

УДК 621.762.2 (088.8)

**Д-р физ.-мат. наук С. В. Лоскутов, канд. техн. наук А. В. Ершов,
С. В. Сейдаметов**

Запорожский национальный технический университет

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ

Рассмотрен процесс нагрева медного проводника до плазменного состояния при разряде конденсатора. Показано, что энергия нагрева проводника в плазменном состоянии равна энергии электромагнитного поля контура в момент взрыва, а ЭДС самоиндукции контура может в 20–30 раз превышать напряжение на обкладках конденсатора.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, плазма, ударная волна, гидродинамическое давление.

Технологическое применение электрического взрыва проводников (ЭВП) в воде обусловлено возникновением ударной волны высокого давления, которое может достигать несколько тысяч атмосфер [1–4]. При этом остаются недостаточно изученными процессы преобразования энергии при ЭВП, что затрудняет выполнение расчетов для оптимизации процесса.

В частности, в проведенных нами экспериментах необъяснимым остается тот факт, что давление ударной волны очень слабо зависит от энергии, вводимой в проводник во время взрыва. Например, при увеличении напряжения на обкладках конденсатора с 2 до 8 кВ, энергия конденсатора возрастала в 16 раз, в то время как давление ударной волны увеличивалось только на 7 %, с 157 до 167 МПа.

В опубликованных работах [1–4] показано наличие двух стадий процесса, отличающихся характером изменения тока и напряжения. Первая стадия соответствует нагреву проводника до температуры кипения при сравнительно медленном изменении тока и напряжения. Во второй стадии происходит взрывообразный переход проводника в пароплазменное состояние при резком возрастании напряжения и уменьшении тока. Длительность этого процесса составляет 0,5 мкс, что примерно на порядок меньше длительности нагрева проводника до кипения. Особенностью стадии взрыва проводника является не только повышение давления, но и смещение границы пароплазменной области на 0,5 мм относительно начального положения до взрыва [2], в отличие от работы [3], где смещением границы пренебрегалось.

Давление ударной волны определяется энергетическим выделением в объеме проводника во время взрыва. Однако определение параметров процесса нагрева представляет сложную задачу, связан-

ную с резким изменением электропроводности металла при ЭВП.

Целью работы является разработка модели нагрева материала проводника в твердом, жидком и газообразном состояниях при ЭВП и определение давления ударной волны, образующейся при взрыве проводника в воде.

Модель нагрева проводника при разрядке конденсатора

Процесс нагрева проводника при ЭВП включает в себя две стадии: нагрев проводника в твердом и жидком состояниях; нагрев проводника в газообразном состоянии, который совпадает с моментом взрыва. Первая стадия нагрева происходит при возрастании тока в разрядном контуре до момента вскипания проводника.

Уравнение теплового баланса при нагреве проводника разрядным током $I = I_m \sin \omega t$ на сопротивлении R с учетом линейной зависимости сопротивления от температуры $R = R_0 \alpha t$ дает зависимость температуры T от времени τ :

$$v C_m \alpha T = R_0 \alpha I_m^2 \sin^2 \omega t d\tau, \quad (1)$$

где v – число молей материала проводника; C_m – молярная теплоемкость проводника; T – температура проводника; α – температурный коэффициент сопротивления проводника; I_m – амплитуда незатухающих колебаний тока в контуре; $\omega = 2\pi/T_k$ – циклическая частота колебаний контура с периодом колебаний T_k ; τ – время нагрева проводника от начальной температуры T_0 до температуры кипения T_k .

Оценки показывают, что взрыв проводника происходит при токе, значительно меньшем, чем амплитудный ток контура. При этом можно упростить решение, если использовать разложение функции синуса в ряд и ограничиться первым членом разложения, полагая что

$$I \approx I_m \varpi t. \quad (2)$$

Интегрируя (1) с учетом (2) находим время нагрева проводника от начальной температуры T_0 до температуры кипения T_k :

$$\tau = 3 \sqrt{\frac{3\nu C_m}{I_m^2 \varpi^2 \alpha R_0} \ln \frac{T_k}{T_0}}. \quad (3)$$

Расчет времени нагрева дает величину тока в момент вскипания проводника из (2):

$$I_k = 3 \sqrt{\frac{3\nu C_m I_m \varpi \ln \frac{T_k}{T_0}}{\alpha R_0}}. \quad (4)$$

Расчет I_k при минимальном амплитудном токе $I_m = 5 \cdot 10^4$ А, который соответствовал минимальному напряжению конденсатора $U = 2$ кВ, дает значение тока кипения $I_k = 2,58 \cdot 10^4$ А. Следовательно, выполняется условие $I_k < I_m$ и приближение (2) обосновано. При возрастании I_m , величина I_k , согласно (4), возрастает медленнее, чем I_m , поскольку $I_k \sim I_m^{1/3}$. При этом приближение (2) становится более точным. При вскипании проводника происходит резкое возрастание сопротивления токопроводящего канала. Энергия, выделяемая разрядным током и равная энергии электромагнитного поля, приводит к возрастанию температуры и давления в пароплазменной области и к образованию фронта ударной волны. Таким образом, температура пароплазменного канала в конце разряда определяется выражением:

$$T_n = T_k + \frac{LI_k^2}{2\nu C_n}, \quad (5)$$

где L – индуктивность контура, $L = 6,22 \cdot 10^{-7}$ Гн; C_n – молярная теплоемкость паров меди; $T_k = 3000$ К – температура кипения проводника из меди.

Оценим изменение сопротивления проводника при переходе в плазменное состояние. Учитывая, что проводимость плазмы при рассматриваемых условиях составляет $2 \cdot 10^{-4}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ [5], находим сопротивление плазменного столба в начале взрыва, которое составит $R_{нл} = 2,63$ Ом. Тогда время релаксации тока разряда можно найти из формулы переходного процесса

$$\tau_p = L/R = 2,35 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

За это время, начальный радиус плазменного столба $r_0 = 0,35$ мм, расширяющегося со скоростью $a \approx 1,93 \cdot 10^3$ м/с, увеличится на величину $\Delta r = a \cdot \tau_p = 4,54 \cdot 10^{-4}$ м. Давление пара в столбе разряда определяется по формуле

$$P_0 = \frac{\rho_0 R T_n}{\mu \left(1 + \frac{\Delta r}{r_0}\right)^2},$$

где ρ_0 – плотность; μ – молярная масса медного проводника.

Давление ударной волны, измеряемое датчиком, расположенным на расстоянии l от проводника, определится [3]

$$P_p = (K \cdot P_0)^{0,5} (r_0 + \Delta r) / l,$$

где $K = 2,6 \cdot 10^9$ Па, – объемный модуль упругости воды [3].

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры процесса нагрева медного проводника при электрическом взрыве в воде

U , кВ	2	4	6	8	10
I_m , кА	50	100	150	200	250
I_k , кА	27,1	33	39,5	43	46,5
T_n , 10 ³ К	20,3	30,6	39,0	47	54
P_0 , 10 ⁹ Па	4,25	6,35	8,15	9,85	11,2
P_p , 10 ⁸ Па	1,32	1,62	1,80	1,99	2,16
P_s , 10 ⁸ Па	1,571	1,662	–	1,67	–
U_n , кВ	71,2	86,2	103	113	122

Давление P_0 в зоне взрыва ЭВП удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами работы [6].

При взрыве проводника резко возрастает падение напряжения вследствие повышения сопротивления пароплазменного канала по сравнению с сопротивлением металла

$$U_n = I_k \cdot R_{нл}.$$

Это падение напряжения преодолевается ЭДС самоиндукции контура. Расчет значений U_n в зависимости от напряжения на обкладках конденсатора приведен в таблице. С повышением тока разряда и напряжения на обкладках конденсатора, напряжение на столбе дуги может достигать 10² кВ. При этом возможны шунтирующие пробои во внешней цепи, которые приводят к потере энергии взрыва. Сравнение расчетного значения давления ударной волны – P_p с экспериментальным – P_s показывает существенное расхождение, когда пиковое напряжение при взрыве превосходит 86 кВ. Такое напряжение пробивает зазоры длиной 3 см, что возможно и происходило при экспериментах.

Выводы

1. Энергия взрыва проводника определяется не запасом энергии конденсатора, а энергией электромагнитного поля в момент, предшествующий взрыву.

2. Напряжение на взрываемом проводнике в момент взрыва превышает напряжение конденсатора в 20–30 раз за счет возникновения ЭДС самоиндукции.

Перечень ссылок

1. Гидродинамика и теплофизические характеристики мощных подводных искровых разрядов / [П. И. Царенко, А. Р. Ризун, М. В. Жирнов, В. В. Иванов]. – К. : Наукова думка. – 1984. – 148 с.
2. Орешкин В. В. Применение электрического взрыва проволок для получения наноразмерных порошков / В. В. Орешкин, В. С. Седой, Л. И. Чемезова // Прикладная физика. – 2001. – № 3. – С. 94–102.
3. Кортхонджия В. П. О природе импульсного давления, создаваемого взрывом проволоки в воде / В. П. Кортхонджия, М. О. Мдивнишвили, Э. К. Саралидзе // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 11. – С. 43–46.
4. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / [Н. Б. Волков, А. Е. Майер, В. С. Седой и др.] // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – вып. 4. – С. 77–80.
5. Кулик П. П. Упругие взаимодействия и явления переноса // П. П. Кулик // Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы. – 1971. – М. : Наука. – С. 5–56.
6. Григорьев А. Н. Давление при электрическом взрыве металлических фольг / А. Н. Григорьев, А. В. Павленко // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 18. – С. 65–72.

Поступила в редакцию 31.05.2010

Лоскутов С.В., Ершов А.В., Сейдаметов С.В. Оцінка параметрів процесу електричного вибуху провідників у рідині

Розглянуто процес нагріву мідного провідника до плазмового стану при розряді конденсатора. Показано, що енергія нагріву провідника в плазмовому стані дорівнює енергії електромагнітного поля контура у момент вибуху, а ЕРС самоіндукції контура може в 20-30 разів перевищувати напругу на обкладинках конденсатора.

Ключові слова: електричний вибух провідників, плазма, ударна хвиля, гідродинамічний тиск.

Loskutov S., Ershov A., Seidametov S. Evaluation of process parameters of electric explosion of conductors in the liquid

The process of heating of the copper wire to the plasma state during the discharge of the capacitor was considered. It was shown that the energy of heating of the conductor in a plasma state is equal to the energy of the electromagnetic field of a contour at the time of the explosion, and EMF of self-induction may be 20-30 times higher than the voltage on the capacitor plates.

Key words: electrical explosion of wires, plasma, shock wave, hydrodynamical pressure.