

Краткие сообщения

12

О взрыве проволоки в воде

© В.П. Кортхонджия

Институт физики им. Э.Л. Андроникашвили АН Грузии,
0177 Тбилиси, Грузия
e-mail: kortkhonjia@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2005 г.)

Показано, что при взрыве проволоки в воде, когда имеет место экзотермическая химическая реакция, из-за выделения большого количества тепла происходит термическая ионизация продуктов реакции. Создается плотная плазма, и в системе образуется энергия, равная или большая энергии, запасенной в конденсаторной батарее вначале. Этот эффект зависит от массы на единицу длины взрывающейся в воде проволоки. Превышение энергии по сравнению с тем, что запасено в конденсаторной батарее, зависит от энергии, запасенной в конденсаторной батарее.

PACS: 52.80.Qj

Одним из удобных инструментов для фундаментальных исследований различных физических явлений при высоких плотностях энергий является электрический взрыв проволоки мощным импульсом тока [1,2]. Взрыв проволоки в жидкости может быть использован для создания импульсного давления [3,4], для синтеза наноразмерного порошка [5] и т.п.

При создании импульсного давления необходимо выяснить, насколько этот способ эффективен. Для этого надо выяснить, какая часть энергии, запасенной в конденсаторной батарее, вкладывается в разряд. Осциллографирование параметров разряда — тока и напряжения, а затем их численное интегрирование позволяют определить энергию, вложенную в разряд.

С помощью энергии, накопленной в конденсаторной батарее, когда она выделяется в проволоке, происходит ее нагрев и испарение. Этот процесс происходит очень быстро — обычно за 150–200 μs , поэтому его называют взрывом проволоки. Необходимая для этого энергия в нормальных условиях может быть определена по формуле

$$W = m[c(T_2 - T_1) + q + c(T_3 - T_2) + \lambda + \dots] + E_i,$$

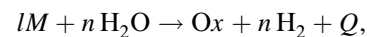
где m — масса проволоки, T_1 — начальная температура, T_2 — температура плавления, T_3 — температура испарения, c — удельная теплоемкость, q — удельная теплота плавления, λ — удельная теплота испарения, E_i — энергия ионизации. В табл. 1 приведены значения энергии, необходимой для плавления и испарения проволок из различных материалов. Физико-химические постоянные взяты из [6].

Значения энергии, необходимой для взрыва проволоки в воде, больше, чем определенные по данным табл. 1. В случае взрыва вольфрамовой проволоки массой 2.17 г в воде, согласно табл. 1, эта энергия равна 11.6, а экс-

периментальное значение — 19.5 кДж. Соответствующие цифры при взрыве молебденовой проволоки массой 0.3 г в воде 2.25 и 6.55 кДж. Что касается Ti, то мере нагрева металл вступает в интенсивную химическую реакцию, взрыва проволоки не происходит, взрываются продукты химической реакции [7].

Следует выделить взрыв проволоки в жидкости, когда происходит химическая реакция между металлом и жидкостью, в которой произошел взрыв [2,7]. При взрыве проволоки в воде образуются оксиды металлов и выделяется большое количество тепла — эти реакции экзотермические.

В общем случае химические реакции имеют вид



где M — масса взрывающейся проволоки, Ox — масса оксида, Q — теплота реакции.

Можно определить объем воды, который входит в химическую реакцию. Этот объем заполняется продуктами химической реакции

$$V_{H_2O} = \frac{l}{n} \frac{\rho_M V_M}{M_M} \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{l}{n} \frac{\rho_M}{M_M} \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} V_M,$$

ρ_M — плотность взрывающейся проволоки, ρ_{H_2O} — плотность воды, M_{H_2O} — молекулярный вес воды, M_M — молекулярный вес взрывающейся проволоки, V_M — объем проволоки.

В [7] было показано, что при взрыве проволоки в воде в разряд вкладывается энергии больше, чем запасено в конденсаторной батарее. Если в конденсаторной батарее запасена энергия E_0 (E^Σ — энергия, полученная в результате численного интегрирования осциллограмм

Таблица 1.

Элементы	Al ²⁷	Cu ⁶⁴	Ti ⁴⁸	Mo ⁹⁶	W ¹⁸⁴	Ta ¹⁸¹
Плотность ρ , g · cm ⁻³	2.7	8.9	4.5	9.01	18.6–19.1	16.6
Температура плавления T_2 , °C	660	1083	1668	2625	3380	2996
Температура испарения T_3 , °C	2447	2595	3280	4800	5530	5400
Удельная теплота плавления, $q \cdot 10^3$ J · g ⁻¹	0.385	0.205	0.323	0.287	0.191	0.173
Удельная теплота испарения, $\lambda \cdot 10^3$ J · g ⁻¹	9.22	4.82	9.0	6.19	4.34	4.16
Теплоемкость c_p , J · g ⁻¹ K ⁻¹	0.9	0.39	0.93	0.25	0.135	0.14
Энергия, необходимая для расплавления и испарения W , kJ	11.78m	5.18m	11.3m	7.68m	5.27m	5.08m

тока и напряжения разряда, то, как правило,

$$\Delta E = E^\Sigma - E_0 > 0,$$

и это не может быть объяснено преобразованием тепловой энергии экзотермических химических реакций в электрическую, по крайней мере теми значениями этих теплот, которые известны автору.

Выделение в объеме взрыва теплоты экзотермических химических реакций приводит к термической ионизации продуктов реакции, поскольку температура порядка 10⁴ К. Образуется плотная плазма, которая поляризуется и подзаряжает конденсаторную батарею до напряжения, равного или большего, чем его значение вначале. В результате в системе образуется энергия, которая больше или равна энергии, запасенной в конденсаторной батарее [7]. Численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения разряда дает значения, сопоставимые с энергией системы, которую она приобрела после взрыва проволоки. Этот эффект зависит от массы на единицу длины взрывающейся проволоки. В случае взрыва в воде молибденовой проволоки с массой $m = 0.44$ г эффект имеет место, а при $m = 0.22$ г эффект отсутствует — численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения разряда дает значение энергии, равное энергии, запасенной в конденсаторной батарее (рис. 1). То же происходит при взрыве вольфрамовой проволоки в воде.

Представляет интерес выяснить зависимость энергии $\Delta E = E^\Sigma - E_0$.

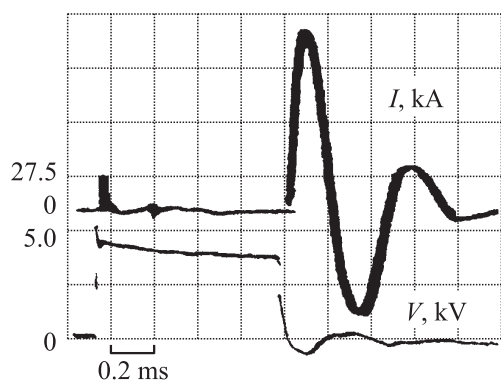


Рис. 1. Взрыв молибденовой проволоки в воде, $m = 0.22$ г, $V = 5$ кВ.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока и напряжения разряда при взрыве вольфрамовой проволоки в воде. То же самое происходит при взрыве молибденовой проволоки в воде. Следовательно, эта энергия растет с ростом энергии, запасенной в конденсаторной батарее.

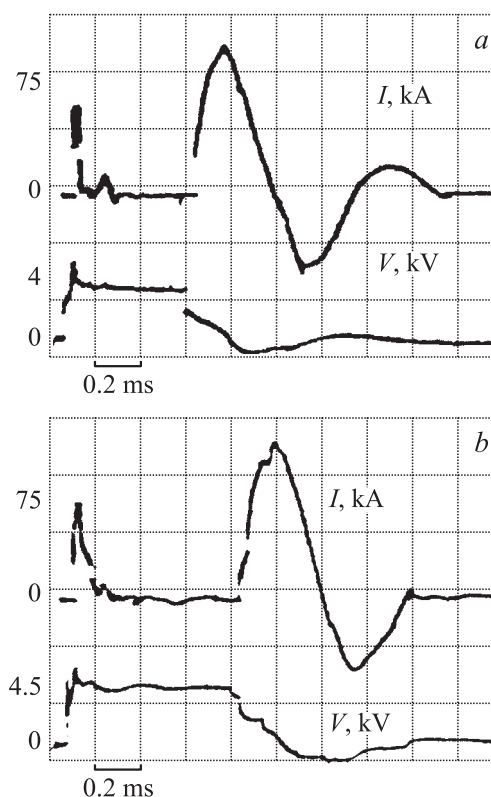


Рис. 2. Взрыв вольфрамовой проволоки в воде, $m = 2.17$ г. а — $E_0 = 24.0$, $\Delta E = 36.8$; б — $E_0 = 30.4$, $\Delta E = 47.02$ кДж.

Была взорвана вольфрамовая проволока в воздухе. На рис. 3 приведены осциллограммы тока и напряжения разряда, их численное интегрирование дает $E^\Sigma = 30.0$ кДж до $t = 0.4$ мс, когда напряжение обращается в нуль. Этот результат отличается от того, что имеет место при взрыве той же проволоки в воде. Как в случае взрыва в воде, при взрыве в воздухе имеют место химическая реакция и поляризация плазмы. Но при взрыве в воде происходят другие явления, чем и вызвана разница между этими двумя результатами.

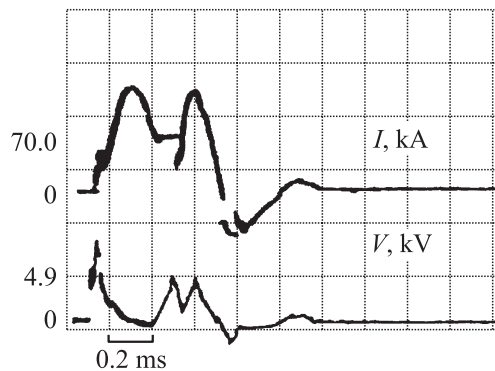


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения взрыва вольфрама в воздухе.

Были проведены масспектрографический, как это было в [8], и нейтронноактивационный анализы порошка, полученного после взрыва в воде медной, вольфрамовой и свинцовой проволок.

Зная объем воды, вступившей в химическую реакцию, и ΔE , можно определить плотность электрической энергии в объеме взрыва (табл. 2).

Таблица 2.

Элемент	Плотность энергии, J/cm^3
Al	$0.7 \cdot 10^5$
W	$2.5 \cdot 10^5$
Mo	$6.2 \cdot 10^5$
Ta	$1.2 \cdot 10^5$

Из осциллограмм может быть определена плотность плазмы. На осциллограммах напряжения разряда четко видно, что после взрыва проволоки в воде напряжение разряда уменьшается на величину, необходимую для расплавления и испарения проволоки, а затем благодаря поляризации плазмы напряжение подрастает до величины, равной или большей начального напряжения. Этот рост напряжения, например в случае взрыва вольфрамовой проволоки в воде, составляет $\Delta V = 1.2 \text{ kV}$.

С другой стороны,

$$\Delta V = \frac{q}{C} = \frac{N_e e}{C},$$

C — емкость конденсаторной батареи, N_e — число ионов, e — заряд электрона. Плотность плазмы

$$n_e = \frac{N_e}{V_{tot}} \approx 3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3},$$

где $V_{tot} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_M$. Плотность нейтралов $n \approx 4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.

Если предположить, что выделившаяся в объеме взрыва проволоки энергия ΔE переходит в тепло, то можно оценить температуру плазмы

$$T_e \approx \frac{\Delta E}{V_{tot}} \frac{1}{n_e k} \approx 4 \cdot 10^7 \text{ K}.$$

Таким образом, при взрыве проволоки в воде:

— в разряде выделяется больше энергии, чем запасено в конденсаторной батарее. Эта энергия растет с ростом энергии, запасенной в конденсаторной батарее;

— эффект выделения большей энергии, чем запасено в конденсаторной батарее, имеет пороговый характер. Если масса на единицу длины взрывающейся в воде проволоки меньше определенного значения, в разряде выделяется та же энергия, что запасена в конденсаторной батарее;

— плотность энергии, выделившейся в объеме взрыва проволоки в воде, высокая и составляет примерно $3 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$;

— при взрыве проволоки в воздухе отсутствует эффект выделения большей энергии, чем запасено в конденсаторной батарее. Он связан исключительно со взрывом проволоки в воде.

Автор приносит благодарность проф. З. Саралидзе, доктору физ.-мат. наук В. Бережаниани за конструктивную критику и полезную дискуссию.

Список литературы

- [1] Бондаренко В.В., Кварицхава И.Ф., Плюто А.А., Чернов А.А. // ЖЭТФ. 1955. Т. 1. Вып. 1. С. 221–231.
- [2] Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе, И.С. Шпигеля. Пер. с англ. М.: Мир, 1965. С. 239–259.
- [3] Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Тактакишвили М.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 41–43.
- [4] Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 13. С. 10–14.
- [5] <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIIIPT/15e-Sedoi.doc>.
- [6] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1005 с.
- [7] Кортхонджия В.П. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 19. С. 13–20.