

04;05;12

## Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки

© В.М. Косенков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
54018 Николаев, Украина  
e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com

(Поступило в Редакцию 15 февраля 2011 г.)

Выполнено исследование процесса преобразования энергии конденсаторной батареи в результате высоковольтного электрического разряда в воде в работу пластического деформирования цилиндрической оболочки с учетом скоростного упрочнения материала. В качестве основного метода исследования использовано математическое моделирование в связанной геометрически и физически нелинейной постановке электродинамических, гидродинамических и упругопластических волновых процессов в деформируемой разрядной камере. Для заданного набора параметров исследуемой динамической системы определена длина канала разряда, при которой доля энергии конденсаторной батареи, передаваемая цилиндрической оболочке, максимальна.

### Введение

Высоковольтные разряды в воде находят широкое применение в качестве импульсного источника энергии в различных волновых процессах [1–3]. В отличие от взрывчатых веществ (ВВ) величиной и скоростью выделения энергии электрического разряда можно управлять в достаточно широких пределах, изменяя время выделения энергии от нескольких до сотен микросекунд. Легко обеспечить повторение разрядов с частотой от 0.1 до 10 Hz в автоматическом режиме. Так же как при использовании ВВ, энергия от канала разряда к объекту воздействия (деформируемому телу) передается ударными волнами, а эффективность воздействия во многом определяется энергией ударных волн и работой расширения канала разряда. Заряд конденсаторной батареи служит источником энергии, передаваемой объекту.

Энергия последовательно преобразуется в разрядном контуре, канале разряда, жидкости и деформируемом теле. Причем в каждом из этих элементов процесс преобразования энергии определяется волновыми процессами. Их изучению посвящено большое количество работ. Электродинамические процессы в разрядном контуре и канале разряда подробно исследованы в [4–8]. Основные особенности волновых процессов в жидкости исследованы в [9–11]. Проблемам взаимодействия гидродинамических волн с твердыми телами посвящены работы [12–15]. Однако отсутствуют работы, в которых исследован весь процесс преобразования энергии конденсаторной батареи в колебательном контуре, канале разряда, жидкости и деформируемых телах с количественной оценкой энергии в каждом из них. Актуальность таких исследований определяется необходимостью повышения эффективности преобразования энергии конденсаторной батареи в работу пластической деформации материалов.

Как правило, преобразование энергии происходит в конечном объеме жидкости, ограниченном стенками разрядной камеры, а также пластинами и оболочками, которым в конечном итоге и передается часть энергии конденсаторной батареи в процессе пластического деформирования. Разрядные камеры характеризуются большим разнообразием форм и размеров [1–3], пластические деформации в них практически отсутствуют. Пластины и оболочки являются основными объектами воздействия ударных волн, поэтому им необходимо передать как можно больше энергии конденсаторной батареи.

Многие из существующих разрядных камер имеют достаточно сложную с точки зрения динамического расчета конструкцию, поэтому, чтобы разобраться детально с волновыми процессами в жидкости и деформируемых телах, в настоящей работе рассмотрены процессы в камерах наиболее простой цилиндрической формы. Такие разрядные камеры обладают осевой симметрией и преимущественно радикальными перемещениями жидкости и деформируемых тел, что естественным образом облегчает анализ волновых процессов.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении влияния длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность использования энергии конденсаторной батареи для пластического деформирования цилиндрической оболочки.

### Постановка задачи и алгоритм ее решения

Основным объектом исследования являлись процессы преобразования энергии в колебательном контуре и разрядной камере, представленные на рис. 1. Внутренний диаметр ( $D$ ), толщина оболочки ( $\delta$ ) и расстояние

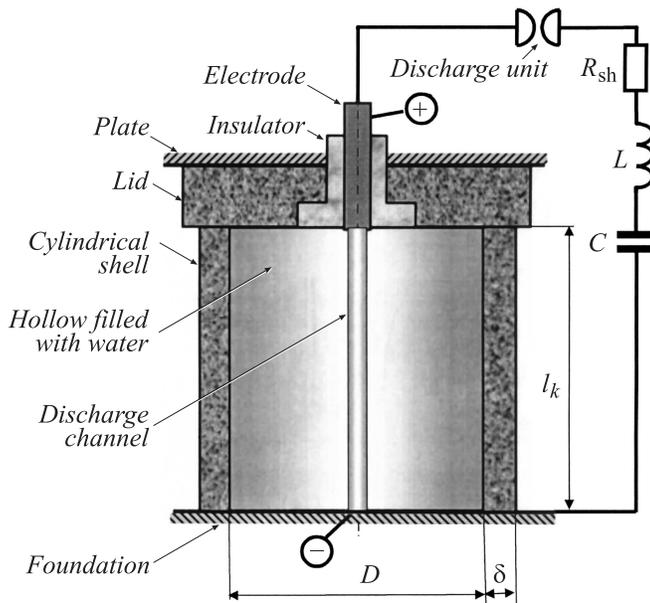


Рис. 1. Расчетная схема колебательного контура и разрядной камеры.

между электродами ( $l_k$ ) — это геометрические параметры разрядной камеры, а емкость конденсаторной батареи ( $C$ ), индуктивность разрядного контура ( $L$ ) и электрическое сопротивление его элементов, кроме канала разряда ( $R_{sh}$ ), — это физические параметры разрядного контура.

Канал электрического разряда имеет достаточно сложную форму и заполнен низкотемпературной плазмой. Его формирование и расширение сопровождаются нелинейными электро- и гидродинамическими процессами в плазме и окружающей жидкости. Однако с точки зрения преобразования энергии эти процессы можно рассмотреть в упрощенной постановке, используя ряд предположений:

— канал разряда и образовавшаяся впоследствии парогазовая полость имеют форму кругового цилиндра;

— ось канала разряда совпадает с осью разрядной камеры;

— термодинамические параметры плазмы и плотность электрического тока распределены однородно в объеме канала разряда;

— затраты энергии на пробой слоя жидкости между электродами и формирование канала разряда пренебрежимо малы;

— расстояние между электродами равно высоте разрядной камеры;

— разрядная камера заполнена идеальной сжимаемой жидкостью;

— эффектом Рихтмайера–Мешкова в процессе сжатия парогазовой полости можно пренебречь;

— трением цилиндрической стенки о сопрягаемые поверхности можно пренебречь;

— плоские поверхности разрядной камеры, ограничивающие полость, заполненную водой, абсолютно твердые и неподвижные.

Математическая модель исследуемой системы состоит из уравнений, описывающих волновое преобразование энергии в разрядном контуре, гидродинамические явления в жидкости и динамику деформируемого твердого тела.

Электродинамические колебательные процессы в разрядном контуре характеризуются уравнением баланса напряжений [5]

$$L \frac{di}{dt} + (R_{ck} + R_{sh}) i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_0, \quad (1)$$

где  $R_{ck} = \frac{A l_k^2 (\gamma - 1)}{P_k V_k}$  — электрическое сопротивление канала разряда [5],  $\Omega$ ;  $P_k$  — давление в канале разряда, Па;  $V_k = \pi R_k^2 l_k$  — объем канала разряда,  $m^3$ ;  $R_k$  — радиус канала разряда, м;  $l_k$  — расстояние между электродами, м;  $\gamma$  — показатель адиабаты плазмы в канале разряда;  $A$  — искровая постоянная [6],  $V^2 \cdot s/m^2$ ;  $i$  — сила тока в канале разряда, А;  $t$  — время, с;  $U_0$  — напряжение заряда конденсаторной батареи, В.

Процесс преобразования электрической энергии, выделившейся в канале разряда, во внутреннюю энергию плазмы и работу расширения канала в жидкости определен уравнением баланса энергии в канале разряда [7]

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{d}{dt} (P_k V_k) + P_k \frac{dV_k}{dt} = i^2 R_{ck}. \quad (2)$$

Волновые процессы в жидкости характеризуются уравнениями газовой динамики [16]

$$\frac{\partial(r\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho w)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(r\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial[r(\rho w^2 + p)]}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial[r\rho(e + 0.5w^2)]}{\partial t} + \frac{\partial\{r[\rho w(e + 0.5w^2) + wp]\}}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

где  $w$  — радиальная составляющая скорости жидкости, м/с;  $r$  — радиальная координата, м;  $\rho$  — плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $p$  — давление жидкости, Па;  $e$  — удельная внутренняя энергия жидкости,  $J/kg$ .

Для замыкания системы (1)–(5) использовали двухчленное уравнение состояния [16,17], определяющее связь между удельной внутренней энергией жидкости ( $e$ ) и параметрами состояния  $p$  и  $\rho$ :

$$e(p, \rho) = \frac{p - c_0^2(\rho - \rho_0)}{(k - 1)\rho}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$  и  $c_0$  — плотность и скорость звука в невозмущенной жидкости;  $k$  — эмпирический коэффициент (для воды  $k = 7.15$ ).

Кавитацию в жидкости учитывали, используя принцип, согласно которому давление не может быть меньше давления насыщенных паров при данной температуре [18].

Динамическое деформирование тел с учетом распространения продольных и поперечных волн описывается уравнениями Навье–Коши [19,20]. В цилиндрической системе координат с учетом принятых допущений можно записать уравнение движения в напряжениях, отражающее связь между компонентами тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  и радиальной скоростью точек тела  $u$ :

$$\rho_M = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial r} + \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{r}, \quad (7)$$

где  $u$  — радиальная составляющая скорости точек тела, м/с;  $\rho_M$  — плотность материала деформируемого тела, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — компоненты тензора напряжений, Па.

Напряжения и деформации связаны между собой обобщенным законом Гука. Его выражение в тензорном виде —

$$\dot{S}_{ij} = 2G \left( \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon} \frac{1}{3} \delta_{ij} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - \sigma \delta_{ij}, \quad (9)$$

где  $S_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — компоненты деватора напряжений, Па;  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — компоненты тензора деформаций;  $\sigma$  — шаровая составляющая тензора напряжений, Па;  $\varepsilon$  — объемная деформация;  $G$  — модуль сдвига, Па,

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}. \quad (10)$$

Точка над символами означает операцию дифференцирования по времени.

Компоненты тензора скоростей деформаций определяются геометрическими соотношениями Коши

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \dot{\varepsilon}_{22} = \frac{u}{r}, \quad \dot{\varepsilon}_{33} = 0. \quad (11)$$

Шаровая составляющая тензора напряжения связана с объемной деформацией дифференциальным соотношением

$$\sigma = -K \dot{\varepsilon}, \quad (12)$$

где  $K$  — модуль объемного сжатия, Па.

Пластическое течение материала определяется условием текучести Губера–Мизеса [19]

$$I = S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{13}^2 + S_{23}^2) - \frac{2}{3} \sigma_T^2 \geq 0, \quad (13)$$

где  $\sigma_T$  — напряжения пластического течения материала, Па.

Напряжения  $\sigma_T$  зависят от величины и скорости пластической деформации. По методу разрезного стержня Гопкинсона–Кольского нами получены диаграммы динамического сжатия сплава АМг5 М при заданной скорости деформации (рис. 2) и диаграмма квазистатического сжатия этого сплава со скоростью деформации

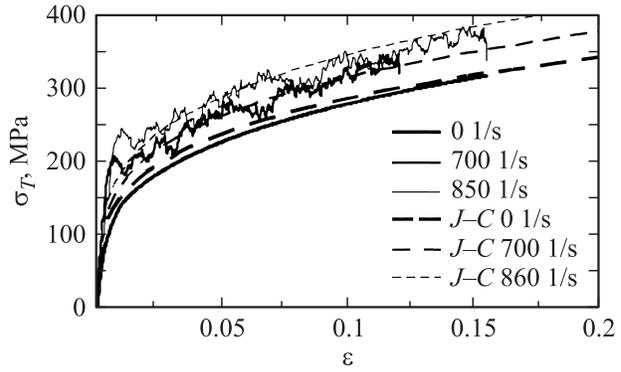


Рис. 2. Аппроксимация динамических и статической диаграмм деформирования сплава АМг5 уравнением модели Джонсона–Кука.

менее  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Эти диаграммы аппроксимированы уравнением модели пластичности Джонсона–Кука [21]

$$\sigma_T = 522 \cdot 10^6 (\varepsilon^p + 0.0037)^{0.2609} \times \left[ 1 + 1.88 \cdot 10^{-11} \left( \frac{d\varepsilon^p}{dt} \right)^{3.425} \right], \quad (14)$$

где  $\varepsilon^p$  — эффективная пластическая деформация материала.

Результаты аппроксимации экспериментальных данных формулой (14) показаны на рис. 2 штриховыми линиями.

Уравнения (3)–(5) и (7) дополнены граничными условиями, соответствующими физике волновых процессов. На плоских поверхностях разрядной камеры нормальные компоненты скорости жидкости равны нулю. На границах между каналом разряда и жидкостью, а также жидкостью и поверхностью цилиндрической стенки разрядной камеры заданы условия на контактном разрыве. До электрического разряда все элементы исследуемой системы находились в состоянии покоя.

Решение системы уравнений (1)–(3) получено с помощью методов, использованных в работах [9,20]. Непрерывная область решения заменялась дискретной с помощью подвижной конечноразностной сетки. Аппроксимация уравнений производилась по методу конечных объемов. Дискретизацию области решения выполняли по комбинированной лагранжево–эйлеровой схеме, за исключением контактных границ, положение которых определяли по схеме Лагранжа для уменьшения погрешности решения. Начальный шаг дискретизации по пространственной координате выбирали из условия, что шаг по времени в жидкости и твердом теле одинаков. Величину шага по времени определяли по условию устойчивости вычислительного процесса Куранта–Фридрихса–Леви [22].

Дифференциальные уравнения в частных производных (3)–(5) и (7) преобразованы к интегральному виду по

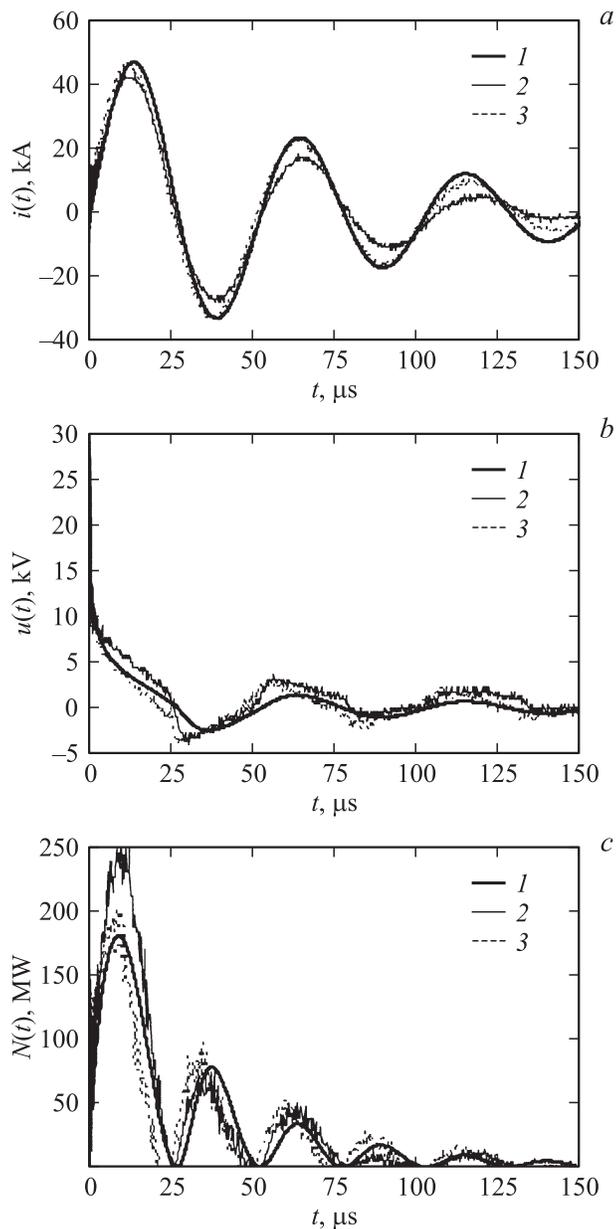


Рис. 3. Характеристики канала разряда: *a* — сила тока; *b* — напряжение; *c* — мощность (*1* — расчет; *2, 3* — эксперимент).

теореме Остроградского–Гаусса. После этих преобразований все дифференциальные уравнения приведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Для ее решения использован явный двухшаговый метод Эйлера–Коши. Устранение нефизичных колебаний полученного решения выполняли на третьем шаге по методу Абарбанеля и Цваса [22]. Если напряжения в материале достигали поверхности текучести (13), то использовали процедуру их корректировки [21].

Тестирование математической модели выполнено, исходя из логических и фундаментальных физических принципов, а также путем сравнения с известными решениями волновых задач. Учитывая принципиальную важ-

ность точности расчета энергии, выделившейся в канале разряда, для достоверности моделирования волновых процессов выполнено сравнение результатов расчета и измерения силы тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$  между электродами (рис. 3, *a, b*). Измерения выполнены на разрядном контуре, характеризующемся следующими параметрами: емкость конденсаторной батареи  $C = 16 \mu\text{F}$ ; напряжение заряда батареи  $U_0 = 30 \text{ kV}$ ; индуктивность разрядного контура  $L = 4 \mu\text{H}$ ; расстояние между электродами  $l_k = 32 \text{ mm}$ ; активное сопротивление шин разрядного контура  $R_{\text{sh}} = 0.04 \Omega$ . Для оценки стабильности неиницируемого разряда на рис. 3, *a, b* приведено по две пары линий, обозначающих результаты измерения силы тока и напряжения. Как видно из рисунков, расчетные кривые находятся в пределах погрешности экспериментальных данных, что свидетельствует о достоверности расчета источника ударной волны. На рис. 3, *c* приведены расчетная и экспериментальные кривые мощности электрического разряда  $N(t)$ , которые также удовлетворительно согласуются между собой.

## Результаты исследования

Баланс энергии в процессе ее преобразования в элементах разрядной цепи и разрядной камеры исследован на примере колебательного контура, характеризуемого параметрами  $C = 50 \mu\text{F}$ ,  $L = 7 \mu\text{H}$ ,  $R_{\text{sh}} = 0.04 \Omega$ ,  $U_0 = 48 \text{ kV}$ . Для оценки влияния параметров электрической цепи на перераспределение энергии в ее элементах расстояние между электродами ( $l_k$ ) изменяли в пределах от 50 до 1800 mm. Внутренний диаметр, заполненный водой, цилиндрической оболочки ( $D$ ) равен 64 mm, толщина ( $\delta$ ) — 5 mm, материал — алюминиевый сплав АМг 5 М, имеющий параметры: модуль Юнга  $E = 7.1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ ,

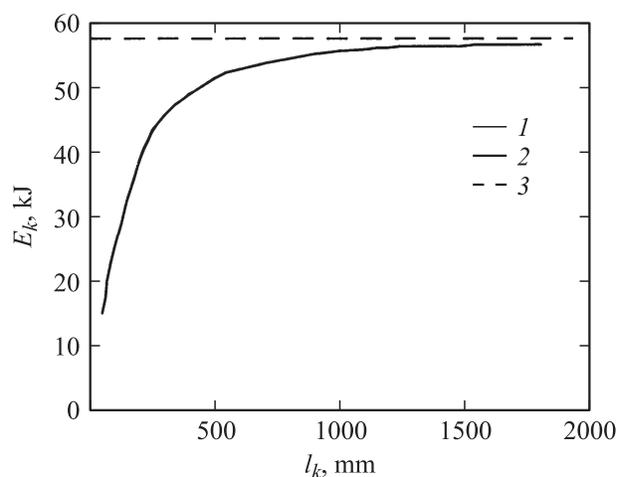


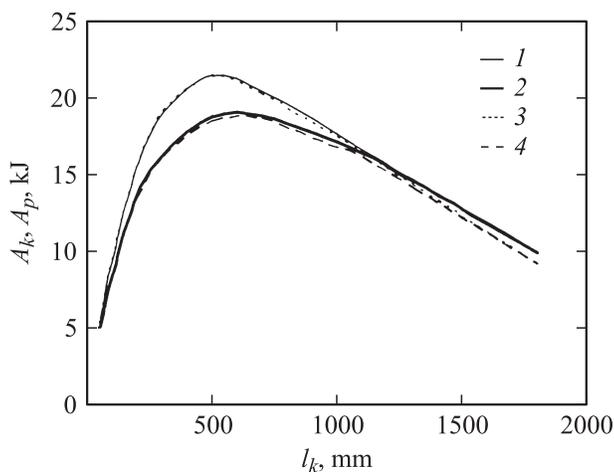
Рис. 4. Зависимость энергии, выделившейся в канале разряда, от его длины: *1* — без учета скоростного упрочнения материала оболочки; *2* — с учетом скоростного упрочнения материала оболочки; *3* — начальный уровень энергии конденсаторной батареи.

плотность  $\rho_M = 2700 \text{ kg/m}^3$ . Использовали модель пластичности Джонсона–Кука (14).

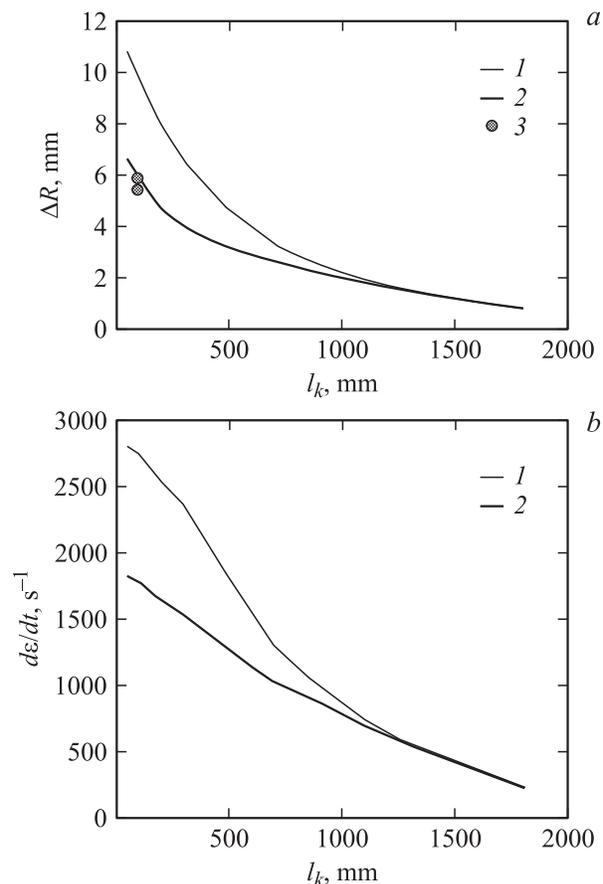
Расстояние между электродами ( $l_k$ ) имеет определяющее влияние на сопротивление канала разряда и, следовательно, на количество энергии конденсаторной батареи ( $E_0$ ), выделившейся в канале разряда ( $E_k$ ). Из рис. 4 следует, что изменение  $l_k$  от 50 до 500 мм приводит к возрастанию  $E_k$  от 25 до 85%  $E_0$ . Увеличение  $l_k$  на значение, большее, чем 100 мм, может привести к существенному выигрышу в использовании энергии конденсаторной батареи, но требует обеспечить электрический пробой слоя жидкости большой толщины между электродами. Решение этой проблемы можно существенно облегчить за счет уменьшения активного сопротивления шин разрядного контура ( $R_{sh}$ ).

Скорость деформации оболочки практически не влияет на величину энергии ( $E_k$ ), выделившейся в канале разряда (линии 1 и 2 на рис. 4 отличаются не более, чем на 3%), но оказывает заметное влияние на работу расширения канала разряда ( $A_k$ ), как видно из результатов расчетов, представленных на рис. 5. Работа расширения канала разряда имеет максимум вблизи  $l_k$ , равного 600 мм, при котором она достигает 30% энергии  $E_0$ , что приблизительно в 3.8 раза больше, чем при  $l_k$ , равном 50 мм. На рис. 5 также приведены результаты расчетов, демонстрирующие необходимость учета скоростного упрочнения материала оболочки, особенно вблизи максимума  $A_k$ . Работа пластической деформации оболочки (на рис. 5 показана штриховыми линиями) мало отличается от работы расширения канала разряда.

Достоверность результатов, представленных на рис. 4 и 5, подтверждается данными физического эксперимента (рис. 6, *a*), выполненного нами по такой же схеме (рис. 1), как и математическое моделирование. Из рис. 6, *a* следует, что результаты расчетов удовле-



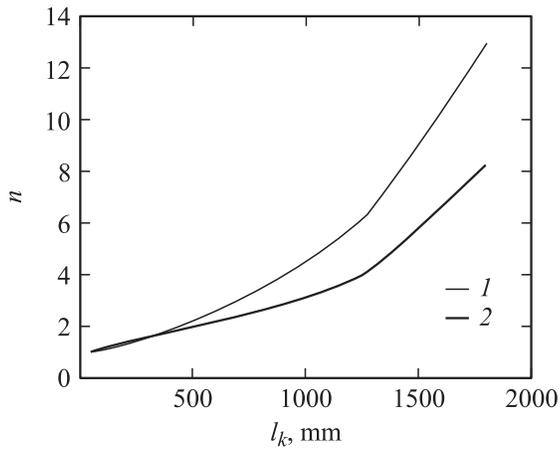
**Рис. 5.** Зависимость работы расширения канала разряда ( $A_k$  — сплошные линии) и пластической деформации оболочки ( $A_p$  — штриховые линии) от длины канала: 1 и 3 — без учета скоростного упрочнения материала оболочки; 2 и 4 — с учетом скоростного упрочнения материала оболочки.



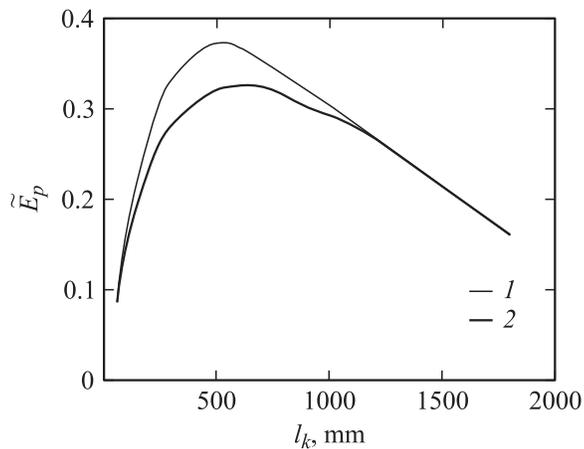
**Рис. 6.** Зависимость изменения радиуса оболочки (*a*) и скорости пластической деформации оболочки (*b*) от длины канала: 1 — без учета скоростного упрочнения материала оболочки; 2 — с учетом скоростного упрочнения материала оболочки; 3 — эксперимент.

творительно согласуются с данными эксперимента, выполненного при длине канала разряда, равной 100 мм, и подтверждают необходимость учета скоростного упрочнения материала. Уменьшение скорости деформации оболочки до  $600 \text{ s}^{-1}$  (рис. 6, *b*) приводит к неразличимости результатов математического моделирования с учетом и без учета скоростного упрочнения материала.

Изменение радиуса оболочки ( $\Delta R$ ) после одного разряда уменьшается при увеличении расстояния между электродами (рис. 6, *a*), но так как работа канала разряда увеличивается, то достаточно повторения нескольких разрядов, чтобы увеличить радиус в такой же степени, как от одного разряда при расстоянии между электродами 50 мм (рис. 7). Из расчета количества повторных разрядов следует, что при увеличении расстояния между электродами от 50 до 500 мм достаточно повторить разряд один раз, чтобы достичь такого же увеличения  $\Delta R$ , как от одного разряда, когда  $l_k$  равно 50 мм. Согласно схеме на рис. 1, объем деформируемого материала оболочки в этом случае увеличивается в 10 раз, а общие затраты энергии конденсаторной батареи — только



**Рис. 7.** Зависимость количества разрядов, обеспечивающих изменение радиуса оболочки, как при  $l_k$ , равном 50 мм, от длины канала: 1 — без учета скоростного упрочнения материала оболочки; 2 — с учетом скоростного упрочнения материала оболочки.



**Рис. 8.** Зависимость общей работы пластической деформации оболочки от нескольких разрядов по отношению к общим затратам энергии конденсаторной батареи ( $\tilde{E}_p = \Sigma A_p / \Sigma E_0$ ), обеспечивающей изменение радиуса оболочки, как при  $l_k$ , равном 50 мм от длины канала: 1 — без учета скоростного упрочнения материала оболочки; 2 — с учетом скоростного упрочнения материала оболочки.

в 2 раза, что подтверждает повышение эффективности использования энергии  $E_0$ . Общая работа пластической деформации оболочки от нескольких разрядов по отношению к общим затратам энергии конденсаторной батареи ( $\tilde{E}_p$ ) имеет максимальное значение 0.33, когда  $l_k$  равно 600 мм, что в 3.7 раза больше, чем при  $l_k$ , равном 50 мм (рис. 8).

## Выводы

Результаты исследования демонстрируют необходимость комплексного анализа баланса энергии в электро-разрядной системе от ее источника до конечного эле-

мента (цилиндрической оболочки) и позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Работа пластической деформации оболочки существенно зависит от расстояния между электродами и имеет единственный максимум. Максимумы работы пластической деформации и работы расширения канала разряда достигаются при одном и том же расстоянии между электродами, которое зависит от параметров разрядного контура. Для рассмотренных параметров разрядного контура оптимальное расстояние между электродами приблизительно равно 600 мм, при котором работа пластической деформации оболочки практически равна работе расширения канала разряда и составляет 30% от энергии конденсаторной батареи.

2. Динамические свойства материала существенно влияют на процесс пластического деформирования цилиндрической оболочки под действием электрического разряда в воде. При рассмотренных параметрах разрядного контура без учета динамического упрочнения сплава АМг5 М максимум работы пластической деформации на 15% больше, чем с учетом динамического упрочнения. Деформация оболочки без учета динамического упрочнения оказывается существенно завышенной, особенно при малых расстояниях между электродами (на 65%, если расстояние между электродами 50 мм).

## Список литературы

- [1] Гулый Г.А. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
- [2] Мериин Б.В. Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий. Л.: Машиностроение, 1985. 237 с.
- [3] Голенков В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.
- [4] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 311 с.
- [5] Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 437 с.
- [6] Шамко В.В., Кучеренко В.В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. (Препр. НАН Украины. Ин-т импульсных процессов и технологий. № 20)
- [7] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1977. 155 с.
- [8] Косенков В.М., Кускова Н.И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 2017–2020.
- [9] Косенков В.М., Каменская Л.А. // Акустичний вісник. 2001. № 2. С. 47–53.
- [10] Иванов В.В., Рыбка О.М., Царенко П.И. и др. // Энергетическое оборудование высоковольтных импульсных установок. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1985. С. 5–23.
- [11] Барбашова Г.А. // Теория, эксперимент, практика электро-разрядных процессов. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1992. С. 43–48.

- [12] Барбашова Г.А., Косенков В.М. // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Межвед. сб. науч. тр. Вып. 3. Николаев, 2000. С. 32–36.
- [13] Барбашова Г.А., Косенков В.М. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 93–97.
- [14] Барбашова Г.А., Жирнов М.В., Косенков В.М. // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Межвед. сб. науч. тр. Вып. 1. Киев: Наукова думка, 1993. С. 38–44.
- [15] Барбашова Г.А., Иванов А.В., Каменская Л.А. // Новое в электрогидроимпульсной обработке. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1986. С. 20–25.
- [16] Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М.: 1976. 326 с.
- [17] Косенков В.М., Каменская Л.А., Старков Н.В. // Акустич. вестн. 2005. Т. 8. № 1–2. С. 64–68.
- [18] Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под общ. ред. М.В. Жерноклетова. Саров: ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, 2005. 428 с.
- [19] Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
- [20] Косенков В.М. // Тр. IX Междунар. конф. „Харитоновские тематические научные чтения“. Саров, 2007. С. 203–205.
- [21] Johnson G.R., Cook W.H. of the 7<sup>th</sup> International Symp. on Ballistic. The Hague, The Netherlands, 1983. 541 p.
- [22] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.