

03;04;12

О создании импульсного давления в жидкости с помощью металлической плазмы и измерении его некоторых характеристик

© В.П. Кортхонджия, М.О. Мдивнишвили, М.И. Тактакишвили

Институт физики АН Грузии,
380077 Тбилиси, Грузия

(Поступило в Редакцию 20 ноября 1997 г. В окончательной редакции 1 июня 1998 г.)

Представлены экспериментальные исследования некоторых характеристик импульсного давления, создаваемого в жидкости с помощью металлической плазмы. Обсуждается вопрос увеличения длительности импульсного давления при помощи плазмохимической реакции.

Импульсное давление в жидкости может быть создано многими способами [1–4]: при помощи взрывчатых веществ, искрового разряда, электрогидравлического эффекта и др. Особый интерес представляет взрыв проводника в жидкости, так как а) при этом не требуются большие напряжения, что дает возможность создавать импульсные давления в полости сравнительно малых размеров, б) легко создать пространственный профиль давления, в) способ дешевый и технически легко реализуемый.

В настоящей работе ставилась задача исследования некоторых характеристик импульсного давления, создаваемого в жидкости металлической плазмой при больших значениях энергии конденсаторной батареи, вкладываемой во взрываемую проволоку. Изучены два режима этого процесса: 1) создание импульсного давления с помощью взрыва проволоки, материал которой не входит в плазмохимическую реакцию с жидкостью, заполняющей объем; 2) создание импульсного давления, когда материал взрываемой проволоки входит в плазмохимическую реакцию с жидкостью, в которой происходит взрыв.

Импульсное давление в жидкости с помощью взрыва проволоки создается следующим образом: в полости, заполненной слабосжимающейся, нейтральной жидкостью, с помощью изоляторов протягивается проволока (медь, алюминий и т.п.). На нее подается мощный импульс электротока, в результате чего проволока плавится, испаряется и создается металлическая плазма, которая характеризуется [5] высокой температурой, большим количеством частиц $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и высоким давлением. Это давление металлической плазмы посредством жидкости, заполняющей полость, передается ее стенкам.

На рис. 1, а приведена осциллограмма тока импульсного разряда в случае взрыва в воде медной проволоки. Видно, что за время порядка 0.2 мс вся энергия конденсаторной батареи расходуется на взрыв медной проволоки. При этом должны быть выполнены определенные условия, о которых речь пойдет ниже.

Созданное в результате взрыва проволоки импульсное давление измерялось двумя способами: крешерами [6] и пьезодатчиком [7,8]. Крешер представляет собой металлический цилиндр, который помещается в металлическом отростке, приваренном к трубе. Принцип

измерения давления при помощи крешера заключается в том, что деформация, которую испытывает крешер под действием давления, пропорциональна этому давлению. Чтобы использовать крешер для измерения импульсного давления, его необходимо предварительно отградуировать. Градуировка производится статическим давлением для нескольких крешеров из одной партии, изготовленной из одной заготовки. Это необходимо для уменьшения погрешности последующих измерений. При градуировке строится график зависимости абсолютного $l = l_0 - l_1$ или относительного изменения длины крешера под воздействием статического давления известной величины. Здесь l_0 — начальная длина крешера, l_1 — его длина после деформации. Этот график используется впоследствии для определения амплитуды импульсного давления по деформации крешеров.

Пьезодатчик дает возможность проследить за временным ходом импульсного давления. На рис. 1, б приведена осциллограмма импульсного давления, полученная при взрыве медной проволоки диаметром 1.5 мм и длиной 300 мм в трубе диаметром 500 мм, заполненной водой. После первого пика, соответствующего взрыву проволоки, наблюдается несколько пиков с меньшей амплитудой. Они связаны с многократными отражениями волн от стенок сосуда и хорошо разрешаются пьезодат-

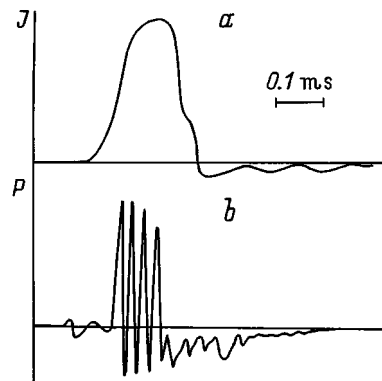


Рис. 1. Взрыв медной проволоки в воде. Энергия, запасенная в конденсаторной батарее, 22.5 кДж, диаметр проволоки 1 мм, длина проволоки 30 см; а — осциллограмма тока разряда, б — осциллограмма давления, максимум давления равен $\sim 10^8$ Па.

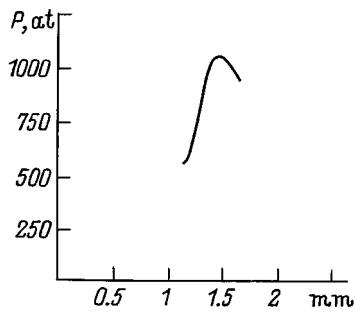


Рис. 2. Зависимость амплитуды импульсного давления от диаметра проволоки длиной 30 см. Материал — медь, энергия конденсаторной батареи 22.5 кДж.

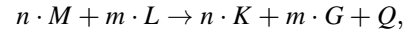
чиком. Длительность пика давления, созданного взрывом медной проволоки, порядка $30 \mu\text{s}$. Пьезодатчик градуировался с помощью крешера, фиксирующего амплитуду импульсного давления. Зависимость импульса напряжения с пьезодатчика, возникающего под воздействием импульсного давления, от величины этого давления в той конструкции пьезодатчика, которая нами использовалась, линейна до $7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Конструкция пьезодатчика представляла собой обойму, в которой располагались последовательно мягкий металл–пьезоэлемент–мягкий металл. Такая конструкция предохраняла пьезоэлемент от разрушения при измерении импульсного давления в слабосжимающейся жидкости.

Эксперименты по созданию импульсного давления с помощью взрыва проволоки показали, что существуют оптимальные условия, при которых развивается максимальное давление. На рис. 2 приведена зависимость величины импульсного давления, полученного при взрыве медной проволоки от диаметра взрывающейся проволоки при заданных ее длине и энергии конденсаторной батареи. Видно, что при взрыве проволоки длиной 300 мм в случае фиксированной энергии конденсаторной батареи 22.5 кДж максимальная величина импульсного давления получается, когда диаметр медной проволоки равен 1.4 мм. Таким образом, параметры данного эксперимента для диаметра проволоки 1.4 мм оптимальны для получения максимальной величины импульсного давления.

В [9,10] определены условия, обеспечивающие максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке при подводном электрическом взрыве проводников. Приведена формула для вычисления оптимального диаметра взрывающейся проволоки. Оценка по этой формуле диаметра медной проволоки в оптимальных условиях нашего эксперимента дает значение, которое в пределах 10% согласуется с экспериментально наблюдаемым.

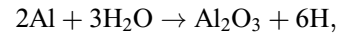
Необходимо отметить особенности взрыва проволоки некоторых материалов в жидкости, при котором образованная металлическая плазма входит в плазмохимическую реакцию с жидкостью. В общем виде плаз-

мохимическую реакцию можно представить следующим образом:



т.е. взаимодействие n атомов металла M с m молекулами жидкости L приводит к образованию n молекул соединения K , m атомов газа G и при этом выделяется энергия Q — реакция экзотермическая. Вышеприведенная реакция интересна по двум соображениям. Во-первых, образовавшийся газ G развивает дополнительное давление, которое складывается с давлением, развиваемым металлической плазмой. Во-вторых, имеющая место плазмохимическая реакция в некотором роде подобна процессу взрыва ВВ, и длительность импульса давления оказывается больше, чем при взрыве проволоки, плазма вещества которой не входит в реакцию с жидкостью.

Иллюстрацией к вышесказанному служит взрыв алюминия, циркония [11] и титана в воде. В частности, когда взрывается алюминиевая проволока, температура алюминиевого пара достигает 3000 К и могут протекать реакции



В результате этих реакций на один атом алюминия приходится три атома водорода и выделяется тепло. Образовавшийся водород развивает давление, суммирующееся с давлением алюминиевой плазмы. Кроме того, по указанной выше причине, длительность импульса давления больше, чем в случае взрыва медной проволоки, плазма которой не входит в химическую реакцию с водой. Это видно из таблицы.

Материал проволоки	Cu	Al
Жидкость, заполняющая полость	H ₂ O	H ₂ O
Диаметр полости, мм	50	50
Диаметр проволоки, мм	1	1
Длина проволоки, мм	230	230
Амплитуда давления, 10^5 N/m^2	560	1100
Длительность импульса давления, ms	0.18	1.0

Взрыв проволоки сопровождается интенсивным ультрафиолетовым излучением, которое может ионизировать образовавшуюся парогазовую смесь. В результате этого может произойти электрический пробой смеси, причем чем больше напряжения остается на разрядном промежутке после взрыва проволоки, тем раньше произойдет электрический пробой парогазовой смеси. Ниже приведены осциллограммы тока и напряжения взрыва алюминиевой проволоки. Рис. 3,а соответствует взрыву алюминиевой проволоки диаметром 1 мм и длиной 100 мм при разрядном напряжении 4 кВ. Оставшееся после взрыва проволоки на разрядном промежутке напряжение недостаточно для электрического пробоя парогазовой смеси. С увеличением напряжения пробоя парогазовой смеси происходит после определенной паузы, связанной с тем, чтобы давление понизилось до

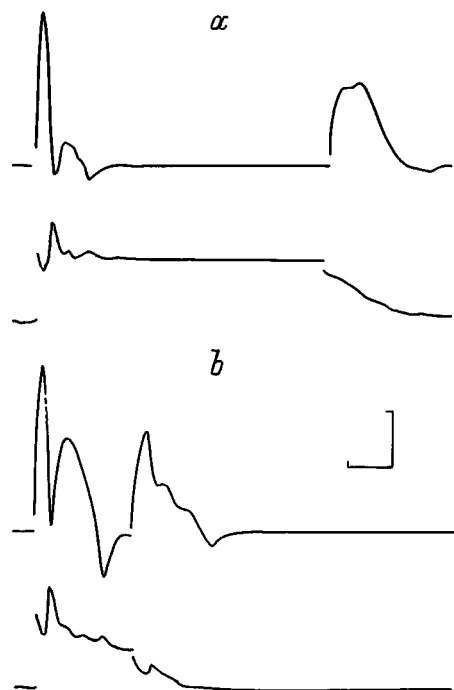


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда (вверху) и взрыва (внизу) алюминиевой проволоки диаметром 1 mm и длиной 30 cm в воде: *a* — взрыв при напряжении 4 kV, *b* — при 5 kV.

значения, при котором может произойти пробой. Из осциллограммы на рис. 3, *b*, полученной при напряжении 5 kV, видно, что импульс разрядного тока — левая часть верхнего луча и импульс, связанный с пробоем парогазовой смеси, почти слились, а осциллограмма напряжения — нижний луч указывает на то, что вся энергия, запасенная в конденсаторной батарее, израсходовалась на взрыв алюминиевой проволоки диаметром 1 mm и длиной 100 mm и на электрический пробой парогазовой смеси. Последний в свою очередь создает дополнительный импульс давления. Необходимо отметить, что поскольку вода нагревается до высокой температуры и она частично диссоциирована, то образовавшийся из-за плазмохимической реакции избыток атомарного водорода и кислород в последующем также взрываются.

В заключение приведем некоторые выводы. При создании импульсного давления в жидкости с помощью металлической плазмы можно генерировать короткие (длительностью 25–30 μ s) импульсы давления.

Если металлическая плазма входит в плазмохимическую реакцию с жидкостью, то из-за образования газа в результате плазмохимической реакции можно получить амплитуду импульсного давления, по крайней мере в два раза превосходящую амплитуду давления, получаемую при взрыве проволоки в жидкости, когда плазмохимическая реакция не имеет места.

Если металлическая плазма входит в плазмохимическую реакцию с жидкостью, то при этом длительность

импульса давления в несколько раз больше, чем в отсутствие плазмохимической реакции.

При электрическом разряде в воде 50% энергии идет на диссоциацию воды [1] и только остальное — на создание импульсного давления. По нашим данным, при создании импульсного давления с помощью металлической плазмы при оптимальных условиях эксперимента почти вся энергия конденсаторной батареи, за исключением энергии, идущей на нагрев подводных проводов, срабатывание разрядника и т. п., идет на создание импульсного давления.

Авторы приносят благодарность Н.А. Кервалишвили, Г.И. Сурамлишвили, М.К. Лорткипанидзе, Г.П. Цикаришвили за интерес к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 259 с.
- [2] Дорофеев С.А. Электрогидравлический эффект и его применение. Киев: Наукова думка, 1961. 311 с.
- [3] Демина В.М., Шкатов А.А. Физические основы электрического взрыва. Киев: Наукова думка, 1983. 352 с.
- [4] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его промышленное применение. Л.: Машиностроение, 1986.
- [5] Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича и др. М.: Машиностроение, 1973. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И. Морозова. Минск, 1974.
- [6] Гольке В. Физика быстротекущих процессов. М.: Мир, 1971. Т. II. С. 69.
- [7] Комельков В.С., Синицын В.И. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
- [8] Кедринский В.К., Солоухин Р.И. // ПМТФ. 1961. № 1. С. 27.
- [9] Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
- [10] Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 401 с.
- [11] Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе, И.С. Шпигеля. Пер. с англ. М.: Мир, 1965. С. 239–259.