

Метод расчёта формирования и движения фронта ударной волны в высоковольтном электрическом разряде в воде

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

В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса формирования и движения ударных волн при высоковольтном электрическом разряде в воде. Для рассматриваемого режима разрядов определены давление и скорость фронта ударной волны и рассчитан момент достижения ударной волной максимальной интенсивности.

Ключевые слова: электрический разряд, ударная волна, максимальная интенсивность.

Ссылка: Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Кривошеев В. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 25.

Reference: M. N. Akhmetov, N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, and V. A. Krivosheev, Prikl. Fiz., No. 1, 25 (2019).

Введение

Исследованию высоковольтного электрического разряда в воде (в литературе его ещё называют «подводный электровзрыв») посвящено много теоретических и экспериментальных работ. Исследуется высоковольтный электрический разряд в воде обычно в следующих условиях: внешнее гидростатическое давление равно атмосферному, внешние магнитные поля отсутствуют, используется емкостной накопитель энергии с традиционным способом образования канала – пробоем среды, разряд производится в свободном объеме без влияния границ. Рассматривается цилиндрический разрядный канал, который образуется электрическими разрядами в воде при напряжениях порядка десятков кВ на межэлектродных расстояниях в несколько см при ёмкости накопителя до нескольких мкФ и индуктивности разрядного контура порядка единиц мкГн.

Физический и численный эксперименты, различные аналитические методы в настоящее

время позволяют описывать динамику канальной стадии развития высоковольтного электрического разряда в воде для решения на практике той или иной технологической задачи. Однако имеющаяся по этому вопросу информация, в частности, по исследованиям давления плазмы в воде, во многих случаях противоречива. Так, например, определение временной зависимости давления плазмы в канале разряда с помощью различных математических моделей показывает качественные и количественные различия в результатах. Кроме того, известные теоретические данные недостаточно полно подтверждены экспериментами.

В представленной работе рассматривается процесс формирования и движения ударных волн (УВ) при высоковольтном электрическом разряде в воде на основе проведённых экспериментальных исследований.

Интенсивность ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде

Как отмечается многими авторами [1–3], с гидродинамической точки зрения, высоковольтный электрический разряд в воде можно рассматривать как процесс нестационарного расширения непроницаемой полости. Однако при этом следует отметить, что гидродинамика электровзрыва в воде существенно отличается от гидродинамики взрыва взрывчатых веществ (ВВ). Во-первых, электрические разряды сопровождаются значительно большими потерями энергии, чем при взрыве ВВ. Во-вторых, при взрыве ВВ ударная волна образуется в результате выхода детонаци-

Ахметов Марат Наилевич, аспирант.

Ахметов Наил Дамирович, зав. кафедрой, доцент, к.т.н.

Гимадеев Минахмет Минхайдарович, доцент, к.т.н.

Кривошеев Вячеслав Александрович, доцент, к.т.н.

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета.

Россия, 423810, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19.

Тел. (8552) 39-59-72.

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

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2018 г.

© Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Кривошеев В. А., 2019

онной волны, и поэтому импульс имеет всегда ударный фронт [4]. А при высоковольтном электрическом разряде в воде максимум давления в ударной волне достигается на некотором расстоянии от канала электрического разряда (КЭР). При этом энергия от КЭР передаётся фронту УВ посредством малых возмущений, возникающих на поверхности канала. Эти возмущения, распространяясь в сжатой среде, имеют большую скорость, чем ударная волна, и догоняют фронт УВ [2].

Известно, что теория подобия ударных волн взрыва основывается на экспериментальном факте. В случае отсутствия противодействия окружающей однородной среды, когда процесс приобретает автомодельный характер, энергия взрыва является единственным определяющим параметром взрыва на некотором удалении от заряда [5]. Так, например, для плоской воздушной ударной волны в качестве определяющего параметра выбирают энергию ВВ, отнесённую к единице поверхности фронта плоской ударной волны. Учёт противодействия требует ввода поправки [6] к автомодельному решению и появлению линейного масштаба задачи, определяемого энергией взрыва и противодействием.

Во многих задачах подводного взрыва наряду с давлением на фронте и импульсом представляет также интерес оценка плотности потока энергии в ударной волне, которая может служить одним из критериев поражающего действия. Поэтому и при подводном электровзрыве энергию, приходящуюся на единицу площади фронта ударной волны, целесообразно рассматривать одним из определяющих параметров.

Ранее авторами был представлен нетрадиционный подход к описанию процесса распространения ударных волн в сплошной среде, который базируется на решении нестационарного уравнения переноса энергии, аналогичного по форме уравнению переноса излучения [7]. Методика была проверена для случая распространения ударных волн в воде при высоковольтном электрическом разряде в воде, причём сначала для «большого объёма» [8], а затем для закрытого объёма [9]. Эксперименты подтвердили правомерность предлагаемого подхода.

Авторами для оценки энергетики ударных волн предлагается интегральная величина E (в Вт/м²) – поверхностная плотность потока энергии. На базе общих положений механики сплошной среды В. Н. Друлисом была получена общая математическая зависимость между давлением в волне возмущения p , скоростью её распространения N и поверхностной плотностью потока энергии E , которая определяется формулой

$$E = k_E p N, \quad (1)$$

где для частного случая гомогенной и изотропной среды коэффициент $k_E = 3/4$.

Используя данную зависимость, можно определить максимальную интенсивность ударной волны, которую, с физической точки зрения, можно интерпретировать как энергию окончательно сформированной УВ, после чего начинается её затухание.

Результаты экспериментов для скорости ударной волны и давления на фронте

Результаты экспериментов были обобщены с учётом физики исследуемого процесса, то есть были подобраны такие аппроксимирующие зависимости для скорости ударной волны $N(t)$ и давления на фронте $p(t)$, которые изначально определяют максимумы этих функций вблизи КЭР. Для скорости ударной волны $N(t)$ была выбрана зависимость [10]:

$$N(t) = c_0 + (a + bt)t \exp(-t/t_p), \quad (2)$$

где c_0 – скорость звука в невозмущенной воде; t_p – время разряда; a и b – эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента.

Зависимость между расстоянием ℓ и временем t получается путём интегрирования выражения (2) по времени:

$$\ell(t) = c_0 t + a \left[t_p^2 - (t + t_p)t_p \exp(-t/t_p) \right] + b \left\{ 2t_p^3 - t_p \left[(t + t_p)^2 + t_p^2 \right] \exp(-t/t_p) \right\}. \quad (3)$$

По мнению многих авторов, при описании движения фронта УВ удобно в качестве основной переменной использовать не давление, а скорость фронта. Поэтому аппроксимацию для давления $p(t)$ проводим следующим выражением:

$$p(t) = p_0 + m \left[t_p / (t + t_p) \right]^q N^g, \quad (4)$$

где m , q , g – эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента. Значения скорости УВ берутся для $N(t + t_p)$. Величина p_0 соответствует начальному давлению.

Ввиду того, что методика проведения экспериментов была приведена в работе [10], мы здесь её подробно не описываем, отсылая читателя к указанной статье.

По результатам экспериментов были получены следующие величины: p_m – амплитудное значение давления; ℓ – расстояние до геометрической оси канала разряда; t – время прихода ударной волны в заданную точку.

Экспериментальные результаты по амплитудному значению давления сопоставим с исследованиями других авторов. В табл. 1 приведено сравнение экспериментальных данных с расчётными значениями, полученными по различным методикам. При этом параметры электрических разрядов следующие: напряжение разрядного кон-

тура $U = 23$ кВ; ёмкость батареи конденсаторов $C = 4$ мкФ; индуктивность разрядного контура $L = 1,65$ мкГн; длина межэлектродного промежутка $\ell_p = 20$ мм. Как видим, проведённые эксперименты по определению давления на фронте ударной волны являются вполне достоверными.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных $p_{\text{эксп}}$ и расчётных $p_{\text{анпр}}$ значений давления с расчётными по методикам других авторов

ℓ , м	$p_{\text{эксп}}$, МПа	$p_{\text{анпр}}$, МПа	p , МПа [2]	p , МПа [12]	p , МПа [1]	p_{\perp} , МПа [3]	p_{\perp} , МПа [11]	p_{\perp} , МПа [4]
0,700	2,39	2,78	2,48	2,62	3,45	3,78	4,33	14,02
0,500	3,41	3,07	3,63	3,79	5,00	5,30	6,06	18,08
0,350	3,49	3,53	5,44	5,61	7,41	7,56	8,65	23,66
0,300	5,02	4,03	6,47	6,65	8,77	8,83	10,10	26,57
0,200	7,14	7,80	10,23	10,38	13,71	13,24	15,14	36,06

Для давления на фронте УВ в случае рассматриваемого примера получаем следующее эмпирическое выражение:

$$p(t) = p_0 + 3,5 \left[t_p / (t + t_p) \right]^{0,2} N^{1,35}, \quad (5)$$

где размерности величин t , p и N соответственно мс, МПа и м/мс.

Вид зависимости $p(t)$ (5) показан на рис. 1. Для оценки достоверности эмпирической зависимости (5) приведём также сопоставление с данными других авторов (см. табл. 1).

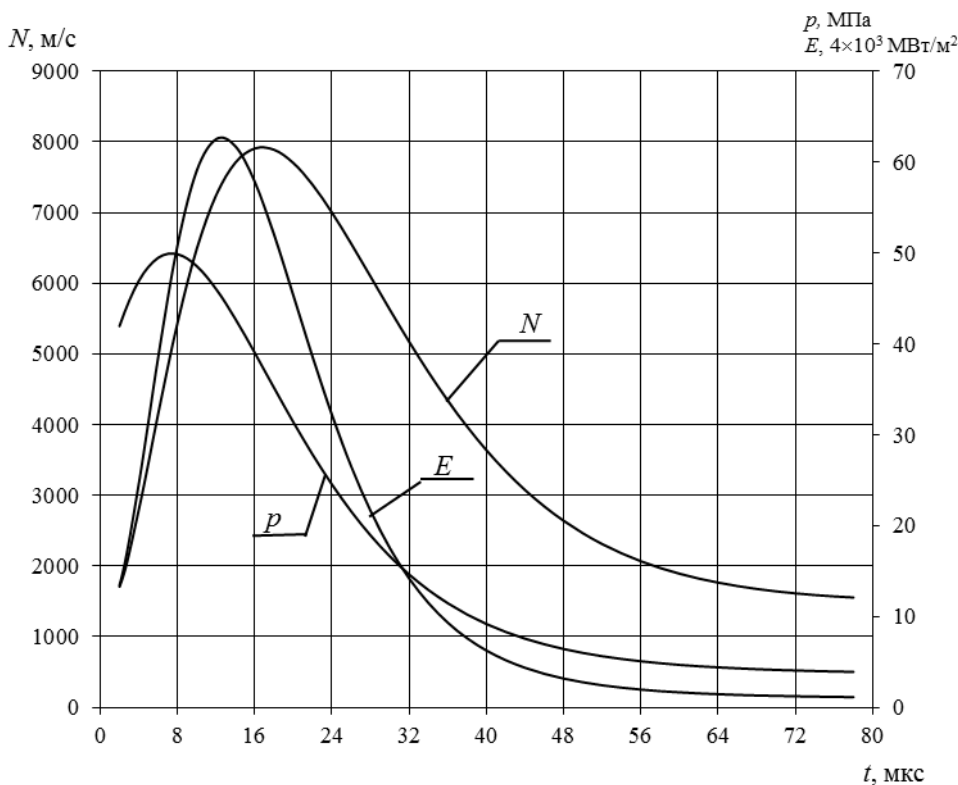


Рис. 1. Значения скорости ударной волны N , давления p и поверхностной плотности потока энергии E на фронте в зависимости от времени t .

Анализ результатов

Исследование на экстремум функции $p(t)$, проведённое численными методами с учётом выражения (3), даёт следующий результат: максимальное значение давления $p_{\max} = 49,84$ МПа достигается в момент времени $t = 7,3$ мкс и на расстоянии $\ell = 20,3$ мм от геометрической оси канала электрического разряда. Эти значения хорошо согласуются с расчётами по изложенной в работе [12] методике. Так, например, согласно этой методике, при оптимальном сочетании основных параметров разрядного контура U , C , L , ℓ_p ударная волна с максимальной амплитудой давления окажется на расстоянии $\ell = 21,9$ мм от канала разряда.

Скорость ударной волны в этот момент времени в соответствии с экстраполяцией зависимости (2) равна $N(t = 7,3 \text{ мкс}) = 5009,4$ м/с, причём своего максимального значения $N_{\max} = 7921,7$ м/с достигает в момент времени $t(N_{\max}) = 16,8$ мкс на расстоянии $\ell(N_{\max}) = 0,0867$ м от оси канала разряда [10]. Это вполне соответствует физическим представлениям процесса, так как энергия в канале разряда выделяется быстрее, чем затем передается окружающей среде [2].

На основе принятой нами зависимости (1) между величинами E , p , N и с учётом эмпирических выражений для $p(t)$ и $N(t)$, определяем время и положение ударной волны, когда поверхностная плотность потока энергии E на фронте будет максимальна. С физической точки зрения, положение фронта ударной волны, когда на нём значение поверхностной плотности потока энергии максимальное, можно интерпретировать как момент

окончательного формирования ударной волны, так как в дальнейшем происходит её затухание.

В нашем примере для $U = 23$ кВ максимальное значение поверхностной плотности потока энергии на фронте ударной волны $E_{\max} = 249542,26$ МВт/м² достигается при $t = 12,6$ мкс на расстоянии $\ell = 54,1$ мм от геометрической оси канала разряда (см. рис. 2).

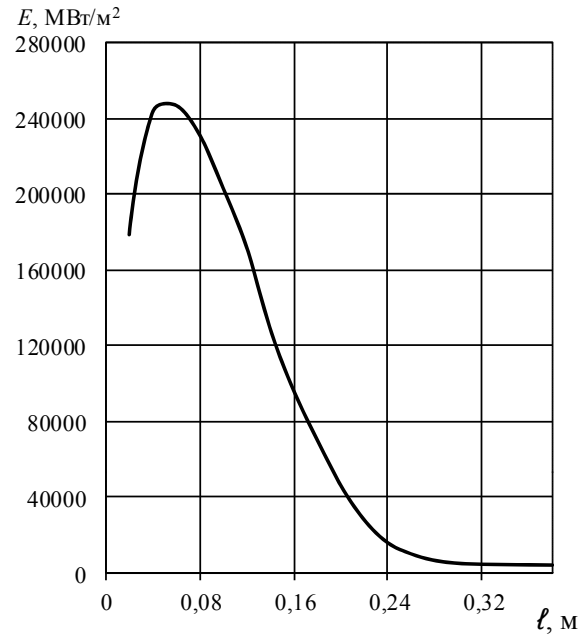


Рис. 2. Расчётная зависимость поверхностной плотности энергии E на фронте ударной волны от расстояния ℓ .

В табл. 2 приведены расчётные значения основных параметров ударной волны на стадии её формирования и последующего движения.

Таблица 2

Изменение основных параметров ударной волны

Движение фронта УВ	ℓ , мм	t , мкс	N , м/с	p , МПа	E , МВт/м ²
отделение УВ от КЭР	3,0	2,02	1714,5	42,13	54168,19
достижение p_{\max}	20,3	7,3	5009,4	49,84	187241,76
окончание разряда	24,3	8,07	5479,0	49,71	204278,54
достижение E_{\max}	54,1	12,6	7412,2	44,89	249542,26
достижение N_{\max}	86,7	16,8	7921,7	37,25	221290,85

Заключение

В работе представлен новый способ расчёта формирования и движения фронта ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде. Предлагаемая методика позволяет получить для произвольной точки поля возмущения зависимость $E = f(p, N)$ между поверхностной плотностью потока энергии ударной волны E , давлением

на фронте p и скоростью фронта ударной волны N . Это даёт возможность определить положение фронта УВ, на котором достигается максимальное значение поверхностной плотности потока энергии, т. е. по сути удельной мощности ударной волны. С физической точки зрения, это положение можно интерпретировать как момент окончания формирования ударной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривицкий Е. В.* Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наук. думка, 1986.
2. *Малюшевский П. П.* Основы разрядно-импульсной технологии. – Киев: Наук. думка, 1983.
3. *Наугольных К. А., Рой Н. А.* Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971.
4. *Коул Р.* Подводные взрывы. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1950.
5. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. 9-е изд. – М.: Наука, 1981.
6. *Коробейников В. П., Мельникова Н. С., Рязанов Е. В.* Теория точечного взрыва. – М.: Физматгиз, 1965.
7. *Друлис В. Н., Ахметов Н. Д.* // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2011. № 2. С. 100.
8. *Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Друлис В. Н. и др.* // Изв. вузов. Авиационная техника. 2001. № 3. С. 38.
9. *Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Друлис В. Н. и др.* // Изв. вузов. Авиационная техника. 2006. № 3. С. 55.
10. *Ахметов М. Н., Ахметов Н. Д., Гимадеев М. М., Кривошеев В. А.* // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 53.
11. *Гаврилов Г. Н. и др.* Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред. – Киев: Наук. думка, 1979.
12. *Гулый Г. А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наук. думка, 1990.

PACS: 52.35.Tc; 52.85.Wq

Method of calculating shock wave front generation and motion on a high voltage electric discharge in water

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

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga Region) Federal University
68/19 Prospekt Mira, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423810, Russia

Received November 22, 2018

The paper presents experimental study results of shock waves generation and motion on a high-voltage electric discharge in water. For this discharge mode the pressure and velocity of shock-wave front were determined. And also, the moment when the shock wave reaches its maximum intensity was calculated.

Keywords: electrical discharge; shock wave; maximum intensity.

REFERENCES

1. E. V. Krivitsky, *Dynamics of electric explosion in a liquid* (Kiev: Nauk. dumka, 1986) [in Russian].
2. P. P. Malyushevsky, *Basics of discharge and pulse technology* (Kiev: Nauk. dumka, 1983) [in Russian].
3. K. A. Naugolnykh and N. A. Roy, *Electrical discharges in the water* (Moscow, Nauka, 1971) [in Russian].
4. R. Cole, *Underwater explosions* (Moscow, Izdatelstvo inostrannoi literatury, 1950) [in Russian].
5. P. I. Sedov, *Methods of similarity and dimension in mechanics*. (Moscow, Nauka, 1981) [in Russian].
6. V. P. Korobeinikov, N. S. Melnikova, and E. V. Ryazanov, *Point explosion theory* (Moscow, Fizmatgiz, 1965) [in Russian].
7. V. N. Drulis and N. D. Akhmetov, *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*, No 2,100 (2011).
8. N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, V. N. Drulis, V. A. Krivosheev, and V. G. Letyagin, *Russian Aeronautics*. **44** (3), 152 (2001).
9. N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, V. N. Drulis, V. A. Krivosheev, and T. V. Rzaeva, *Russian Aeronautics* **49** (3), 83 (2006).
10. M. N. Akhmetov, N. D. Akhmetov, M. M. Gimadeev, and V. A. Krivosheev, *Prikl. Fiz.* No. 6, 53 (2015).
11. G. N. Gavrilov et al. *The discharge and pulse technology of mineral environments processing* (Kiev: Nauk. dumka, 1979) [in Russian].
12. G. A. Gulyi, *Scientific basis for discharge and pulse technology* (Kiev: Nauk. dumka, 1990) [in Russian].