

03;04

Волна давления при наносекундном электрическом взрыве вольфрамового проводника в воде

© А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, В.Н. Афанасьев,
И.В. Глазырин, В.Б. Бычков

Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ
технической физики им Е.И. Забабахина, Снежинск
E-mail: dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2007 г.
В окончательной редакции 24 июля 2007 г.

Представлены результаты измерения давлений формируемых при наносекундном электрическом взрыве вольфрамовых проволочек микронного размера в воде. Измерения импульсного давления выполнены на расстоянии от 3 до 8 мм от взрывающего проводника. Датчики изготавливались размером не более 3 мм для снижения влияния двумерных эффектов. Выполненные измерения позволили зарегистрировать двухволновую структуру ударной волны.

PACS: 52.80.Qj

Успешные эксперименты по магнитной имплозии многопроволочных сборок, проведенные на генераторе RBFA-Z [1], вызвали огромный интерес к углубленному исследованию процессов электрического взрыва вольфрамовых проволочек микронных диаметров. Оптимизация таких экспериментов, с целью повышения эффективности сжатия плазменной оболочки и получения высоких выходов мягкого рентгеновского излучения, требует более детального понимания физики протекающих предвзрывных и взрывных процессов [2,3].

Импульсы давления до 50 МПа в воде были исследованы в работах [4–7]. В этих работах для создания волны давления использовались медные и алюминиевые проводники. Используемые датчики работали в микросекундном временном диапазоне. Отличие данной работы от работ [4–7] заключается в более коротком импульсе нагрева и электрическом взрыве вольфрамового проводника. Также имеются работы [8,9] по изучению импульса давления в воде при медленном

электрическом взрыве (время до взрыва — сотни μs). Датчики давления в этих работах устанавливались на расстоянии десятков см, а регистрируемая длительность импульса давления была от десятков до сотен μs в зависимости от материала взрываемой проволоочки и расстояния до датчика давления. Большую длительность импульса давления авторы [8,9] объясняли наличием плазмохимических реакций в воде.

Цель данной работы — получение экспериментальных данных по взрывным процессам применительно к свойствам вольфрамовой плазмы в условиях ограничения ее свободного разлета. Взрыв проволоочек осуществлялся в дистиллированной воде, поэтому кроме электротехнических измерений характеристик взрыва (ток, напряжение) стало возможным измерение амплитудно-временных профилей импульсов давления. Существенный интерес представляло сравнение профилей давления при электрическом взрыве проволоочек с ограничением тока после момента собственно взрыва. При этом в силу наносекундного режима электрического взрыва и малого расстояния до датчика давления (единицы mm) мы имеем возможность зарегистрировать профиль импульса давления, обусловленный собственно электрическим взрывом вольфрамовой проволоочки (плазмохимическими реакциями с водой можно пренебречь).

Для исследования электрического взрыва вольфрамовых проволоочек использовался RLC-генератор. Емкость конденсатора — $0.042 \mu\text{F}$, полная индуктивность — 510 nH , активное сопротивление (без учета сопротивления проводника) — 0.74Ω . Управление контура осуществлялось разрядником тригatronного типа. Для размещения проволоочек использовалась конструкция держателя, предложенная авторами работы [10]. Узел взрыва был доработан для размещения датчиков давления. Конструкция обеспечивала симметрию магнитного поля за счет геометрии и количества подводящих ток электродов, при этом индуктивность взрываемой проволоочки L_w составляла $\sim 90 \text{ nH}$. Взрыв вольфрамовых проволоочек диаметром $70 \mu\text{m}$ и длиной $26 \pm 0.2 \text{ mm}$ осуществляли в деионизованной воде с удельным сопротивлением не менее $120 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$.

Эксперименты проводились при зарядном напряжении 23 kV . Схема эксперимента приведена на рис. 1. В процессе эксперимента регистрировалось: напряжение на проволоочке резистивным делителем, ток — коаксиальным шунтом, давление — пьезокерамическим датчиком

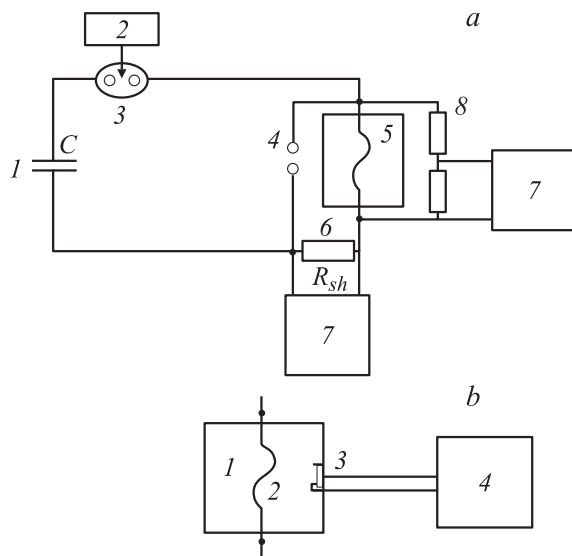


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* — электрические измерения (ЭВП — электрически взрываемый вольфрамовый проводник в воде): 1 — конденсаторная батарея, 2 — блок запуска, 3 — искровой разрядник, 4 — шунтирующий разрядник, 5 — ЭВП, 6 — шунт, 7 — осциллограф, 8 — делитель напряжения. *b* — измерение давления в воде в закрытом сосуде: 1 — вода, 2 — ЭВП, 3 — пьезокерамический датчик, 4 — осциллограф.

(режим дифференцирования [11], рис. 1, *b*). Рабочая поверхность датчика — 8×2.9 мм, толщина — 3 мм. Датчик давления толщиной 3 мм обеспечивает измерение профиля давления в течение $0.75 \mu\text{s}$. При проведении экспериментов использовался один датчик, поэтому волну давления за один опыт было возможно зарегистрировать только на одном фиксированном расстоянии от взрываемой проволоочки. Датчик давления калибровался с помощью стабильного импульсного генератора электронных пучков ИПУЭ (ускоряющее напряжение 800 кВ, ток пучка 1.5 кА, длительность 30 ns) [12]. Цель работы состояла в измерении профиля давления как функции времени и расстояния для двух режимов электрического взрыва вольфрамового проводника в воде.

Суммарная погрешность датчика давления

Расстояние, mm	Погрешность, %
3	31.41
5	20.71
6	18.49
7	16.89
8	12.65

Погрешность измерения давления состоит из двух частей. Первая часть — инструментальная погрешность $\delta_{\text{inst}} \leq 3\%$. Вторая часть — геометрическая погрешность, зависит от размера датчика и расстояния между взрываемым проводником и датчиком. Она характеризует отличие цилиндрической ударной волны от плоской (двумерный эффект). Как результат данного отличия, передний и задний фронты (время нарастания и время спада) — увеличиваются, а амплитуда ударной волны уменьшается. Размер датчиков был не более 3 mm для снижения влияния двумерных эффектов. При этом для расстояния 3 mm суммарная погрешность составляет величину более 30% (истинная величина давления больше измеренной). Для расстояния 5 mm суммарная погрешность уменьшается и составляет величину около 20% (см. таблицу).

Профили импульса давления в зависимости от времени и расстояния восстанавливались для двух режимов электрического взрыва. В первом режиме конденсатор разряжался непосредственно на проволочку. Во втором режиме параллельно взрываемому проводнику устанавливали отсекающий воздушный разрядник. Самопробой отсекающего разрядника происходил в момент перенапряжения при электрическом взрыве проволочки, что приводило к ограничению выделения энергии.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока ($I(t)$, $I_s(t)$) и напряжения ($U(t)$, $U_s(t)$) для двух режимов электрического взрыва. Режим с отсечкой отмечен индексом „s“. Стрелкой помечен момент t_s срабатывания отсекающего разрядника через 110 ns от начала разряда конденсатора на взрывающийся проводник. Выделение энергии (рис. 2, c) рассчитывалось по осциллограммам тока и напряжения: $E(t) = \int U_w(t) \cdot I(t) dt$, где $U_w(t) = U(t) - L_w dI/dt$ — активное падение напряжения на взрываемой проволочке. При этом предполагалось, что индуктивность проволочки L_w постоянная и не зависит от времени.

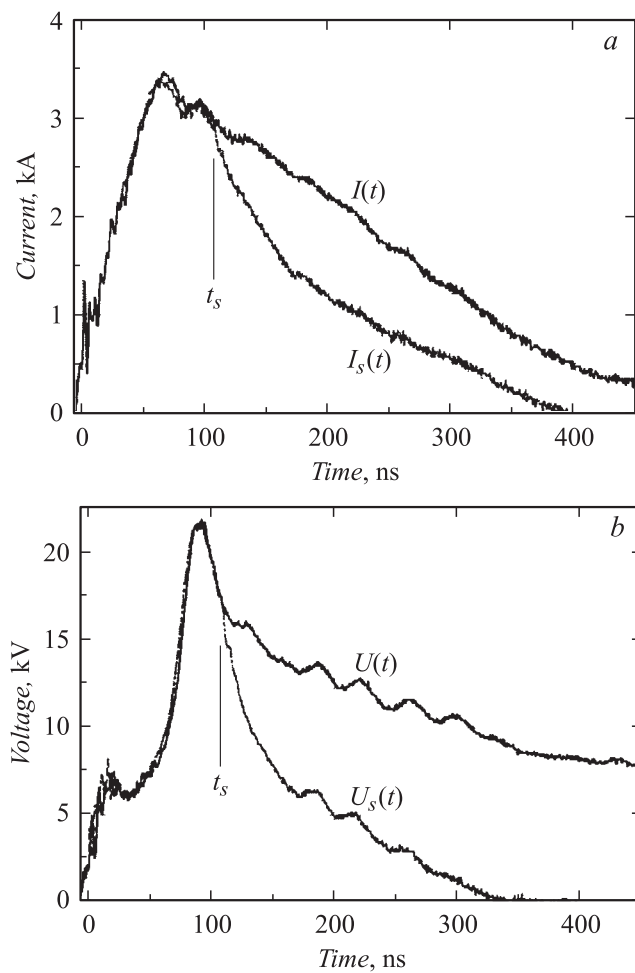


Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения и выделившейся энергии при электрическом взрыве вольфрамовых проволочек в воде. Пунктирной линией отмечена энергия сублимации вольфрама.

Выбранные режимы электрического взрыва соответствуют полной введенной энергии 4.5 kJ/g для взрыва без отсечки тока, и 2.75 kJ/g — для взрыва с отсечкой.

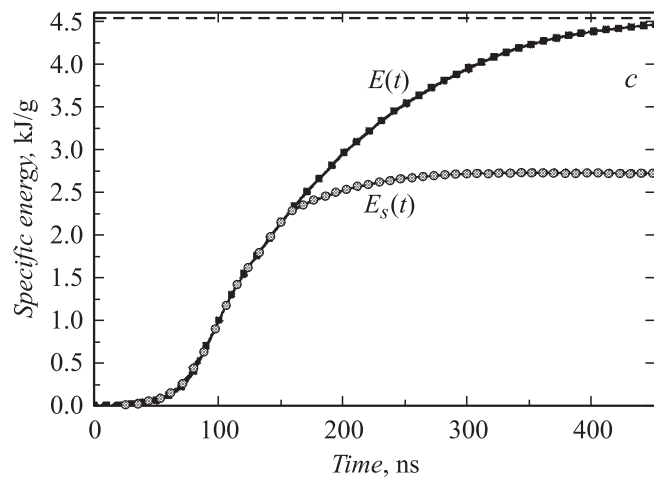


Рис. 2 (продолжение).

Волна давления при электрическом взрыве без ограничения тока имеет треугольную форму (рис. 3). За время измерения импульс давления нарастает. Как следует из рис. 3, *a*, амплитуда волны давления от времени имеет линейную зависимость. Это связано с геометрической (двумерной) погрешностью. Истинное затухание волны давления носит нелинейный (экспоненциальный) характер.

Измерения волны давления без токовой отсечки на малых расстояниях (< 8 mm) позволяют на фронте регистрируемой волны выделить первую („медленную“) и вторую („быструю“) волны (рис. 3, *a*). Первая волна связана с собственно электрическим взрывом, а вторая — с электрическим пробоем продуктов взрыва в воде. При этом крутизна второго импульса больше крутизны первого: $dP_2/dt > dP_1/dt$.

Для данных режимов электрического взрыва с отсечкой и без отсечки тока были измерены импульсы давления ($P(t)$, $P_s(t)$) в окружающей вольфрамовый проводник воде на расстоянии от 3 до 8 mm. Для примера на рис. 3, *b* приведены зависимости импульса давления в воде на расстоянии 8 mm от проводника. Волна давления, сформированная при электрическом взрыве проводника с ограничением тока, в 3 раза меньше по амплитуде и имеет форму „ступеньки“. Фронт импульса

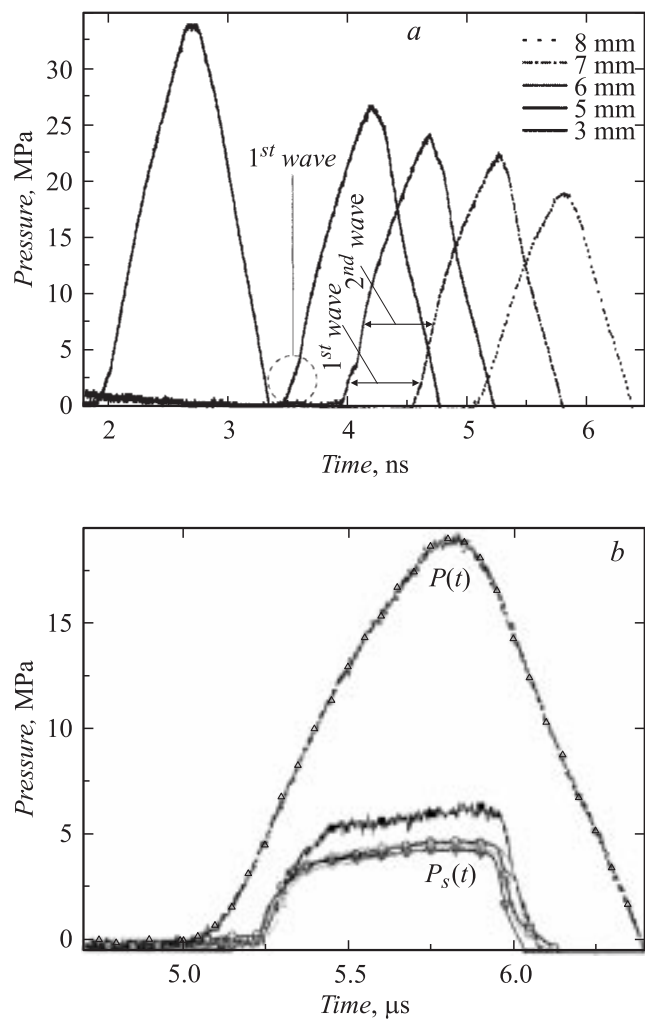


Рис. 3. Профили импульса давления при электрическом взрыве вольфрамовых проволочек в воде на расстоянии 3–8 мм: *a* — режим без отсечки; *b* — режим с отсечкой (P_s) и без отсечки (P) на расстоянии 8 мм от проводника.

давления около 150 ns. Далее за время измерения давления амплитуда волны практически не изменяется и приблизительно равна 5–6 МПа. Такое же соотношение импульсов давления сохраняется и при расстояниях 7, 6 и 5 mm. На рис., 3, *b* показано несколько импульсов давления, сформированных при электрическом взрыве проводника с ограничением тока. Разброс в амплитуде импульсов, вероятнее всего, характеризует нестабильность срабатывания отсекающего разрядника.

Обнаруженное сильное (около 300%) различие в амплитуде и форме импульса давления при увеличении введенной во взрываемый проводник удельной энергии на 60% связано со следующими обстоятельствами. В первом случае (режим с отсечкой) преобладают процессы плавления и кипения металла, а во втором (режим без отсечки) — добавляется интенсивный разогрев ионизированной плазмы, с прямым преобразованием электрической энергии в газокINETическую энергию плазмы при более высокой проводимости. Как результат, происходит значительное увеличение амплитуды генерируемой ударной волны.

Таким образом, выполненные измерения позволили зарегистрировать двухволновую структуру ударной волны (рис. 3, *a*). Первая волна связана с собственно электрическим взрывом, а вторая — с электрическим пробоем продуктов взрыва в воде. Это было подтверждено в опытах с отсечкой тока после импульса перенапряжения (рис. 3, *b*).

Список литературы

- [1] *Spielman R.B.* et al. // *Phys. of Plasmas*. 1998. N 5. P. 2105.
- [2] *Пикуз С.А., Иваненков Г.В.* и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 1999. Т. 69. В. 5. С. 349–354.
- [3] *Хищенко К.В., Ткаченко С.И., Левашов П.Р.* // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32. В. 3. С. 67–74.
- [4] *Kersavag J.* Pressures obtained by exploding wires in the water. *Exploding wires*. V. 2. N.Y.: Plenum Press, 1962. P. 225.
- [5] *Buntzen R.* Exploding wires — for investigation of low-power underwater explosion. *Exploding wires*. V. 2. Plenum Press, N.Y., 1962. P. 195.
- [6] *Lee W.M., Ford R.D.* // *J. Appl. Phys.* 1988. V.64. N 8. P. 3851–3854.
- [7] *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.
- [8] *Кортхонджия В.П.* // *ЖТФ*. Т. 76. В. 12. С. 98–100.
- [9] *Кортхонджия В.П.* и др. // *ЖТФ*. Т. 76. В. 11. С. 43–46.

- [10] *Rousskikh A.G., Bakshi R.B., Chaikovsky S.A.* et al. // Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics, 7th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia, 2004. P. 367–370.
- [11] *Graham R.A., Neilson F.W.* // J. Appl. Phys. 1965. N 5. P. 1775–1783.
- [12] *Bratchikov V.B., Zverev V.M., Kormilitsyn A.I.* et al. // Proc 15th Int. Conf. „Pulsed Particle Beams“ (BEAMS’2004). St. Petersburg, Russia, 2004. P. 119.