

01;03;12

О природе импульсного давления, создаваемого взрывом проволоки в воде

© В.П. Кортхонджия, М.О. Мдивнишвили, З.К. Саралидзе

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

(Поступило в Редакцию 6 сентября 2005 г. В окончательной редакции 28 апреля 2006 г.)

Показано, что при взрыве проволоки в воде из-за наличия химической реакции между взрывающейся проволокой и водой источником импульсного давления являются продукты химической реакции. Зависимость амплитуды импульсного давления от массы взрывающейся проволоки удовлетворительно описывается законами идеального газа.

PACS: 52.80.Qj

Введение

Одним из способов создания импульсного давления является взрыв проволоки в жидкости [1–3]. Жидкость при этом служит средой, передающей давление, созданное в результате взрыва проволоки в центре сосуда. Этот способ позволяет использовать напряжения V порядка нескольких киловольт. Масса взрывающихся проволок выбирается из энергии, накопленной в конденсаторной батарее E_0 . При взрыве проволоки в воде, как правило, имеет место химическая реакция между водой, заполняющей объем, и продуктами взрыва.

При взрыве проволоки в воде, когда энергия, запасенная в конденсированной батарее, порядка или больше энергии испарения, развивается магнитогиродинамическая неустойчивость типа перетяжки. Дальше возникает дуговой разряд [4,5], проволока испаряется, и развивается импульсное давление.

Развитие магнитогиродинамической неустойчивости типа перетяжки хорошо прослеживается на фотографиях, полученных с помощью сверхскоростного фоторегистратора (СФР-граммах), в частности на СФР-граммах взрыва алюминиевой проволоки в воде [6].

В случае взрыва медной проволоки в воде, как это видно по осциллограмме тока разряда (верхняя осциллограмма) и напряжения разряда (нижняя осциллограмма), в оптимальных условиях [2], энергия конденсаторной батареи используется полностью, конденсаторная батарея разряжается целиком (рис. 1).

Взрыв проволоки в жидкости, когда ее материал входит в химическую реакцию с жидкостью, имеет свои особенности. На осциллограммах тока и напряжения, в частности взрыва алюминия в воде [6], видно, что после взрыва проволоки с некоторой задержкой, а если разрядное напряжение достаточно, без задержки, ток проходит по продуктам химической реакции, т.е. они тоже взрываются [7] (рис. 2).

В этом случае давление развивается в основном в результате химической реакции, и длительность импульса давления намного больше длительности взрыва самой проволоки.

На рис. 3 для примера приведены осциллограммы тока разряда и импульсного давления при взрыве в воде танталовой проволоки диаметром 0.5 и длиной 250 мкм. Аналогичные осциллограммы наблюдаются при взрыве Al, Mo, W и др.

Длительность импульсного давления от длины и диаметра взрывающихся проволок не зависит. Как видно из приведенной осциллограммы тока разряда, длительность его при взрыве в воде тантала ≈ 0.15 мс. Что касается длительности импульсного давления, то она составляет ≈ 1 мс. В случае взрыва, например, алюминия в воде наблюдается взвесь Al_2O_3 в воде, и сосуд с жидкостью заметно греется — происходит экзотермическая химическая реакция.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости амплитуды импульсного давления на стенках сосуда от параметров эксперимента: от массы взрывающейся в воде алюминиевой проволоки, диаметра сосуда, в котором происходит взрыв, и установление природы создания импульсного давления. Приведен расчет импульсного давления, развиваемого при этом.

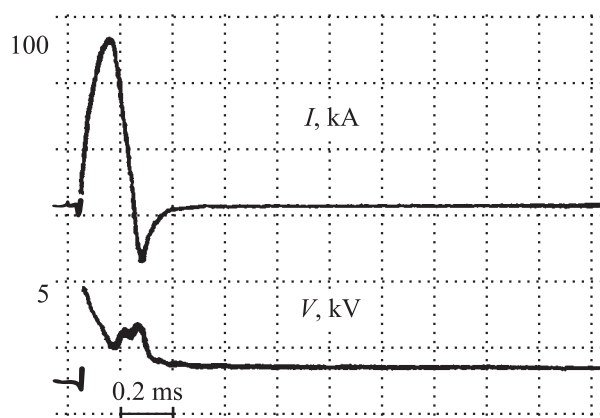


Рис. 1. Взрыв медной проволоки в воде. Напряжение, до которой была заряжена конденсаторная батарея, $V = 5$ кВ, $E_0 = 22.5$ кДж. Масса проволоки $m = 4.38$ г.

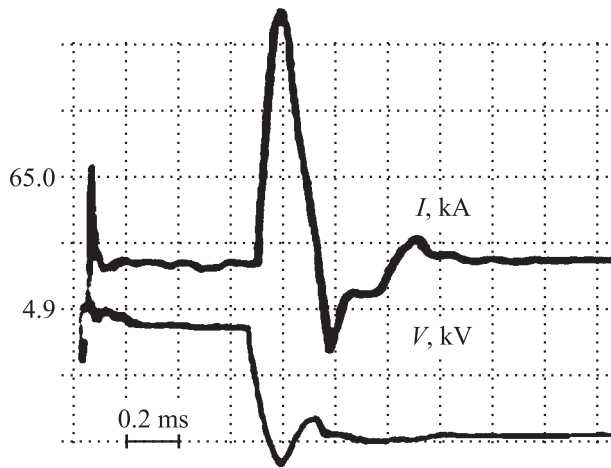


Рис. 2. Взрыв алюминиевой проволоки в воде. $V = 4.9 \text{ kV}$, $E_0 = 25.2 \text{ kJ}$, $m = 0.12 \text{ g}$.

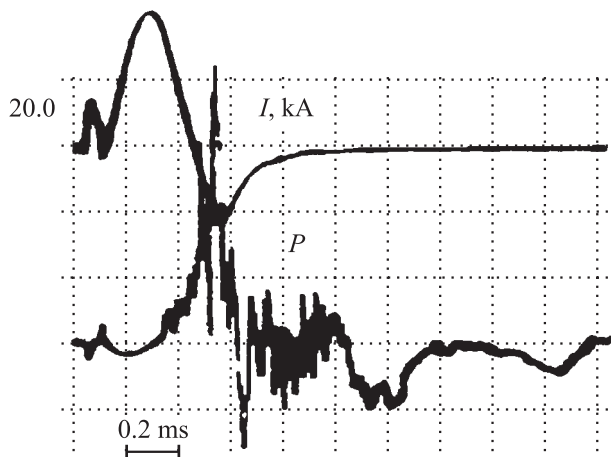


Рис. 3. Взрыв танталовой проволоки в воде. $V = 5 \text{ kV}$, $E_0 = 22.5 \text{ kJ}$, $m = 0.8 \text{ g}$.

Амплитуда импульсного давления может быть измерена разными способами [8,9]. Приведенные в данном сообщении значения амплитуд измерены крешером [8]. Крешер представляет собой металлический, обычно медный, цилиндр. Под действием давления крешер испытывает деформацию, которая почти линейно зависит от давления. Сначала строится график зависимости абсолютного или относительного изменения высоты металлического цилиндра от известного статического давления. Затем этот график используется для определения амплитуды импульсного давления по изменению высоты крешера под действием импульсного давления.

Импульсное давление определялось также по диаметру следа, который оставляет стальной шарик при его вдавлении под действием импульсного давления в алюминиевую пластину. Так же как для измерений крешером, вначале строится калибровочный график зависимости диаметра следа от известного статического давления.

Для того чтобы установить, насколько такое измерение амплитуды импульсного давления корректно, одновременно с крешером амплитуда импульсного давления определялась пьезодатчиком [8]. Он использовался для осциллографирования импульсного давления. Чтобы предотвратить разрушение пьезоэлемента от импульсных ударов, он помещался в обойме, в которой последовательно располагались металл с малой жесткостью–пьезоэлемент–металл с малой жесткостью. Пьезоэлемент градуировался обычным способом [8]. В таблице приведены результаты измерений в случае взрыва медной проволоки в воде.

Диаметр проволоки d , mm	Измеренное крешером давление P_{cr} , 10^5 Pa	Измеренное пьезодатчиком давление P_{pz} , 10^5 Pa	Напряжение с пьезодатчика U_{pz} , V	$\frac{P_{cr}}{P_{pz}}$
0.5	300	299	64	1.0
0.8	440	470	100	0.94
1.1	540	523	126	1.03
1.2	600	607	130	0.99

Как видно из таблицы, измеренные крешером амплитуды импульсного давления с приемлемой точностью совпадают со значениями, которые дает пьезодатчик. Давление измерено у внутренней стенки сосуда диаметром d , в котором взрывается медная проволока диаметром d_0 . Как показывают измерения, амплитуда импульсного давления обратно пропорциональна диаметру сосуда. В пределах погрешности измерений эта зависимость может быть описана соотношением

$$P = \chi \frac{d_0}{d}, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности χ зависит от природы взрывающейся проволоки, жидкости, в которой происходит взрыв, и других параметров, характеризующих процесс взрыва.

Если задать, что энергия, запасенная в конденсаторной батарее, достаточна для испарения и полной атомизации материала проволоки во время взрыва, то давление, развиваемое после взрыва проволоки, может быть оценено по уравнению Клапейрона

$$P_0 = \frac{\rho}{M} RT_0, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала проволоки, M — его молекулярный вес, R — универсальная газовая постоянная, T — температура.

Если считать, что в момент взрыва мгновенно образовавшийся пар занимает объем, первоначально занимаемый проволокой

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} l, \quad (3)$$

где l — длина проволоки, то можно положить, что ρ совпадает с плотностью твердого металла. Далее, если

за T взять температуру испарения металла, то в случае меди для P_0 можно получить оценку

$$P_0 = 3.3 \cdot 10^9 \text{ Па.} \quad (4)$$

В последующем происходит расширение металлического пара за счет сжатия жидкости, пока его давление не будет уравновешено давлением, возникшим в жидкости. Предполагая, что этот процесс протекает без теплообмена с жидкостью и он описан уравнением состояния идеального газа, получим

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P}{T} (V_0 + \Delta V), \quad (5)$$

где P — давление после расширения, ΔV — изменение объема пара. Поскольку давление в жидкости возникает за счет сжатия, конечное давление газа P , уравновешенное давлением жидкости, можно выразить в виде

$$P = K \frac{\Delta V}{V}, \quad (6)$$

где $V = \frac{\pi d^2}{4} l$ — первоначальный объем жидкости, d — внутренний диаметр сосуда с жидкостью ($d \gg d_0$), в котором происходит взрыв проволоки, а K — объемный модуль упругости жидкости.

Подставив (6) в (5), для ΔV получим квадратное уравнение, решение которого с учетом положительного знака ΔV в (5) можно записать в виде

$$\Delta V = \frac{V_0}{2} \left[\left(1 + \frac{4P_0 V T}{K V_0 T_0} \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (7)$$

и для давления, возникающего в жидкости, получим выражение

$$P = \frac{2P_0}{1 + \left[1 + \frac{4P_0 T}{K T_0} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \right]^{1/2}} \frac{T}{T_0}. \quad (8)$$

Если положить, что

$$\frac{4P_0 T}{K T_0} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \gg 1, \quad (9)$$

то из (8) получим линейную зависимость P от безразмерного параметра $\frac{d_0}{d}$:

$$P = (K P_0)^{1/2} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \frac{d_0}{d}, \quad (10)$$

которая хорошо соответствует экспериментально наблюдаемой зависимости.

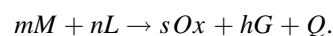
Из условия отсутствия теплообмена (работу на сжатие жидкости пар совершает за счет своей внутренней энергии), учитывая, что неравенство (9) соответствует условию $\Delta V \gg V_0$, можно получить, что отношение

$\frac{T}{T_0} \approx 1$. Поэтому в рамках использованной в эксперименте отношений $\frac{d}{d_0}$ модели, которая является довольно грубой, можно считать $\frac{T}{T_0} = 1$ и

$$P(d, d_0) = (K P_0)^{1/2} \frac{d_0}{d}. \quad (11)$$

Используя для объемного модуля упругости воды его среднее значение, характерное для давлений $(300-900) \cdot 10^5 \text{ Па}$, $K = 2.6 \cdot 10^9 \text{ Па}$ (9) и полученную нами оценку для меди $P_0 = 3.3 \cdot 10^9 \text{ Па}$ (4), можно убедиться, что для использованных в эксперименте отношений $\frac{d}{d_0}$ условие (9) всегда выполняется, а коэффициент перед $\frac{d}{d_0}$ больше единицы (d много больше d_0).

Все проволоки, с которыми экспериментировали авторы (Cu, Al, W, Mo, Ti, Ta), при взрыве в воде входят в химическую реакцию с ней. В общем виде эта реакция может быть представлена так [2]:



Взаимодействие m атомов металла M с n молекулами жидкости L приводит к образованию s молекул соединения Ox и h молекул газа G (Q — теплота реакции).

Когда взрывается алюминиевая проволока в воде, температура алюминиевого пара может достигать 3000 К. При этом, как показывает анализ, преимущественно протекает реакция



$Q = -1680 \text{ кДж/м}$ [10].

Импульсное давление при наличии химической реакции в основном создается продуктами реакции [6].

На рис. 4 (черные кружки) приведены экспериментальные результаты измерения зависимости амплитуды импульсного давления от массы (диаметр d_0 менялся от 1.0 до 1.8 мм) алюминиевой проволоки длиной 320 мм, взрывающейся в воде.

Поскольку известна масса алюминия, можно рассчитать все параметры химической реакции: массу и объем воды, с которой провзаимодействовал алюминиевый пар, массу и объем продуктов реакции, температуру и давление, которое они развивают. Ниже приводятся данные расчета. Температура и давление, развиваемые продуктами реакции, приблизительно равны

$$T \approx 7.8 \cdot 10^3 \text{ К},$$

$$P_0^{H_2} \approx 2.6 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$P^{Al_2O_3} \approx 0.88 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Здесь приведены значения давления продуктов реакции, образующихся в результате химической реакции. Давление создается в центре сосуда с водой в результате взрыва алюминия. Эти величины рассчитаны с использованием уравнения Клайперона. Давление продуктов реакции развивается в цилиндре, объем которого определяется количеством воды, вошедшим в реакцию и объемом

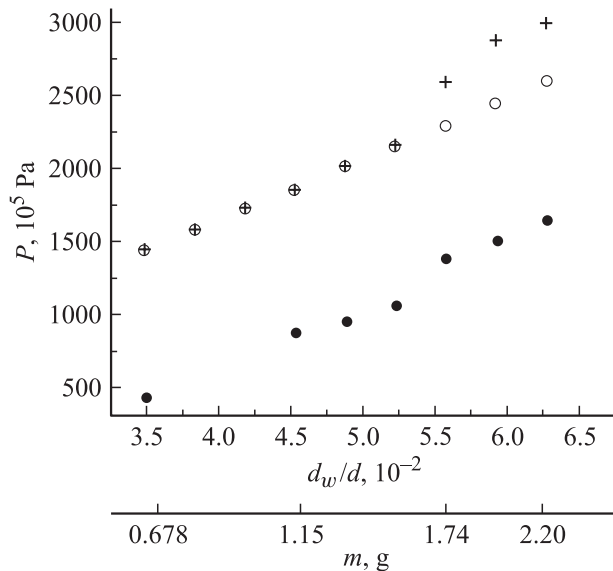


Рис. 4. Зависимость импульсного давления при взрыве алюминиевой проволоки в воде от массы m, g и величины $\frac{d_w}{d_0} = \frac{1.924}{d} d_0$.

взрывающейся проволоки. Диаметр основания цилиндра d_w , занимаемого водой в количестве, необходимом для химической реакции, и взрывающейся проволокой диаметром d_0 , определяется следующим образом. Число атомов взрывающегося алюминия и число молекул воды, входящих в химическую реакцию связаны друг с другом соотношением

$$\frac{\pi d_0^2 l}{4} \frac{\rho_{Al}}{M_{Al}} N_A = \frac{n}{m} \frac{d_w^2 - d_0^2}{4} l \frac{\rho_{H_2O}}{M_{H_2O}} N_A,$$

где l — высота цилиндра, N_A — число Авогадро, ρ_{Al} и ρ_{H_2O} — плотности алюминия и воды, а M_{Al} и M_{H_2O} — их молекулярные веса соответственно. Из последнего соотношения можно найти связь между d_w и d_0

$$d_w = \frac{(\rho_{Al}/M_{Al} + 3/2\rho_{H_2O}/M_{H_2O})^{1/2}}{3/2\rho_{H_2O}/M_{H_2O}} d_0. \quad (12)$$

Давление у стенки камеры (экспериментально измеряется именно оно) может быть рассчитано при сделанных выше допущениях. Получаются соотношения

$$P_1 = (KP_0^{H_2})^{1/2} \frac{d_w}{d}, \quad (13)$$

$$P_2 = (KP_0^{Al_2O_3})^{1/2} \frac{d_w}{d}. \quad (14)$$

На рис. 4 светлыми кружками нанесены рассчитанные значения амплитуды суммарного импульсного давления продуктов химической реакции $P = P_1 + P_2$ при $K = 2.8 \cdot 10^9$ Па, когда в воде взрывается алюминиевая проволока. Крестики соответствуют учету зависимости K от величины давления [9]. Выше 10^8 Па значения K получены аппроксимацией его значений.

Сравнение экспериментальных результатов с расчетными показывает, что формулы (13) и (14) качественно хорошо описывают наблюдаемую зависимость $P = P(d, d_0)$. Количественное расхождение может быть связано с тем, что

— в расчетах использовались значения теплоемкостей продуктов химической реакции для $T \approx 1800$ К и атмосферного давления, тогда как в эксперименте реализуются гораздо большие значения этих параметров. При больших значениях теплоемкостей уменьшатся величины расчетных значений температуры продуктов реакции и давлений, создаваемых ими в центре сосуда. Это приведет к уменьшению расчетного значения суммарной амплитуды импульсного давления. В результате этого давления, рассчитанные по (13) и (14), станут ближе к экспериментальным значениям амплитуды импульсного давления;

— возможно, не весь алюминий успевает прореагировать с водой, что естественно приведет к меньшим значениям амплитуды импульсного давления.

При взрыве проволоки в жидкости создается импульсное давление. Взрывающаяся проволока входит в химическую реакцию с жидкостью. Импульсное давление в основном создается продуктами химической реакции. В дальнейшем это импульсное давление посредством окружающей жидкости, в которой произошел взрыв проволоки, передается стенкам сосуда. Ввиду того что химическая реакция является процессом более медленным, чем электрический взрыв проволоки, длительность импульсного давления в случае наличия химической реакции определяется ее скоростью а не длительностью разрядного тока, и может составлять несколько миллисекунд. Пример этого — взрыв алюминия, вольфрама, тантала и т.п. в воде.

Список литературы

- [1] Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 401 с.
- [2] Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Тактакишвили М.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 41–43.
- [3] Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе и И.С. Шпингеля. М.: Мир, 1985. С. 239–259.
- [4] Абрамова К.Б. Златин Н.А., Перегуд Б.П. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. В. 6 (12). С. 207–282.
- [5] Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 343 с.
- [6] Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 13. С. 10–14.
- [7] Кортхонджия В.П. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 19. С. 13–20.
- [8] Гольке В. // Физика быстротекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 69.
- [9] Комельков В.С., Синицын В.И. // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Изд. АН СССР, 1958.
- [10] Таблицы физических величин / Под ред. ак. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.