

# Электрические разряды большой длины в воде и их влияние на энергию пластической деформации цилиндрической оболочки

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

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [v.m.kosenkov@gmail.com](mailto:v.m.kosenkov@gmail.com)*

Выполнено экспериментальное исследование процесса преобразования энергии конденсаторной батареи в результате высоковольтного разряда в воде в энергию пластического деформирования цилиндрической оболочки. Впервые реализованы иницируемые 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.

*Ключевые слова: высоковольтный разряд в воде, эффективность преобразования энергии, длина канала разряда, работа пластической деформации, цилиндрическая оболочка.*

УДК 537.528:539.3

## ВВЕДЕНИЕ

В течение более 50 лет электрический разряд в воде используется в большинстве технических приложений [1, 2]. В последние десятилетия появились новые приложения электроразрядных технологий [3–7]. В их числе – технологии деформирования материалов под действием ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, которые имеют большое практическое значение. Несмотря на длительный период практического применения разряда в воде для штамповки, развальцовки, вырезки и других видов деформирования материалов, происходящие при этом физические процессы нельзя признать полностью изученными, что ограничивает дальнейшее развитие этих технологий.

Недостаточная изученность процессов преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в энергию пластического деформирования материалов ограничивает возможность целенаправленного повышения эффективности ее использования для этих целей. Преобразование энергии проходит три основных этапа. На первом – часть энергии, запасённой в конденсаторной батарее, преобразуется в энергию плазмы канала разряда, остальная теряется в элементах разрядного контура. На втором – часть энергии плазмы передаётся окружающей его жидкости. На третьем – часть энергии жидкости расходуется на выполнение работы пластической деформации деформируемых материалов.

Первые два этапа достаточно изучены в предположении, что разряд происходит в неограниченной жидкости [1, 8–11]. Были опреде-

лены критерии оптимизации этих процессов: по максимуму энергии, вводимой в канал разряда, по максимуму мощности ввода энергии в канал разряда, по максимуму давления жидкости на заданном расстоянии от канала разряда, по максимуму импульса, сообщаемого жидкости. В качестве параметра оптимизации использовалась длина канала разряда, зависящая от параметров разрядной цепи и жидкости. Было определено наличие единственного максимума для каждого из названных критериев.

Третий этап преобразования энергии изучен существенно меньше, несмотря на множество проведённых исследований. Это можно объяснить большим разнообразием и сложностью механических объектов, на которые действует ударная волна. Получены приближённые оценки оптимальных параметров процессов деформирования материалов, например [2, 3, 6, 7, 12, 13], наиболее обоснованными из которых являются процессы развальцовки труб в трубных решётках теплообменных аппаратов. Выполнены отдельные экспериментальные оценки механического КПД преобразования энергии без необходимого их обобщения. Теоретические исследования этого этапа характеризуются существенными упрощениями изучаемых объектов, что также ограничивает практическое применение полученных результатов.

В последнее время выполнено теоретическое исследование пластического деформирования цилиндрической оболочки, в котором учтены все три этапа преобразования энергии, запасённой в конденсаторной батарее [14]. При заданных параметрах электроразрядной системы определена длина канала разряда, при которой достигается максимальный механический КПД

преобразования энергии. Оптимальная длина канала разряда может достигать 500 мм при запасаемой энергии 50 кДж.

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 [8]. Эти обстоятельства определяют актуальность экспериментальных исследований высоковольтных разрядов в воде, имеющих каналы большой длины, и их действия на деформируемые объекты. В качестве объекта исследования рассматривался процесс преобразования энергии в электроразрядной системе, включающей разрядный контур, канал разряда, заполненную водой разрядную камеру и цилиндрическую оболочку.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность использования энергии конденсаторной батареи для пластического деформирования цилиндрической оболочки.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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

При этом использовалось экспериментальное оборудование, схема которого представлена на рис. 1. Разряд осуществляли между двумя электродами 1, имевшими форму круглых шайб, расположенных 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 мм. Соосно с шайбами устанавливали цилиндрическую оболочку 3, которую фиксировали двумя полиэтиленовыми изоляторами 4 с центральными отверстиями. Между плоскими поверхностями оболочки и изоляторов располагали стальные шайбы 5 для уменьшения контактных напряжений, а также сил трения между оболочкой и изоляторами 4. Благодаря изоляторам 4 у оболочки не было существенной электрической связи с элементами разрядной цепи, что исключало появление разряда между ней и иницирующим проводником и, следовательно, не нарушало осевой симметрии разряда и нагружения оболочки. В качестве оболочки использовали бесшовную трубу из алюминиевого сплава АМг5М длиной  $l_s$ , имеющую внешний диаметр  $D$  75 мм и толщину  $\delta$  5 мм. Внутрен-

нюю полость  $b$  между оболочкой, изоляторами и электродами, выполнявшую функции разрядной камеры, заполняли водой.

Разрядную камеру помещали на жёсткое основание 7 через изолирующую прокладку 8. Иницирующему проводнику натяжением придавали прямолинейную форму. На верхний электрод 1 устанавливали изолирующую прокладку 9 и прижимали разрядную камеру к основанию 7 жёстким винтовым зажимом через прижимную плиту 10 осевым усилием от 2000 до 10000 Н, чтобы обеспечить герметизацию внутренней полости  $b$  и исключить разлёт электродов 1 после разряда. В результате сжатия расстояние между электродами 1 уменьшалось на 1–2 мм, что могло привести к отклонению иницирующего проводника от оси симметрии до 5 мм.

Нижний и верхний электроды 1 подключали к разрядной цепи, схема замещения которой показана на рис. 1. Во время экспериментов ёмкость конденсаторной батареи  $C$  была постоянной и равной 50 мкФ. Индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R_r$  всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда, определяли по осциллограммам тока короткого замыкания электродов 1. Индуктивность равнялась 4,75 мкГн, активное сопротивление – 0,04 Ом. Коммутацию разрядной цепи выполняли с помощью воздушного разрядника 11 в режиме неуправляемого пробоя. Напряжение заряда конденсаторной батареи изменяли в пределах от 30 до 52 кВ, что соответствовало энергии заряда батареи 22,5–68 кДж. Длину канала разряда  $l_c$  принимали равной длине медного проводника, иницирующего разряд между электродами 1, которую изменяли в пределах от 75 до 420 мм. Длина цилиндрической оболочки  $l_s$  всегда была на 25 мм меньше длины канала разряда (см. 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 ёмкостного 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, как в работе [15].

По результатам измерения силы тока и напряжения на канале разряда определяли энергетические характеристики разряда, мощность и энергию, выделившуюся в канале разряда  $E_c$ .

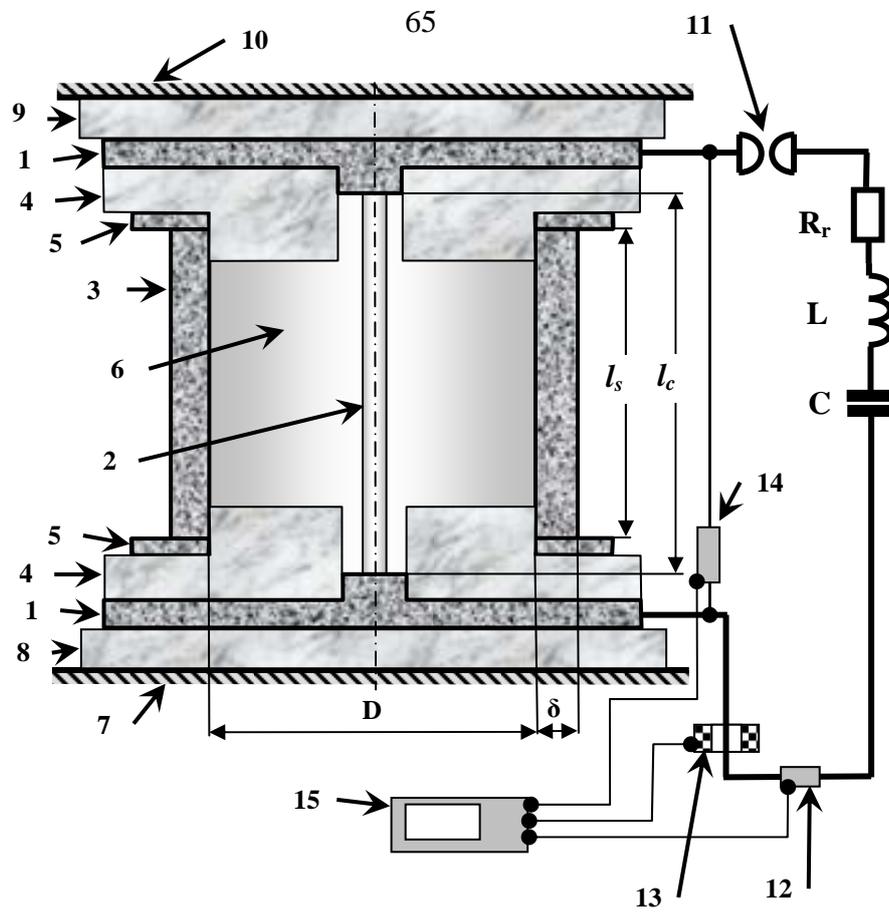


Рис. 1. Схема эксперимента.

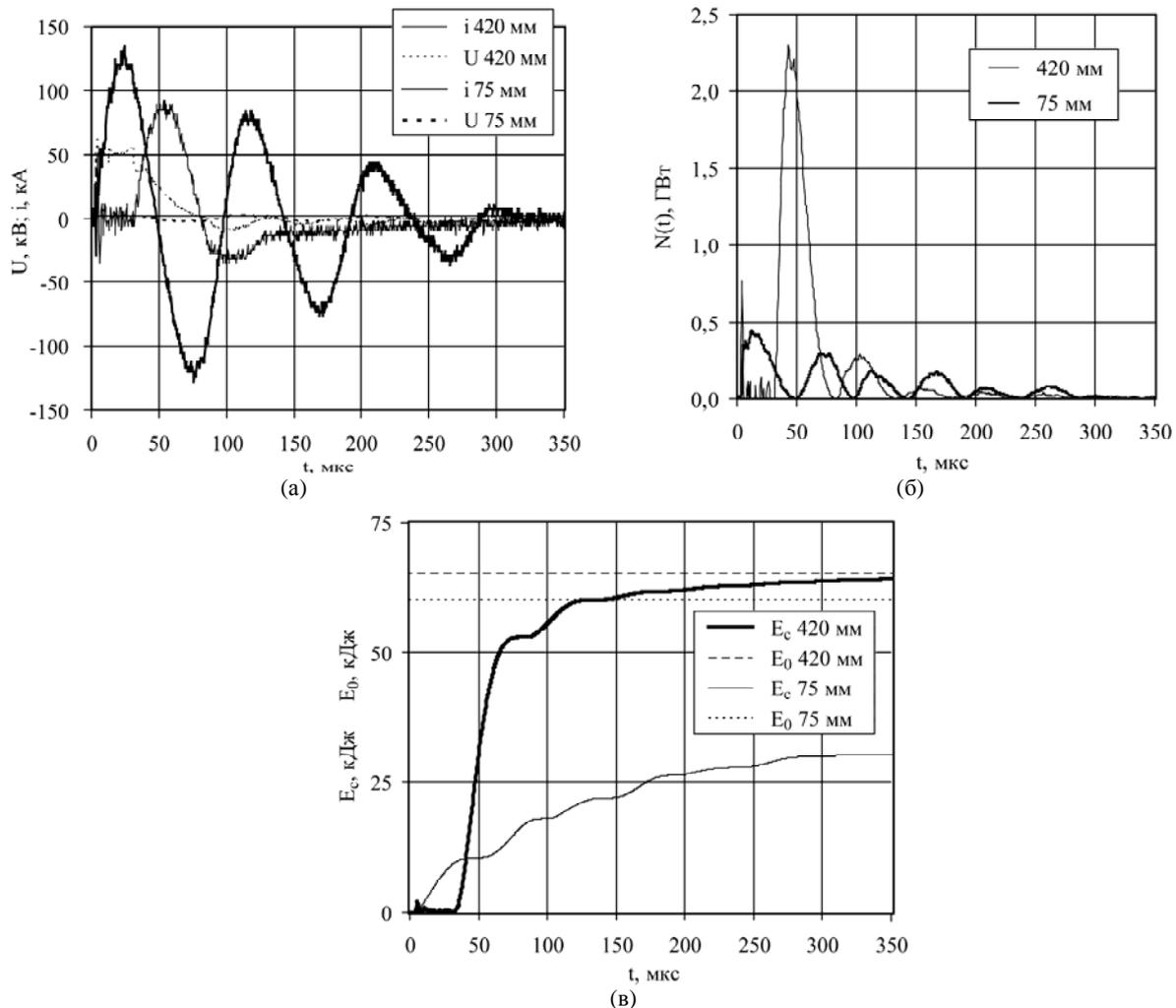


Рис. 2. Зависимости от времени для двух длин канала разряда: силы тока  $i$  и напряжения  $U$  (а); мощности ввода энергии в канал разряда (б), а также энергии, введённой в канал разряда,  $E_c$  и запасённой в конденсаторной батарее  $E_0$  (в).

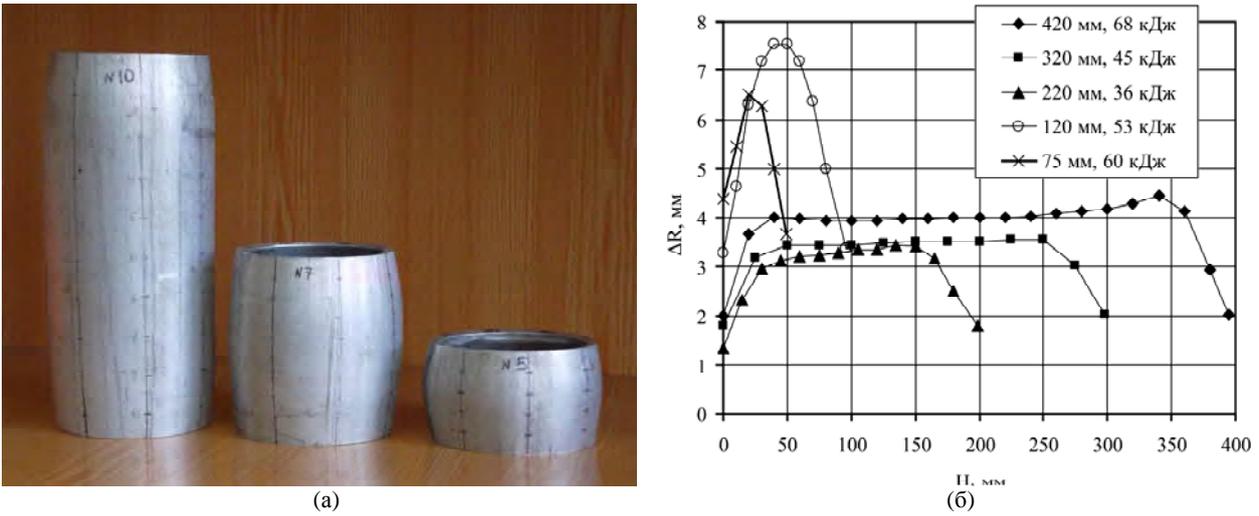


Рис. 3. Вид оболочек после деформации (а) и изменения профиля оболочек в меридиональной плоскости (б).

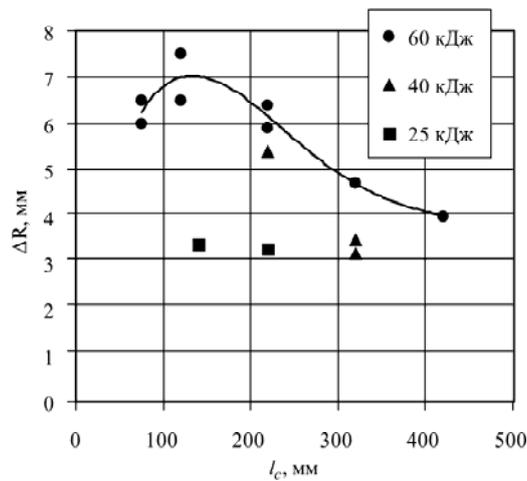


Рис. 4. Изменения радиуса оболочки на половине её длины при трёх значениях энергии  $E_0$ , кДж: 25, 40 и 60.

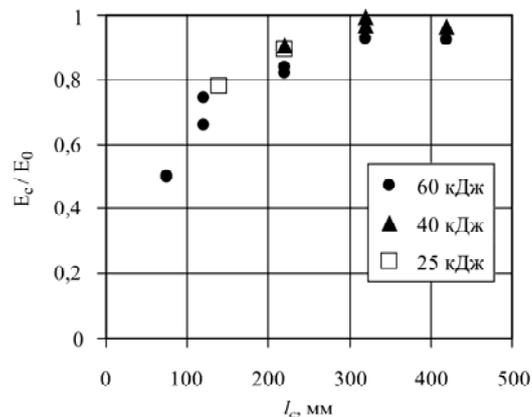


Рис. 5. Относительная часть энергии  $E_0$ , введённая в канал разряда при трёх значениях  $E_0$ , кДж: 25, 40 и 60.

Полученное значение  $E_c$  сравнивали с начальной энергией конденсаторной батареи  $E_0$  для определения эффективности её передачи в канал разряда.

По результатам измерения профиля оболочки после деформации определяли изменение её диаметра по длине в трёх меридиональных плоскостях и затем вычисляли полученные пластические деформации. Используя диаграмму

статического деформирования материала цилиндрической оболочки, вычисляли энергию её 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 канала разряда. Более точное вычисление  $E_p$  в данном исследовании выполнить сложно, так как неизвестна скорость деформации оболочки, без которой

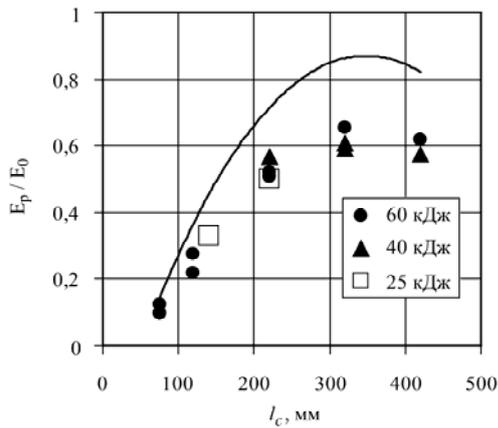


Рис. 6а. Относительная часть энергии  $E_0$ , использованная для пластической деформации оболочки при трёх значениях энергии  $E_0$ : 25, 40 и 60 кДж.

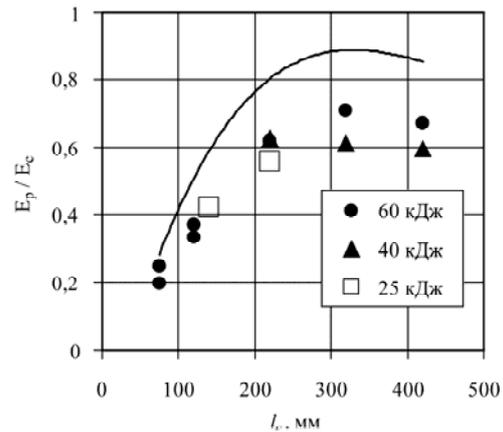


Рис. 6б. Относительная часть энергии  $E_c$ , использованная для пластической деформации оболочки при трёх значениях энергии  $E_0$ : 25, 40 и 60 кДж.

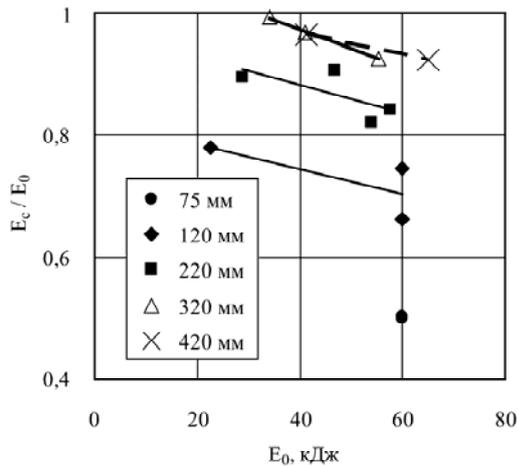


Рис. 7. Относительная часть энергии  $E_0$ , введённая в канал разряда.

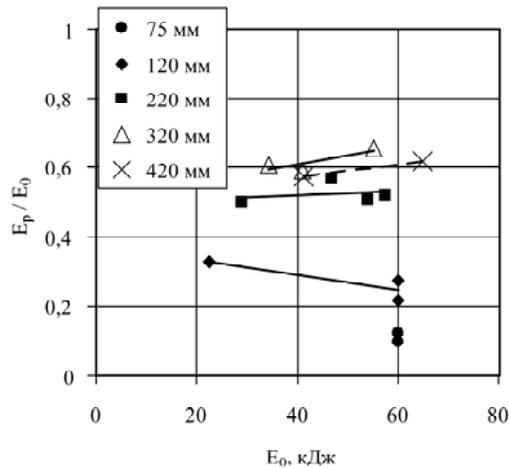


Рис. 8. Относительная часть энергии  $E_0$ , использованная для пластической деформации оболочки.

невозможно использовать динамическую диаграмму деформирования материала [14].

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Типичные электрические и энергетические характеристики разряда, а также изменения профиля оболочки после разряда, представленные на рис. 2, позволяют определить влияние на них длины канала разряда. В соответствии с работой [14] увеличение длины канала разряда от 75 до 420 мм существенно меняет режим протекания в нём тока и изменения напряжения (рис. 2а) – от колебательного до практически аperiodического. Существенно изменяются и амплитудные характеристики силы тока – от 125 кА при 75 мм до 80 кА при 420 мм длины канала разряда. Мощность разряда (рис. 2б) и энергия, выделившаяся в канале разряда (рис. 2в), также радикально изменяются. Максимум мощности увеличивается от 0,44 до 2,2 ГВт, а энергия, полученная каналом до конца активной стадии разряда, – от 50 до 92%  $E_0$ .

В результате деформирования цилиндрическая оболочка приобретает бочкообразную форму (рис. 3а), свидетельствующую о нерав-

номерности её нагружения на краях из-за малой жёсткости полиэтиленовых изоляторов, контактирующих с оболочкой и генерирующих волны разрежения. Влияние краевых эффектов проявляется на расстоянии до 50 мм от концов оболочки независимо от её длины  $H$  и энергии конденсаторной батареи (рис. 3б). 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 изменение среднего радиуса внешней поверхности оболочки  $\Delta R$  в её срединном сечении (рис. 4). Эта закономерность нарушается только тогда, когда область влияния краевых эффектов достигает срединного сечения оболочки, если её длина меньше 100 мм, что приводит к уменьшению  $\Delta R$ . Эти закономерности сохраняются при изменении  $E_0$ . Изменение  $l_c$  от 75 до 320 мм приводит к увеличению  $E_c$  от 50 до 95%  $E_0$  (рис. 5). Наибольший эффект от изменения  $l_c$  наблюдается в интервале от 0 до 75 мм, когда 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 мм (рис. 6а). Величины  $l_c$ , большие 320 мм, приводят к уменьшению  $\eta_s$ . Аналогичным образом изменяется относительная часть энергии канала разряда, переданная оболочке  $\eta_{sc}$  (рис. 6б).

Сравнение данных на рис. 6 показывает близость их значений в области максимумов и позволяет оценить степень отличия динамических свойств материала оболочки от статических и уточнить величины  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$ . Как следует из рис. 5, практически вся энергия  $E_0$  передается каналу разряда при его длине 320 мм. 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 мм вдвое больше. Максимумы энергии пластической деформации оболочки с учетом и без учета динамических характеристик материала в относительно малой степени зависят от длины канала разряда [14]. Учитывая, что оценка величины  $E_p$  по статической диаграмме занижена [14] и потери энергии в канале разряда (рис. 5) и в жидкости (рис. 6) при  $l_c$ , равной 320 мм, не превышают 10%, можно уточнить  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$ , увеличив прежние их значения пропорционально максимальным величинам. На рис. 6 показаны линии, характеризующие  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$  после корректировки.

Данные, представленные на рис. 7 и 8, позволяют оценить тенденцию изменения величин  $\eta_s$  и  $\eta_{sc}$  при увеличении начальной энергии конденсаторной батареи. В этом случае энергия, передаваемая каналу разряда, уменьшается, а энергия пластической деформации оболочки при  $l_c$ , большей 200 мм, увеличивается. Если  $l_c$  меньше 200 мм, то  $E_p$  уменьшается вследствие влияния краевых эффектов деформации оболочки.

## ВЫВОДЫ

На основании анализа результатов экспериментального исследования можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение длины канала разряда от 75 до 320 мм позволяет существенно повысить 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.

2. На интервале изменения длины канала разряда от 75 до 420 мм существует максимум энергии, передаваемой оболочке от конденсаторной батареи, который достигается при длине канала, близкой к 320 мм.

3. Используя максимальное значение энергии пластической деформации оболочки, определенное по статической диаграмме деформирования материала, можно выполнять оценку влияния динамических свойств материала на энергию его пластической деформации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Ищенко Ж.Н., Поздеев В.А. *Деформирование и запрессовка труб электровзрывом*. Николаев: Атолл, 2003. 212 с.
3. Barbashova G.A. Electric Circuit Inductance Dependence of a Hydrodynamic Load on a thrown Plate During High-speed Impact Welding of Two Plates. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2012, **48**(3), 260–263.
4. Boguslavskii L.Z., Nazarova N.S., Vinnichenko D.V., Rud' A.D., Urubkov I.V. Electrodischarge Method for Synthesizing Nanocarbon from Gaseous Raw Hydrocarbons. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2011, **47**(4), 344–350.
5. Boguslavskii L.Z., Kuskova N.I., Khainatskii S.A., Yushchishina A.N. Study of the Possibility to Synthesize Nanocarbon at Electric Discharge in Solutions of Organic Acids. Part I: Choosing the Working Fluid and Generator Parameters. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2011, **47**(4), 356–361.
6. Zhekul V.G., Poklonov S.G., Smirnov A.P. Experimental Studies of the Effectiveness of the Electrodischarge Effect on a Physical Model of the Bottom-hole Zone of the Productive Layer. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2011, **47**(1), 89–93.
7. Rizun A.R., Denisyuk T.D., Golen' Y.V., Kononov V.Y., Rachkov A.N. Electric Discharge Disintegration and Coal Desulphurization in the Manufacture of Water-coal Fuel. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2011, **47**(1), 100–102.
8. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
9. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1977.
10. Косенков В.М., Кускова Н.И. Развитие пробоя в воде. *ЖТФ*. 1987, **57**(10), 2017–2020.
11. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. К.: Наук. думка, 1979. 208 с.
12. Барбашова Г.А., Косенков В.М. Определение гидродинамической нагрузки на стенки нефтяной скважины, формируемой электрическим разрядом. *ПМТФ*. 2001, **42**(6), 93–97.
13. Косенков В.М. Резонансные колебания цилиндрической стенки разрядной камеры в результате электрического разряда в воде. *ПМТФ*. 2011, **52**(4), 43–51.
14. Косенков В.М. Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пла-

тического деформирования цилиндрической оболочки. *ЖТФ*. 2011, **81**(10), 133–139.

15. Щерба А.А., Петриченко С.В. Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2004, (3), 27–32.

*Поступила 06.04.12*

*После доработки 18.09.12*

### **Summary**

Experimental research is conducted of the process of energy transformation of a capacitor bank as a result of

a high-voltage discharge in water into the energy of plastic deformation of a cylindrical diaphragm. For the first time the electric discharges in water having channels with length to 420 mm initiated by a microconductor are realized, and also their electric characteristics are studied. The influence of the discharge channel length on efficiency of plastic deformation of a cylindrical shell is determined.

*Keywords: high-voltage discharge in water, efficiency of energy transfer, discharge channel length, work of plastic deformation, cylindrical shell.*