

03:05

## **Экспериментальное исследование влияния электрических разрядов большой длины в воде на энергию деформации цилиндрической оболочки**

© В.М. Косенков, В.М. Бычков, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

E-mail: v.m.kosenkov@gmail.com

Поступило в Редакцию 21 ноября 2011 г.

Выполнено экспериментальное исследование влияния длины канала высоковольтного разряда в воде на пластические деформации цилиндрической оболочки. Впервые реализованы инициируемые микропроводником электрические разряды в воде, имеющие каналы длиной до 420 мм, и исследованы их электрические характеристики. Определено влияние длины канала разряда на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки.

В течение более 50 лет электрический разряд в воде используется в большом количестве технических приложений (см., например, [1]). Исследованию действия электрического разряда в воде на деформируемые объекты посвящено много работ (см., например, [2–6]). Однако полученные в них результаты не позволяют достоверно определить параметры всех элементов электроразрядной системы, при которых обеспечивается эффективное преобразование энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в механическую работу деформирования материалов.

В работах [2,3] отмечено определяющее влияние длины канала разряда на количество энергии, которую он передает жидкости. В выполненных ранее экспериментальных исследованиях электрических разрядов в воде длина канала разряда, как правило, не превышала 200 мм (максимум — 260 мм), а энергия конденсаторной батареи была меньше 10 кДж. Теоретические исследования [2,7] прогнозируют более эффективное излучение энергии каналом разряда, если его длина существенно больше 100 мм, что наиболее характерно для относительно большой запасаемой энергии (более 10 кДж). Эти обстоятельства опре-

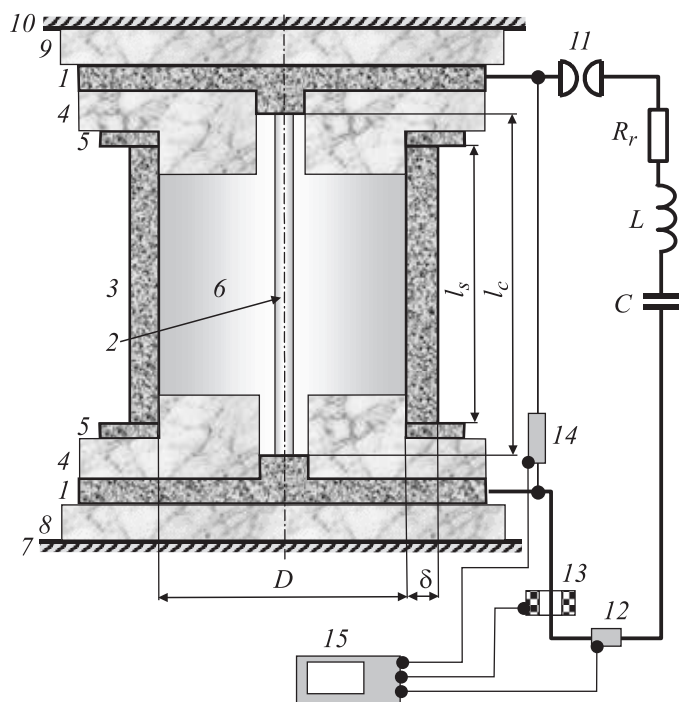


Рис. 1. Схема эксперимента.

деляют актуальность исследования высоковольтных разрядов в воде, имеющих каналы большой длины, и их действия на деформируемые объекты.

Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки.

Выбор цилиндрической оболочки в качестве деформируемого объекта определяется возможностью обеспечения ее осевой симметрии с каналом разряда, что упрощает исследуемую систему и облегчает анализ полученных результатов.

В процессе исследований использовали экспериментальное оборудование, схема которого представлена на рис. 1. Разряд осуществ-

ляли между двумя электродами  $I$ , имеющими форму круглых шайб, установленных на расстоянии  $l_c$  друг от друга, равном длине канала разряда  $2$ . Для инициирования разряда в центральных отверстиях шайб закрепляли медный проводник диаметром  $0.1\text{ mm}$ . Соосно с шайбами устанавливали цилиндрическую оболочку  $3$ , которую фиксировали двумя полиэтиленовыми изоляторами  $4$  с центральными отверстиями. Между плоскими поверхностями оболочки и изоляторов устанавливали стальные шайбы  $5$  для уменьшения контактных напряжений, а также сил трения между оболочкой и изоляторами  $4$ . Благодаря изоляторам  $4$  оболочка не имела существенной электрической связи с элементами разрядной цепи, что исключало появление разряда между ней и инициирующим проводником и, следовательно, не нарушало осевой симметрии разряда и нагружения оболочки. В качестве оболочки использовали бесшовную трубу из алюминиевого сплава АМг5 длиной  $l_s$ , имеющую внешний диаметр ( $D$ )  $75\text{ mm}$  и толщину ( $\delta$ )  $5\text{ mm}$ . Внутреннюю полость  $6$  между оболочкой, изоляторами и электродами, выполняющую функции разрядной камеры, заполняли водой.

Разрядную камеру устанавливали на жесткое основание  $7$  через изолирующую прокладку  $8$ . Иницирующему проводнику придавали прямолинейную форму путем натяжения. На верхний электрод  $I$  устанавливали изолирующую прокладку  $9$  и прижимали разрядную камеру к основанию  $7$  жестким винтовым зажимом через прижимную плиту  $10$  осевым усилием от  $2000$  до  $10\,000\text{ N}$ , чтобы обеспечить герметизацию внутренней полости  $6$  и исключить разлет электродов  $I$  после разряда. В результате сжатия расстояние между электродами  $I$  уменьшалось на  $1\text{--}2\text{ mm}$ , что могло приводить к отклонению инициирующего проводника от оси симметрии до  $5\text{ mm}$ .

Нижний и верхний электроды  $I$  подключали к разрядной цепи, схема замещения которой показана на рис. 1. Во время экспериментов емкость конденсаторной батареи ( $C$ ) была постоянной и равной  $50\text{ }\mu\text{F}$ . Индуктивность ( $L$ ) и активное сопротивление ( $R_r$ ) всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда, определили по осциллограммам тока короткого замыкания электродов  $I$ . Индуктивность равнялась  $4.75\text{ }\mu\text{H}$ , активное сопротивление —  $0.04\text{ }\Omega$ . Коммутацию разрядной цепи выполняли с помощью воздушного разрядника  $11$  в режиме неуправляемого пробоя. Напряжение заряда конденсаторной батареи изменяли в пределах от  $30$  до  $52\text{ kV}$ , что соответствовало энергии заряда батареи от  $22.5$  до  $68\text{ kJ}$ . Длину канала разряда  $l_c$  принимали равной длине медного проводника, инициирующего разряд между

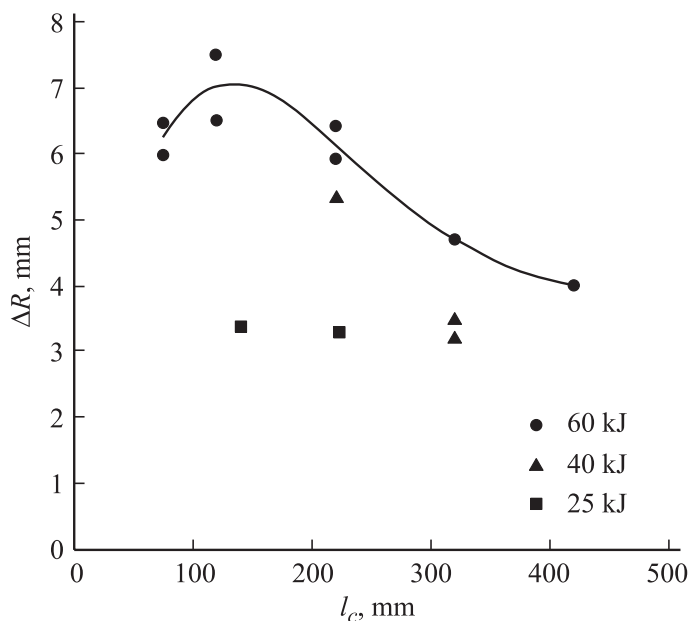
электродами  $l$ , которую изменяли в пределах от 75 до 420 mm. Длина цилиндрической оболочки  $l_s$  всегда была на 25 mm меньше длины канала разряда (рис. 1).

Анализ процессов выполняли на основе измерения силы тока и напряжения на канале разряда, а также конечной формы и размеров оболочки. Силу тока определяли двумя способами — по падению напряжения на омическом шунте  $12$  и с помощью пояса Роговского  $13$ . Напряжение на канале разряда измеряли с помощью емкостного делителя напряжения  $14$ . Для записи изменяющихся во времени сигналов использовали цифровой осциллограф  $15$  марки Tektronix TDS-2024B. Компенсацию индуктивной составляющей напряжения на канале разряда выполняли так же, как в работе [8].

По результатам измерения силы тока и напряжения на канале разряда определяли энергетические характеристики разряда, мощность и энергию, выделившуюся в канале разряда ( $E_c$ ). Полученное значение  $E_c$  сравнивали с начальной энергией конденсаторной батареи ( $E_0$ ) для определения эффективности ее передачи в канал разряда.

По результатам измерения профиля оболочки после деформации определяли изменение ее диаметра по длине в трех меридиональных плоскостях и затем определяли полученные пластические деформации. Используя диаграмму статического деформирования материала цилиндрической оболочки, вычисляли энергию ее пластического деформирования ( $E_p$ ). Сравнение  $E_p$  с  $E_0$  и  $E_c$  позволило получить нижнюю оценку эффективности передачи энергии оболочке от конденсаторной батареи и от канала разряда. Более точное вычисление  $E_p$  в данном исследовании выполнить сложно, так как неизвестна скорость деформации оболочки, без которой невозможно использовать динамическую диаграмму деформирования материала [7].

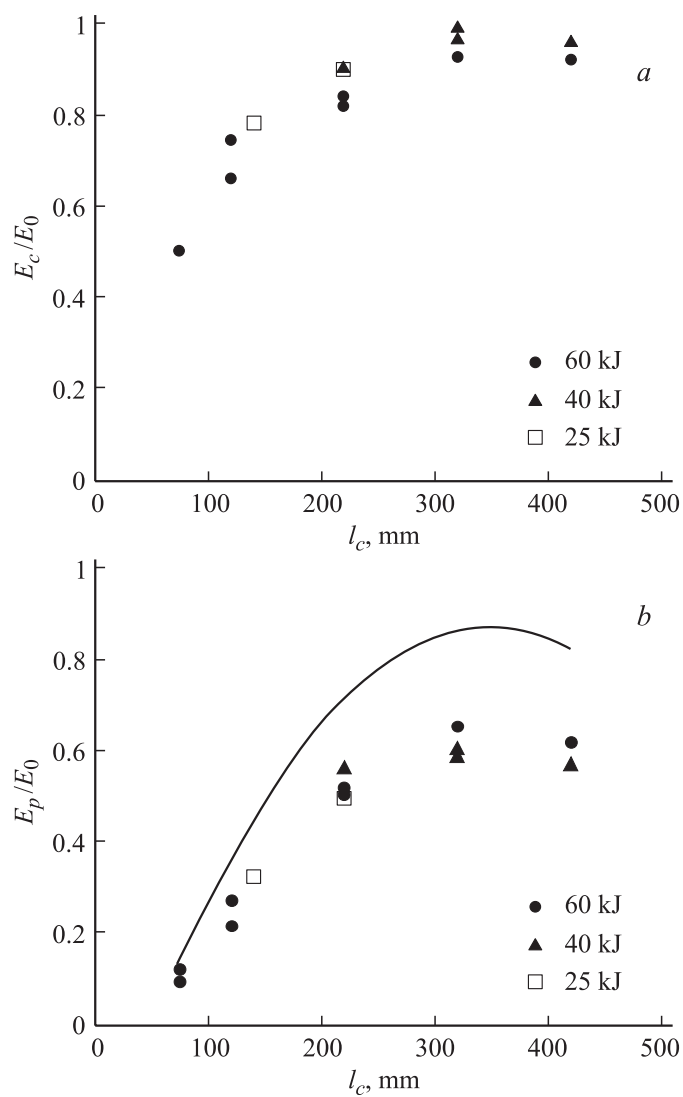
Осциллограммы электрических характеристик разряда, а также изменения профиля оболочки после разряда, позволяют определить влияние на них длины канала разряда. В соответствии с работой [7] увеличение длины канала разряда от 75 до 420 mm существенно меняет режим протекания в нем тока и изменения напряжения — от колебательного до практически аperiodического. Существенно изменяются и амплитудные характеристики силы тока — от 125 kA при 75 mm до 80 kA при 420 mm длины канала разряда. Максимум мощности увеличивается от 0.44 до 2.2 GW, а энергия, выделившаяся в канале разряда до конца активной стадии, увеличивается от 50 до 92%  $E_0$ .



**Рис. 2.** Изменения радиуса оболочки на половине ее длины при трех значениях энергии  $E_0$ : 25, 40 и 60 кДж.

В результате деформирования цилиндрическая оболочка приобретает бочкообразную форму, свидетельствующую о неравномерности ее нагружения на краях из-за малой жесткости полиэтиленовых изоляторов, контактирующих с оболочкой и генерирующих волны разрежения. Влияние краевых эффектов проявляется на расстоянии до 50 мм от концов оболочки независимо от ее длины. Средняя часть оболочки сохраняет форму, близкую к цилиндрической.

Увеличение длины канала разряда приводит к уменьшению плотности энергии  $E_0$  на единицу его длины и оболочки, что вызывает уменьшение изменения среднего радиуса внешней поверхности оболочки ( $\Delta R$ ) в ее срединном сечении (рис. 2). Если длина оболочки меньше 100 мм,  $\Delta R$  уменьшается, так как область влияния краевых эффектов достигает срединного сечения. Пластические деформации оболочки пропорциональны изменению ее радиуса и в исследуемом интервале



**Рис. 3.** Относительная часть энергии  $E_0$ , введенная в канал разряда (а) и использованная для пластической деформации оболочки (б), при трех значениях  $E_0$ : 25, 40 и 60 кДж.

параметров электроразрядной системы не превышали 20%. Отмеченные закономерности сохраняются при изменении  $E_0$ . Изменение  $l_c$  от 75 до 320 mm приводит к увеличению  $E_c$  от 50 до 95%  $E_0$  (рис. 3, *a*). Наибольший эффект от изменения  $l_c$  наблюдается на интервале от 0 до 75 mm, на котором относительная часть энергии  $E_0$ , переданная каналу разряда ( $\eta_c$ ), увеличивается практически от 0 (когда  $l_c$  равно 0) до 50%. Относительная часть энергии  $E_0$ , переданная оболочке ( $\eta_s$ ), возрастает от 12% до максимума, равного 65%, при увеличении  $l_c$  от 75 до 320 mm (рис. 3, *b*). Величины  $l_c$ , большие 320 mm, приводят к уменьшению  $\eta_s$ .

Сравнение максимумов относительной части энергии канала разряда, использованной для пластического деформирования оболочки ( $\eta_{sc}$ ) и энергии  $\eta_s$  (рис. 3, *b*) показывает близость их значений в области максимумов и позволяет оценить степень отличия динамических свойств материала оболочки от статических и уточнить величину  $\eta_s$ . Как следует из рис. 3, *a*, практически вся энергия  $E_0$  передается каналу разряда, когда его длина равна 320 mm. При этой же длине  $l_c$  величины  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$  отличаются друг от друга приблизительно на 5%, тогда как при  $l_c$ , равной 75 mm, они отличаются в 2 раза. Учитывая, что оценка величины  $E_p$  по статической диаграмме занижена [7] и потери энергии в канале разряда (рис. 3, *a*) и в жидкости при  $l_c$ , равной 320 mm, не превышают 10% (максимумы  $\eta_{sc}$  и  $\eta_s$  отличаются мало), можно уточнить величины  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$ , увеличив прежние их значения пропорционально максимальным. На рис. 3, *b* показана линия, характеризующая  $\eta_s$  после корректировки. Увеличение начальной энергии конденсаторной батареи без изменения длины канала разряда приводит к уменьшению относительной части энергии  $E_0$ , переданной каналу разряда ( $\eta_c$ ).

На основании анализа результатов экспериментального исследования можно сделать вывод, что увеличение длины канала разряда от 75 до 320 mm позволяет существенно увеличить эффективность преобразования энергии, накапливаемой в конденсаторной батарее, в канале разряда (до 2 раз) и в деформируемой цилиндрической оболочке (до 8 раз) в рассмотренной области параметров разрядного контура. На интервале изменения  $l_c$  от 75 до 420 mm существует один максимум энергии, переданной оболочке при  $l_c$ , близкой к 320 mm.

**Список литературы**

- [1] *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наук. думка, 1990. 311 с.
- [2] *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 208 с.
- [3] *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1977. 155 с.
- [4] *Косенков В.М., Кускова Н.И.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 10. С. 2017.
- [5] *Барбашова Г.А., Косенков В.М.* // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 93.
- [6] *Косенков В.М.* // ПМТФ. 2011. № 4. С. 43–51.
- [7] *Косенков В.М.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 10. С. 133–139.
- [8] *Щерба А.А., Петриченко С.В.* // Техническая электродинамика. 2004. № 3. С.27–32.