 120) \cdot 10^{-3}m$  возмущенной среды.

Выражение (14) позволяет оценить амплитуду давления ударно-акустической волны от интеграла действия  $S = \int I^2(t) dt$  (рис. 6) при аналогичных значениях высо-

ты  $H=(30\div 120)\cdot 10^{-3}m$  области возмущенной среды.

#### Список литературы

1. Юткин Д.А. Электрогидравлический эффект. — М: Машгиз, 1955 — 51 с.
2. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. — Киев: Наукова думка, 1983. — 342 с.
3. Кривицкий Е.В. Динамика электро-взрыва в жидкости. — Киев: Наукова думка, 1986. — 205 с.
4. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение. — М: Энергоиздат, 1990. — 217 с.
5. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. — М: Наука, 1971. — 155 с.
6. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. — Томск: ТГУ, 1975. — 256 с.
7. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Лысов Э.А. Силовая установка электрического взрыва металлических проводников в жидкой среде. // IV Межр-ная науч-прак. конф. «Взаимодействие ВУЗов и пром. пред-й для эффективного развития ин-ной деятельности» — Волжский, 14.05.2008. С. 95–98
8. Суркаев А.Л., Кумыш М.М. К вопросу об условиях оптимальности режимов электрического взрыва кольцевой фольги. II Межд-ная науч-практ. конф. «Дни науки — 2007» (апрель 2007 г.) [www.rusnauka.com](http://www.rusnauka.com).
9. Суркаев А.Л., Слепцов О.А. Электрогидроимпульсный способ запрессовки труб в труднодоступных местах. — пат. № 2125496. — 1999.
10. Шнеерсон Г.А. Оценка давления при медленных режимах искрового разряда в цилиндрической камере, заполненной водой. // ЖТФ. 2003. т. 73. Вып. 3. С. 100-101.
11. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М: Наука, 1971. — 155 с.