

03;05;12

Влияние индуктивности электрической цепи на энергетические характеристики разряда в воде и деформирования пластин

© В.М. Косенков, В.М. Бычков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Николаев, Украина
E-mail: v.m.kosenkov@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 января 2017 г.

Выполнено экспериментальное исследование влияния индуктивности разрядной цепи на эффективность преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в канале электрического разряда в воде и в процессе пластического деформирования пластин. Впервые определено положительное влияние увеличения индуктивности разрядной цепи на деформирование пластин, приводящее к увеличению количества используемой для этого энергии.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.16.44939.16706

Высоковольтный разряд в воде находит широкое применение в различных технических приложениях [1–4]. Его эффективность во многом зависит от параметров разрядной цепи, таких как емкость конденсаторной батареи (C), напряжение ее заряда (U_0), индуктивность (L), расстояние между электродами (l_c), активное сопротивление (R_r) всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда. Во многих работах [2–9] исследовалось влияние параметров C , U_0 , l_c , R_r на изменение свойств различных сред и объектов под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде, но влиянию L уделялось намного меньше внимания. Главным образом это связано с тем, что в большинстве технических приложений основное воздействие на среды и объекты осуществляют первичные ударные волны, генерируемые электрическим разрядом в воде [1,2]. Положительный эффект воздействия ударных волн на среды и объекты, как правило, пропорционален их амплитуде. Было определено [5], что уменьшение L приводит к существенному увеличению амплитуды первичных ударных волн. Поэтому во многих

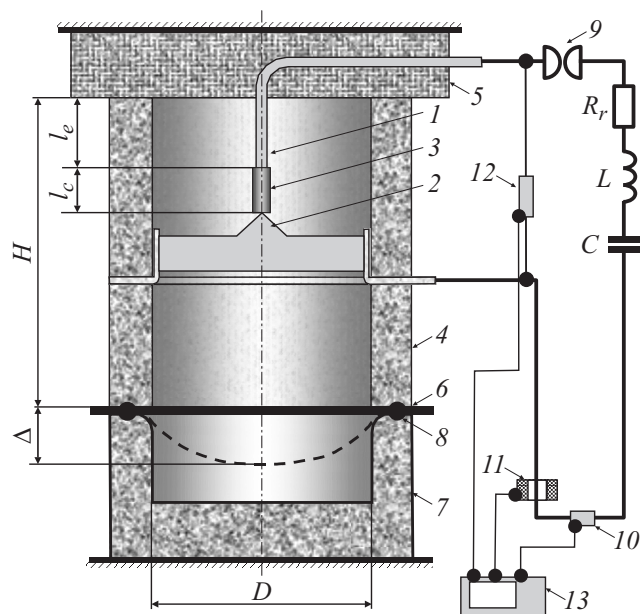


Рис. 1. Схема эксперимента.

работах [1,5] рекомендовалось задавать L как можно меньшей величины. По аналогии эти рекомендации распространялись на процессы, время протекания которых намного больше, чем время действия первичных ударных волн. К таким процессам относится деформирование пластин, происходящее в результате электрического разряда в воде. В этом случае данные о влиянии величины L отсутствуют, что определяет актуальность проведения исследований.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния индуктивности разрядной цепи на количество энергии, выделяемой в канале разряда, а также на энергию деформирования металлических пластин под действием волн, генерируемых электрическим разрядом в воде.

В процессе исследований использовалось экспериментальное оборудование, схема которого представлена на рис. 1. Разряд осуществлялся

между двумя электродами I и 2 , установленными на расстоянии l_c друг от друга, между которыми в результате пробоя слоя воды формировался канал разряда 3 . Электродная система I и 2 устанавливалась в разрядной камере 4 , состоящей из двух толстостенных цилиндров с общей высотой $H = 340$ mm и внутренним диаметром $D = 120$ mm, между которыми размещался электрод 2 . Сверху разрядная камера 4 закрывалась пластиной стеклотекстолита 5 , которая также служила высоковольтной изоляцией электрода I , выступающего за ее пределы на l_e (70 mm). Снизу разрядная камера 4 ограничена пластиной 6 из высокопрочного алюминиевого сплава 5754 толщиной 1.35 mm, установленной на цилиндрической матрице 7 и прижатой корпусом разрядной камеры 4 . От перемещения в радиальном направлении из фланцев пластина 6 фиксировалась стопорным кольцом 8 . Полость разрядной камеры 4 между пластинами 5 и 6 заполнялась водой.

Электроды I и 2 подключались к разрядной цепи, схема замещения которой характеризуется параметрами C , L и R_r (рис. 1). Для коммутирования разрядной цепи использовался воздушный разрядник 9 , в результате замыкания которого между электродами I и 2 возникала разность потенциалов U_0 , приводящая к формированию между ними канала разряда 3 . Канал разряда 3 в процессе расширения генерировал волны давления, распространяющиеся в воде и приводящие к деформированию пластины 6 до максимального прогиба Δ . Форма прогиба пластины 6 показана на рис. 1 штриховой линией. Электрод 2 выполнен в виде пластины, расположенной в диаметральной плоскости разрядной камеры 4 , и поэтому практически не влиял на распространение волн в осевом и радиальном направлениях.

Во время экспериментов емкость конденсаторной батареи C была постоянной и равной $10 \mu\text{F}$. Индуктивность L и активное сопротивление R_r всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда, определялись по осциллограммам тока короткого замыкания электродов I и 2 . Минимальная индуктивность разрядного контура равнялась $9.5 \mu\text{H}$, а минимальное активное сопротивление — 0.07Ω . Напряжение заряда конденсаторной батареи U_0 изменялось в пределах от 30 до 40 kV, что соответствовало энергии заряда батареи (E_0) от 4.5 до 8 kJ. Расстояние l_c между электродами I и 2 задавалось равным 20, 30 и 55 mm. Разряд инициировался пробоем слоя воды между электродами под действием U_0 .

Анализ процессов выполнялся на основе измерения силы тока (i) и напряжения (U) на канале разряда 3 , а также максимального прогиба

пластины 6 (Δ). Сила тока определялась двумя способами: по падению напряжения на омическом шунте 10 и с помощью пояса Роговского 11. Напряжение на канале разряда измерялось с помощью резистивного делителя напряжения 12. Для записи изменяющихся во времени сигналов использовался цифровой осциллограф 13 марки Tektronix TDS-2024B. Компенсация индуктивной составляющей напряжения на канале разряда осуществлялась по методу, описанному в работе [10].

По результатам измерения силы тока и напряжения на канале разряда определялись энергетические характеристики разряда: мощность (N) и энергия, выделившаяся в канале разряда (E_c). Полученное значение E_c делилось на E_0 для определения эффективности ее передачи в канал разряда (η_c). Энергия пластического деформирования пластины 6 (E_p) находилась по методу [11]. Величина η_p , определяемая как отношение E_p к E_0 , характеризовала эффективность использования E_0 для деформирования пластины 6.

Изменение L разрядной цепи выполняли, включая в нее последовательно дополнительные катушки с индуктивностью 19.6 и 36 μH . Активное сопротивление первой из них составляло 0.02 Ω , а второй — 0.014 Ω . Чтобы исключить влияние активного сопротивления катушек на процесс разряда с разной L , выполнили серию экспериментов, подключив последовательно в разрядную цепь активные сопротивления, равные сопротивлению катушек. При этом начальная индуктивность разрядной цепи увеличилась до 10.2 и 10 μH . В результате таких переключений элементов цепи были получены пять соотношений параметров R_r и L : 0.084 Ω и 10 μH ; 0.09 Ω и 10.2 μH ; 0.09 Ω и 29.8 μH ; 0.084 Ω и 46 μH ; 0.104 Ω и 65.6 μH . Эксперименты с этими соотношениями параметров R_r и L выполнялись при одной из трех фиксированных величин l_c : 20, 30 и 55 mm. При каждом соотношении параметров цепи R_r , L и l_c было выполнено от трех до пяти экспериментов, позволивших произвести статистическую обработку данных и определить погрешность измерений.

Увеличение L от 10 до 65.6 μH при одной и той же E_0 (U_0 равно 30 kV) увеличивает период колебаний тока в цепи приблизительно в 2.5 раза и во столько же раз уменьшает его амплитуду (рис. 2). Амплитуда силы тока монотонно уменьшается от периода к периоду с течением времени разряда независимо от L , при этом амплитуда напряжения между электродами при больших L сначала уменьшается, но к концу разряда увеличивается, достигая уровня напряжения в конце

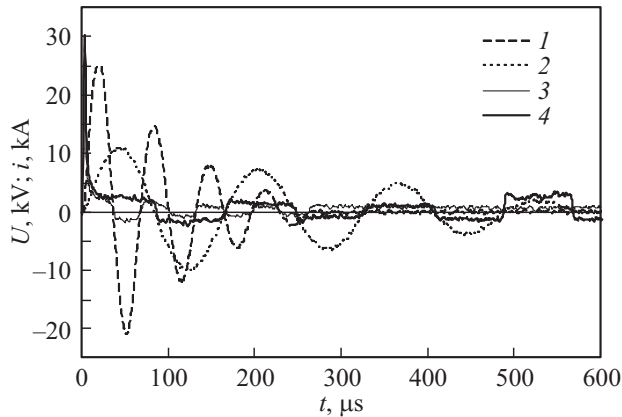


Рис. 2. Электрические характеристики разряда в воде. Цифрами обозначены зависимости от времени: 1 и 2 — силы тока, 3 и 4 — напряжения. Линии 1 и 3 получены при L , равном $10 \mu\text{H}$, а 2 и 4 — $65.6 \mu\text{H}$.

первого полупериода разряда. Это свидетельствует о существенном увеличении сопротивления канала разряда на последних периодах колебания тока.

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость η_c от L (рис. 3, а). Из нее следует, что увеличение L повышает η_c . Степень увеличения η_c существенно зависит от расстояния между электродами l_c . Увеличение L приблизительно в 7 раз в случае, когда l_c составляет от 20 до 30 мм, приводит к повышению η_c от 0.53 до 0.7 (в 1.3 раза). Увеличение l_c до 55 мм приводит к меньшему росту η_c : от 0.65 до 0.72 (в 1.1 раза). Следовательно, увеличение L при малых расстояниях между электродами l_c позволяет существенно увеличить η_c .

Для объяснения этого эффекта вычислили эквивалентное сопротивление канала разряда (R_e) по осциллограммам тока и напряжения, используя известную формулу [5,10]

$$R_e = \int_0^{T_r} i(t)U(t)dt \Big/ \int_0^{T_r} i^2(t)dt, \quad (1)$$

где T_r — время выделения энергии в канале разряда (в с).

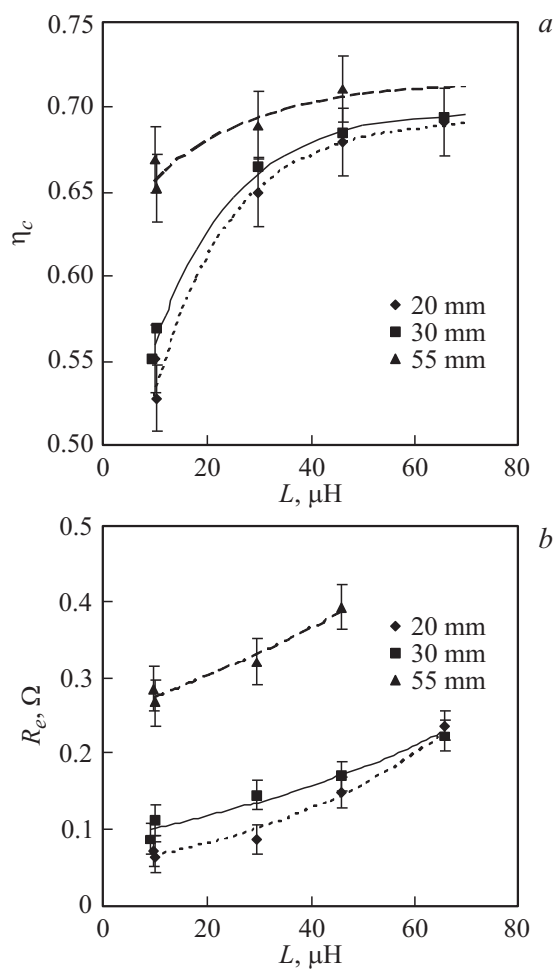


Рис. 3. Влияние индуктивности разрядной цепи на η_e (a), R_e (b), η_p (c). Точки на частях a и b — экспериментальные данные для различных l_c , линиями обозначены аппроксимации данных при $l_c = 20$ (пунктирная), 30 (сплошная) и 55 mm (штриховая).

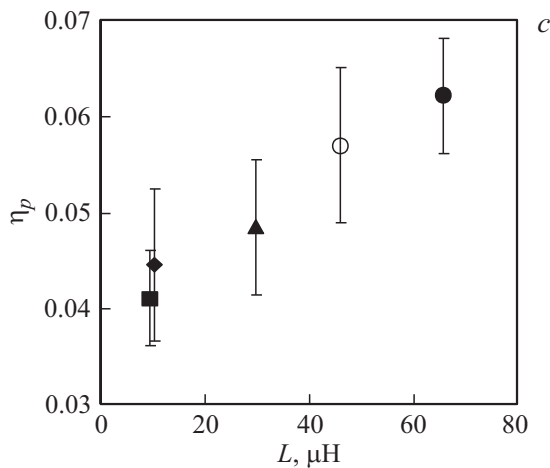


Рис. 3 (продолжение).

Результаты вычислений по формуле (1) показаны на рис. 3, *b*, из которого следует, что увеличение индуктивности разрядного контура существенно увеличивает R_e . При малых l_c величина R_e возрастает от 2.5 до 3 раз, а при l_c , равной 55 mm, — в 1.7 раза. Поскольку R_r практически не зависит от изменения L , а R_e существенно увеличивается, большая часть энергии E_0 выделяется в канале разряда, увеличивая тем самым электрический КПД (η_c).

Причину возрастания R_e в результате увеличения L можно объяснить следующим образом. Увеличение L приводит к большему периоду колебаний тока в разрядном контуре, поэтому максимальная мощность ввода энергии в канал разряда (N_{\max}) монотонно уменьшается от 2 до 4 раз, а максимальная сила тока (i_{\max}) — от 2.5 до 3 раз, что уменьшает давление плазмы в канале и, как следствие, скорость его расширения. В результате этого площадь поперечного сечения канала увеличивается медленнее, чем при малой величине L , что приводит к росту его электрического сопротивления. Результаты математического моделирования разряда по методу [12] показывают, что увеличение L от 10 до 65.6 μH уменьшает плотность тока в канале разряда в 5.5 раза. Это приводит к понижению температуры плазмы в канале и, как следствие, ее электропроводности, что дополнительно увеличивает R_e .

Полученные результаты не противоречат выводам других авторов [1,5,6] о влиянии индуктивности разрядной цепи на силу тока и мощность ввода энергии в канал разряда.

Увеличение L положительно влияет на энергетическую эффективность деформирования пластин. Зависимость η_p от L ($l_c = 30$ mm) показана на рис. 3, с. Она демонстрирует монотонное увеличение η_p от 0.04 до 0.063 (в 1.6 раза) при увеличении L от 10 до 65.6 μ H. Зависимость η_p от L можно объяснить влиянием нескольких факторов. Во-первых, увеличивается количество энергии, выделяющейся в канале разряда (рис. 3, а), и, следовательно, больше энергии передается жидкости, действующей на деформируемую пластину, что приводит к увеличению ее деформаций. Во-вторых, более медленный ввод энергии в канал разряда (даже при одинаковой энергии в канале разряда) существенно изменяет процесс обмена энергией и импульсом между ним и деформируемой пластиной. Это приводит к уменьшению амплитуды и градиентов волн давления, генерируемых каналом разряда, но увеличивает длительность их воздействия на деформируемую пластину. При этом уменьшается скорость прогиба пластины, что приводит к понижению интенсивности генерируемых ею волн разрежения и их влияния в результате интерференции с волнами от канала разряда на уменьшение результирующего давления на пластину. В конечном итоге увеличивается суммарный импульс давления жидкости на пластину, что приводит к увеличению ее деформаций.

На основании анализа результатов выполненного экспериментального исследования можно сделать вывод, что в рассмотренной области изменения параметров разрядного контура увеличение L позволяет существенно повысить эффективность преобразования энергии E_0 в канале разряда до 1.3 раза и в деформируемой пластине до 1.6 раза.

Список литературы

- [1] Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. Киев: Наук. думка, 1990. 311 с.
- [2] Гаврилов Г.Н. и др. // Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред. Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1979. С. 27–31.
- [3] Жовноватюк Я.С. // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. Т. 71. № 4. С. 12–16.
- [4] Hassannejadasl A., Green D.E., Golovashchenko S.F., Samei J., Maris C. // J. Manufactur. Processes. 2014. V. 16. Iss. 3. P. 391–404.

- [5] *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 208 с.
- [6] *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1977. 155 с.
- [7] *Мамутов А.В., Мамутов В.С.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. Т. 190. № 1. С. 101–107.
- [8] *Косенков В.М., Бычков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 9. С. 103–110.
- [9] *Косенков В.М.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 10. С. 133–139.
- [10] *Щерба А.А., Петриченко С.В.* // Техническая электродинамика. 2004. № 3. С. 27–32.
- [11] *Косенков В.М.* // Электронная обработка материалов. 2014. Т. 50. № 2. С. 81–90.
- [12] *Щерба А.А., Косенков В.М., Бычков В.М.* // Электронная обработка материалов. 2015. Т. 51. № 6. С. 71–78.