

УДК 537.582; 621.9.044

О скорости фронта ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде

М. Н. Ахметов, Н. Д. Ахметов, М. М. Гимадеев, В. А. Кривошеев

Экспериментально исследован процесс распространения волн давления при высоковольтном электрическом разряде в воде. Для рассматриваемого диапазона параметров определена скорость фронта ударной волны.

PACS: 52.35.Tc; 52.85.Wq

Ключевые слова: электрический разряд, ударная волна, скорость фронта.

Введение

К настоящему времени известно достаточное количество математических моделей, описывающих процессы, происходящие при высоковольтном электрическом разряде в жидкости [1—4]. Из обзора и анализа имеющихся методик расчёта параметров канала электрического разряда (КЭР) следует, что аналитические решения предложенных систем уравнений, по-видимому, отсутствуют. Поэтому на практике часто используются различные эмпирические зависимости, полученные по результатам экспериментальных данных.

В большинстве работ в качестве основного параметра, характеризующего энергетику ударной волны (УВ), обычно используется значение амплитудного давления. Скорость распространения волны давления в жидкости при быстром локальном подводе энергии с помощью электрического разряда является также одной из важнейших характеристик рассматриваемого гидродинамического процесса. Знание её необходимо для правильного расчёта процессов в разрядно-импульсных технологиях [3, 4].

Следует заметить, что в рассмотренных нами работах [2—4] отсутствует конкретное выражение, пригодное для инженерных расчётов по определению скорости фронта ударной волны в функции от времени $N(t)$ или расстояния $N(\ell)$.

В указанных работах, исходя из экспериментальных данных, представлены выражения для определения только начальной скорости фронта ударной волны N_0 в зависимости от параметров канала электрического разряда. В конце сферической области распространения ударной волны величина N приближается к значению скорости звука, то есть $N \rightarrow c_0$.

Целью данной работы являлось определение на основе экспериментальных данных скорости фронта распространяющейся ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде, а также получение соответствующих аппроксимирующих выражений для её значений в зависимости от времени и удаления от КЭР.

Эксперимент и первый вариант аппроксимационной зависимости

Экспериментальная установка была создана на базе промышленного генератора импульсных токов ГИТ-50 с некоторыми конструктивными изменениями. Высоковольтный электрический разряд выполнялся в ёмкости с водой в «большом объёме». Для измерения давления использовался комплект пьезометрической аппаратуры РМ-4 производства фирмы RFT (Германия). Эксперименты были проведены при следующих условиях: ёмкость конденсаторных батарей $C = 4$ мкФ, индуктивность разрядного контура $L = 1,65$ мкГн, расстояние между электродами $\ell_p = 20$ мм. В ходе экспериментов величина разрядного напряжения U изменялась и устанавливалась в пределах от 13 до 26 кВ. Расстояние от канала электрических разрядов до точки замера, т. е. датчика, варьировалось в пределах от 150 до 700 мм.

Непосредственно из экспериментов для выбранного режима разряда по осциллограммам определялось время прихода ударной волны в точку замера. Далее строилась зависимость $t = f(\ell)$, где ℓ — расстояние от оси КЭР до датчика, t — время появления первого пика давления.

Ахметов Марат Наиллович, аспирант.

Ахметов Наил Дамирович, зав. кафедрой, доцент.

Гимадеев Минахмет Минхайдарович, доцент.

Кривошеев Вячеслав Александрович, доцент.

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета.

Россия, 423812, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19.

Тел. (8552) 39-59-72.

E-mail: minakhmetg@yandex.ru, nailahmat@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2015 г.

© Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Кривошеев В. А., 2015

Для получения эмпирической зависимости $\ell = f(t)$ был рассмотрен ряд выражений, удовлетворяющих физической сути явления:

- при $t = 0$ $\ell = 0$;
- при $t \rightarrow \infty$ $\ell \rightarrow \infty$ и $d\ell/dt \rightarrow c_0$;
- при $0 < t < \infty$ и $d\ell/dt \geq c_0$.

Кроме того, при этом стремились найти наиболее простую математическую зависимость с наименьшими, по крайней мере, приемлемыми отклонениями от экспериментальных данных. С учётом этого авторами была выбрана зависимость

$$\ell_1 = At (\text{th } t)^{-q}, \quad (1)$$

где A и q — эмпирические коэффициенты, которые определяются в общем случае по данным экспериментов, ($0 < q < 1$).

Например, для режимов разряда при напряжении $U = 23$ кВ аппроксимацией экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость

$$\ell_1 = 1,48t (\text{th } t)^{-0,36}, \quad (2)$$

где ℓ в м, t в мс = 10^{-3} с; коэффициент 1,48 м/мс = 1480 м/с = c_0 соответствует скорости звука в невозмущенной воде при $T = 288$ К согласно работе [6]; коэффициент 0,36 — безразмерный, найден методом наименьших квадратов с последующей корректировкой. Среднеквадратичное отклонение данной зависимости от эксперимента не превышает 5,5 %.

Выражение для эмпирической зависимости скорости ударной волны $N_1 = N(t)$ находим дифференцированием (1) по времени

$$N_1 = d\ell_1/dt = A[(\text{th } t)^{-q} - qt(\text{th } t)^{-(q+1)} \text{ch}^{-2}t]. \quad (3)$$

Полученная зависимость N_1 при напряжении разряда $U = 23$ кВ представлена на рис. 1.

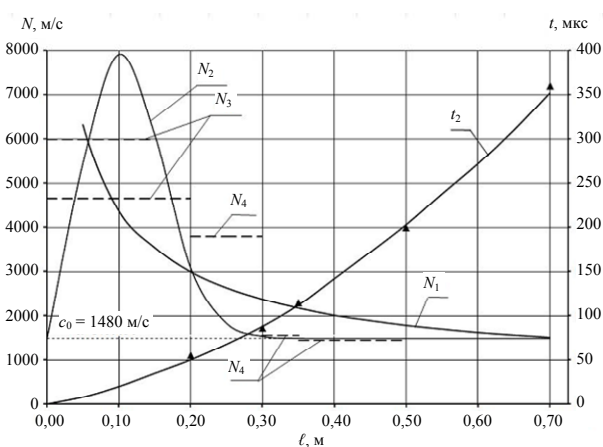


Рис. 1. Зависимости времени прихода t ударной волны в точку с координатой ℓ и скорости фронта N_1 от координаты ℓ при напряжении разряда $U = 23$ кВ. То же для скорости фронта волны N_2 , рассчитанной по формуле (5). N_3 и N_4 — средние скорости ударной волны, рассчитанные по формулам (9) и (10) соответственно

Эмпирические зависимости для ℓ_1 и N_1 были определены и для других режимов разряда, в частности, при напряжениях разряда 18 и 25 кВ. При этом погрешности вычислений N_1 в интервале времени $20 \text{ мкс} < t < 250 \text{ мкс}$ при $A = c_0$ для напряжений разряда не менее 16 кВ не превышает 8 %.

Дальнейшее обобщение экспериментов заключалось в аппроксимации q для разных напряжений разряда U . Для нашего диапазона параметров была найдена зависимость

$$q = 0,02452(U - 12)^{1,13836}, \quad (4)$$

где U — напряжение разряда в кВ.

Тогда определение N_1 по выражению (3) и с учётом q по (4) даёт погрешность не более 15 %. Полученный результат позволяет экстраполировать значение скорости фронта ударной волны N до границ канала электрического разряда, вблизи которого эта величина максимальная, но где сложно провести измерения.

Второй вариант аппроксимирующей зависимости

Следует отметить, что аппроксимация N в виде выражения (3) не учитывает «строго до конца» физическую природу исследуемого процесса, так как не предполагает максимума скорости фронта ударной волны вблизи канала электрического разряда. Это несоответствие подтолкнуло авторов на поиск такой зависимости $N(t)$, которая заранее предопределяло бы максимум функции вблизи КЭР. В результате анализа нескольких видов зависимостей для скорости ударной волны была выбрана следующая зависимость

$$N_2 = c_0 + (a + bt) te^{-t/q}, \quad (5)$$

где a , b , q — эмпирические коэффициенты.

После интегрирования выражения (5) по времени от 0 до t получаем

$$\ell_2 = c_0 t + a[q^2 - (t + q) q e^{-t/q}] + b\{2q^3 - q[(t + q)^2 + q^2] e^{-t/q}\}. \quad (6)$$

В данном выражении содержатся три неизвестных коэффициента a , b и q , которые находятся из эксперимента. Величину q определяем как некоторое характерное время для данного процесса, поэтому q примем равным времени разряда t_p , т. е. в данном случае $q = t_p = \pi\sqrt{LC}$. Размерности величин t , ℓ_2 и N_2 в формулах (5) и (6) соответственно мс, м и м/мс.

Экстремум функции $N_2(t)$ находится из условия

$$dN_2/dt = e^{-t/q} [bt^2 + (a - 2bq)t - aq] \cdot (-1/q) = 0. \quad (7)$$

Первый множитель выражения (7) $e^{-t/q} > 0$ при любом конечном t . Второй множитель даёт два корня

$$t(N_{2\max})_{1,2} = \frac{(2bq - a) \pm \sqrt{(a - 2bq)^2 + 4abq}}{2b}, \quad (8)$$

где один из корней не может иметь физического смысла (при знаке «минус» перед радикалом значение t_2 или отрицательно, или меньше времени разряда t_p).

Так, для условий наших экспериментов при напряжении разряда $U = 23$ кВ получаем следующие значения коэффициентов и параметров: $a = -250$ м/(мс)²; $b = 197,9 \cdot 10^3$ м/(мс)³; $q = t_p = 0,00807$ мс; $t(N_{2\max}) = 0,0168$ мс; $\ell(N_{2\max}) = 0,0867$ м; $N_{2\max} = 7921,7$ м/с.

При этом среднеарифметическое отклонение ℓ_2 по выражению (6) от ℓ_1 по (2) составляет около 1 %, а среднеквадратичное — не более 3 %.

Найденные из экспериментов коэффициенты a , b и значения $t(N_{2\max})_{1,2}$ при различных напряжениях разряда U представлены в таблице.

Аппроксимирующие параметры для экспериментальной зависимости $N_2(t)$

U , кВ	a , м/(мс) ²	b , м/(мс) ³	t_1 , мс	t_2 , мс
13,1	-37,69	28627,1	0,016825	0,0006 ($< t_p$)
16,2	-109,08	82855,7	0,016825	0,0006
19,7	-145,08	109390,1	0,016830	0,0006
23,0	-250,02	197899,1	0,016796	0,0006
25,7	-281,38	214131,3	0,016824	0,0006

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости $N_2(t)$, аппроксимирующие экспериментальные данные для различных напряжений разряда.

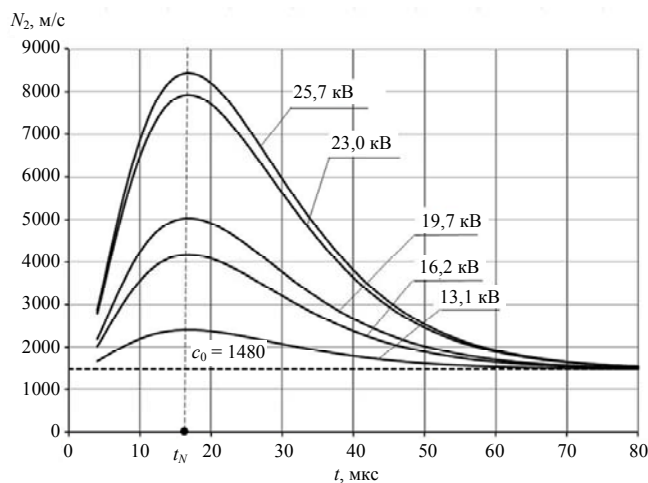


Рис. 2. Эмпирические зависимости $N_2(t)$ для различных напряжений разряда U

Анализ результатов

Вопрос о сопоставлении экспериментальных результатов по скорости ударной волны N с надёжными экспериментами других авторов обстоит достаточно сложно. Подробный обзор литературных источников по высоковольтному электрическому разряду в жидкости показал, что этому вопросу не уделяется должного внимания. Имеющиеся рекомендации по определению скорости фронта ударной волны, например, в работе [3], базируются на допущении об изоэнтропичности процесса, где уравнение состояния воды выбрано в форме Тэта. Такой подход характерен в задачах подводного взрыва взрывчатых веществ (ВВ). Например, в работе [5] приводится пример подобного расчёта. На наш взгляд, принятие допущения об изоэнтропичности процесса может быть справедливо для взрыва ВВ, когда температура газового пузыря имеет температуру 2000—3000 К, однако это весьма сомнительно при электрическом разряде в воде, когда температура плазмы в канале разряда превышает 10000 К.

Учитывая, что к моменту окончания первой четверти периода разряда t_p ускоренное движение стенок КЭР прекращается и ударная волна уходит из ближней зоны разряда [3], примем время $t_p/4$ за начало распространения УВ. Тогда для нашего примера при напряжении разряда $U = 23$ кВ получаем $N_0 = N_2(t_p/4) = 1714,5$ м/с, что очень близко к вычисленным значениям начальной скорости ударной волны N_0 по другим методикам [2—4]: соответственно 1783, 1722 и 1860 м/с.

Для оценки и сравнения полученных значений N_2 из эксперимента были определены средние значения скоростей фронта ударной волны

$$N_3 = \ell_i/t_i, \quad (9)$$

а также средние значения скорости фронта ударной волны на рассматриваемых интервалах расстояний ℓ_i из следующего условия

$$N_4 = (\ell_i - \ell_{i-1})/(t_i - t_{i-1}). \quad (10)$$

Из анализа зависимостей N_3 и N_4 можно сделать следующие выводы.

Во-первых, скорость фронта ударной волны значительно уменьшается с удалением от канала электрического разряда, приближаясь к скорости звука, что находится в согласии с исследованиями других авторов.

Во-вторых, характер зависимости N_3 показывает, что максимальное значение скорости фронта ударной волны возникает в зоне ближе к каналу электрического разряда, где, к сожалению, нам не удалось провести непосредственные измерения.

Следует также заметить, что процесс формирования ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в жидкости продолжается и после окончания разряда. Другими словами, пока идёт разряд, происходит подпитка ударной волны слабыми возмущениями, поэтому максимальная интенсивность ударных волн будет не на поверхности канала разряда, а на некотором расстоянии от него [3, 7, 8]. К сожалению, вопрос об определении времени, потребного для окончательного формирования УВ, в обзорной литературе по тематике исследований пока остаётся открытым.

Заключение

В работе экспериментально исследован процесс распространения волн давления при высоко-

вольтном электрическом разряде в воде. Для широкого диапазона параметров определена скорость фронта ударной волны и её зависимость от времени и от удаления от канала электрического разряда. Представлены расчетные зависимости, достаточно хорошо аппроксимирующие экспериментальные данные. Из анализа расчётных данных видно, что скорость фронта ударной волны $N_2(t)$ достигает своего максимального значения при одном и том же времени $t_N = 0,0168$ мс, которое не зависит от величины разрядного напряжения U .

ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. — М.: Наука, 1971.
2. Гулый Г. А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. — Киев: Наук. думка, 1990.
3. Малушевский П. П. Основы разрядно-импульсной технологии. — Киев: Наук. думка, 1983.
4. Гаврилов Г. Н. и др. Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред. — Киев: Наук. думка, 1979.
5. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. — Л.: Судпромгиз, 1961.
6. Эберт Г. Краткий справочник по физике. — М.: Физматгиз, 1963.
7. Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Друлис В. Н. и др. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 1. С. 77.
8. Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 124.

About the shock wave speed in a high-voltage electrical discharge in water

M. N. Akhmetov, N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, and V. A. Krivosheev

Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute
68/19 Prospect Mira, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423812, Russia
E-mail: minakhmetg@yandex.ru, nailahmat@yandex.ru

Received September 28, 2015

Pressure wave propagation in the high-voltage electrical discharge in water was experimentally investigated. The shock wave front speed was determined for the considered parameters.

PACS: 52.35.Tc; 52.85.Wq

Keywords: electrical discharge; shock wave, front speed.

REFERENCES

1. K. A. Naugolnykh and N. A. Roy, *Electrical Discharges in Water* (Nauka, Moscow, 1971) [in Russian].
2. G. A. Gulyi, *Science Foundations of Discharge-Pulse Technology* (Nauk. Dumka, Kiev, 1990) [in Russian].
3. P. P. Malyushevskii, *Foundations of Discharge-Pulse Technology* (Nauk. Dumka, Kiev, 1983) [in Russian].
4. G. N. Gavrilov et al., *Discharge-Pulse Technology of Treatment of Minerals* (Nauk. Dumka, Kiev, 1979) [in Russian].
5. Yu. S. Yakovlev, *Hydrodynamics of Explosion* (Sudpromgiz, Leningrad, 1961) [in Russian].
6. G. Ebert, *The Short Handbook on Physics* (Fizmatgiz, Moscow, 1963) [in Russian].
7. N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, V. N. Drulis, et al., *Izv. Vuzov. Aviats. Tekhnika*, 2011. No. 1, 77 (2011).
8. M. N. Akhmetov, N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, et al., *Nauch.-Techn. Vestnik Povolzh'ya*, No. 6, 124 (2012).