

Использование круглых мембран для определения механического КПД электрического разряда в воде

В. М. Косенков

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

Разработан экспериментальный метод определения механического КПД электрического разряда в воде на основе деформирования круглых мембран волнами давления. Обоснована его достоверность и определена погрешность измерения. Метод апробирован на примерах деформирования мембран ударными волнами в воде, генерируемыми электрическими разрядами.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, механический КПД разряда, мембраны.

УДК 534.12:537.528

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный разряд в воде находит широкое применение в науке и технике на протяжении более 50 лет [1, 2]. Несмотря на большой опыт его использования в различных технологиях, многие характеристики разряда изучены недостаточно. В частности, остаются слабо изученными проблемы повышения эффективности преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в работу деформации и разрушения различных материалов. Исследованию этой проблемы посвящён ряд публикаций (например, [3–5]), однако её решение далеко до завершения. Так, в [6–11] главным образом выполнены теоретические оценки затрат энергии, расходуемой на механическое воздействие на материалы. Сложность исследования заключается в отсутствие достаточно простого и корректного экспериментального метода определения работы деформации материалов. Поэтому разработка экспериментальных методов определения механического КПД электрического разряда в воде имеет большую научную и практическую актуальность.

Наиболее распространённым способом деформирования материалов, в том числе с применением электрического разряда в жидкости, является листовая штамповка. В этом случае материал испытывает двухосное нагружение и на начальных этапах деформируется без контакта с поверхностью матрицы. Свободное деформирование круглой пластины, жёстко закреплённой по контуру, с одной стороны, отражает основные особенности начального этапа деформирования, а с другой – позволяет достаточно просто анализировать деформации и определять работу деформации пластины. Наиболее доступен для измерения максимальный прогиб пластины. Чтобы погрешность его измерения была достаточно малой, величина прогиба должна быть намного больше толщины пластины. Поэтому в качестве

объекта исследования выбраны тонкие круглые пластины, деформирование которых достоверно описывается теорией мембран [12–14].

Цель настоящего исследования – разработать метод экспериментального определения механического КПД электрического разряда в воде, основанный на определении работы деформации круглых мембран.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для осуществления электрического разряда в воде энергию накапливают в конденсаторной батарее и определяют её величину по формуле

$$E = \frac{C \cdot U_0^2}{2}, \quad (1)$$

где C – ёмкость конденсаторной батареи, Ф; U_0 – напряжение заряда батареи, В.

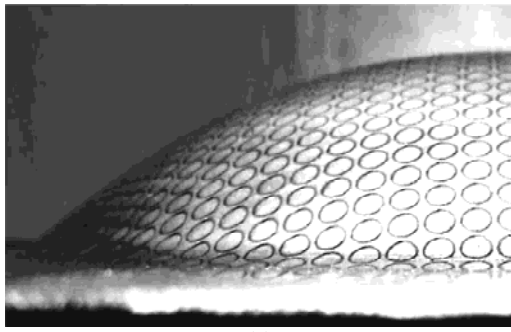
Относительную часть энергии E , используемой для деформирования материалов, можно характеризовать механическим КПД разряда:

$$\eta = \frac{A}{E}, \quad (2)$$

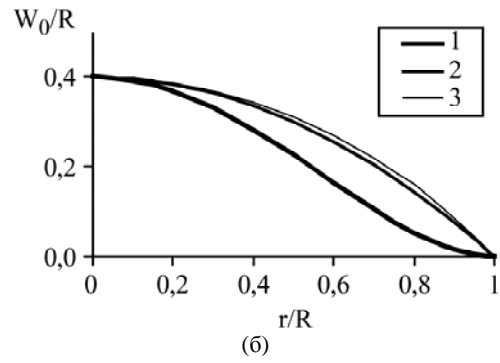
где A – работа деформации материала, Дж.

Результат зависит от суммы работ упругой (A_e) и пластической (A_p) деформации материалов.

Форма мембраны имеет важное значение для вычисления работы её деформации. Для определения прогиба тонкой мембраны использовали основное упрощающее предположение о том, что её форма близка к сферической. Справедливость этой гипотезы подтверждается путём сравнения профиля сферической поверхности с профилями толстой и тонкой мембран (рис. 1), нагруженных равномерно распределённым давлением p . Форма профиля толстой мембраны в зависимости от расстояния до оси симметрии r описывается формулой (3), тонкой – (4) [13], а

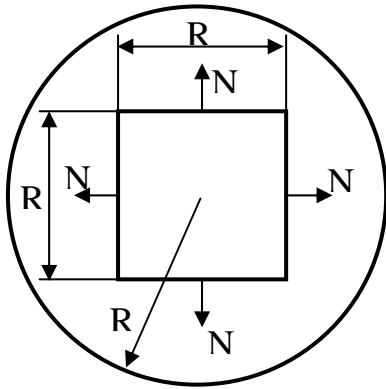


(a)

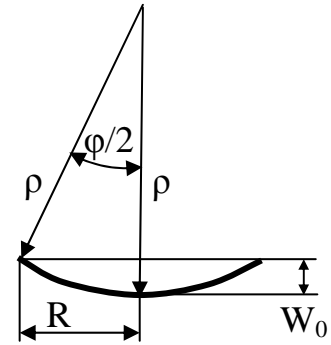
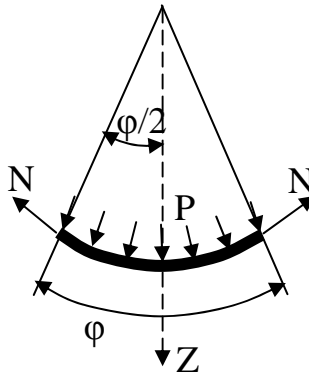


(б)

Рис. 1. Профиль тонкой деформированной мембраны с координатной сеткой на её поверхности для измерения распределения деформаций (а); сравнение профилей толстой (1) и тонкой (2) мембран с профилем сферической оболочки (3) (б).



(a)



(б)

Рис. 2. Расчётные схемы тонкой круговой мембраны.

сегмента сферической поверхности высотой W_0 – (5):

$$W_{th} = W_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2, \quad (3)$$

$$W_f = W_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (4)$$

$$W_{sp} = W_0 - \frac{R^2 + W_0^2}{2W_0} + \sqrt{\left(\frac{R^2 + W_0^2}{2W_0} \right)^2 - r^2}, \quad (5)$$

где W_0 – максимальный прогиб мембраны; R – радиус внешнего контура мембраны; r – расстояние от оси симметрии мембраны до её срединной поверхности.

При выводе приближенных формул предполагали, что мембрана толщиной δ , опёртая по контуру радиусом R (рис. 2), изменяет кривизну и растягивается, образуя сферическую поверхность радиусом кривизны ρ , и что давление p равномерно распределено по её поверхности. Тонкая мембрана характеризуется отношением $\delta/R < 1/10$ и $W_0\delta \gg 1$ [15].

Элементарная работа деформации мембраны dA под действием равномерно распределённого давления на её поверхность определяется произведением проекции на ось z (рис. 2) элементарной силы $p(w_*) r d\theta dr$ на элементарное измене-

ние прогиба мембраны dw_* в точке с координатами r, θ :

$$dA = p(w_*) \cdot r \cdot d\theta dr dw_*, \quad (6)$$

где w_* – величина прогиба мембраны в точке с координатами r, θ (полярная система координат) при равновесном текущем давлении $p(w_*)$, м.

Если давление на мембрану равномерное, тогда его можно определить в зависимости от её максимального прогиба w_{0*} . Прогиб круговой мембраны является функцией от расстояния до оси симметрии $w_*(r)$ и определяется зависимостью (4), которая с учётом введённых переменных принимает вид

$$w_* = w_{0*} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (7)$$

Используя зависимость (7), выражение (6) преобразовали следующим образом:

$$dA = p(w_{0*}) \cdot r \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \cdot d\theta \cdot dr \cdot dw_{0*}. \quad (8)$$

Интегрируя элементарную работу давления (8) по поверхности мембраны и максимальному текущему перемещению w_{0*} последней от 0 до w_0 , определили работу её деформации:

$$A = \int_0^{w_0} \int_0^R \int_0^{2\pi} p(w_{0*}) \cdot r \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \cdot d\theta \cdot dr \cdot dw_{0*}. \quad (9)$$

В результате вычисления внутренних интегралов и тождественных преобразований (9) получили:

$$A = \frac{\pi \cdot R^2}{2} \cdot \int_0^{w_0} p(w_{0*}) \cdot dw_{0*}. \quad (10)$$

Экспериментально определить работу деформации можно по измерению максимального прогиба мембраны, полученного под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде. Для этого необходимо выяснить связь между максимальным прогибом мембраны и давлением на её поверхность $p(w_{0*})$.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Зависимость $p(w_{0*})$ можно найти в результате квазистатического деформирования мембраны равномерно распределённым давлением на её поверхность. Затем полученные результаты аппроксимировать аналитической зависимостью и, используя её, вычислить работу деформации мембраны по формуле (10). Однако при изменении размеров мембраны зависимость $p(w_{0*})$ необходимо определять снова. Чтобы получить более универсальную зависимость $p(w_{0*})$, необходимо рассмотреть напряжённое и деформированное состояние круговой мембраны под действием равномерного давления на её поверхность.

Учитывая, что деформации сферической мембраны одинаковы в любой точке, на её поверхности выделили элемент конечных размеров двумя парами взаимно перпендикулярных сечений со стороной, равной R (рис. 2а). Равновесие элемента обуславливается равенством сил N и сил реакции материала, определяемых нормальным напряжением σ на контуре элемента, и площадью его поперечного сечения (рис. 2а):

$$N = R \cdot \delta \cdot \sigma. \quad (11)$$

Согласно условию равновесия сумма проекций действующих сил и сил реакции материала по контуру элемента на нормаль z к его поверхности равна:

$$-4N \sin \frac{\varphi}{2} + p \cdot R^2 = 0. \quad (12)$$

Синус половины центрального угла φ выразили через длину дуги кромки элемента и радиус его кривизны ρ (рис. 2б):

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{R}{\rho}. \quad (13)$$

Из уравнения сферического сегмента, определяющего зависимость ρ от w_0 и R (рис. 2б):

$$R^2 + (\rho - w_0)^2 = \rho^2, \quad (14)$$

получили радиус кривизны сферического сегмента:

$$\rho = \frac{R^2 + w_0^2}{2 \cdot w_0}. \quad (15)$$

При больших прогибах мембраны необходимо учитывать изменение её толщины δ по сравнению с начальной δ_0 . Для этого можно использовать гипотезу о несжимаемости материала мембраны, имеющую большую достоверность [13]. До деформации круглая мембрана была плоской, тогда её объём

$$V_0 = \pi \cdot R^2 \cdot \delta_0. \quad (16)$$

После деформации мембрана принимает форму сферического сегмента, объём которого:

$$V = \pi (R^2 + w_0^2) \cdot \delta. \quad (17)$$

Объём мембраны не изменяется, тогда $V = V_0$. Из этого условия следует

$$\delta = \frac{R^2 \cdot \delta_0}{R^2 + w_0^2}. \quad (18)$$

В результате преобразования уравнений (11)–(13) получили формулу для определения давления, в которой учтено уменьшение начальной толщины мембраны δ_0 и радиуса её кривизны ρ по формулам (15) и (18):

$$p = \frac{4 \cdot w_0 \cdot R^2 \cdot \delta_0 \cdot \sigma}{(R^2 + w_0^2)^2}. \quad (19)$$

Зависимость (19) преобразовали, используя относительный максимальный прогиб мембраны $w = w_0/R$ и её относительную толщину $\delta_0^* = \delta_0/R$:

$$p = \frac{4 \cdot w \cdot \delta_0^*}{(1 + w^2)^2} \cdot \sigma. \quad (20)$$

Средние напряжения в мембране σ при максимальном прогибе w_0 можно найти по формуле (20):

$$\sigma = \frac{(1 + w^2)^2}{4 \cdot w \cdot \delta_0^*} \cdot p, \quad (21)$$

если экспериментально определить функцию $p = p(w_0)$.

Напряжения, вычисляемые по формуле (21), ограничены напряжениями пластического течения материала мембраны σ^* . По аналогии с диаграммой одноосного растяжения средние напряжения мембраны аппроксимировали степенной зависимостью, в которой учтена эквивалентная деформация ε^* :

$$\sigma^* = a \cdot (\varepsilon^*)^b + \sigma_0, \quad (22)$$

где a , b и σ_0 – эмпирические параметры, определяемые из условий наилучшей аппроксимации зависимости (21) формулой (22).

Средние по объёму мембраны деформации, эквивалентные одноосному растяжению материала ε^* , зависят от нормальных компонент тензора деформаций [16, 17]:

$$\varepsilon^* = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2)}, \quad (23)$$

где ε_r – радиальная деформация; ε_θ – окружная деформация; ε_z – деформация по толщине мембраны.

У мембраны со сферической поверхностью радиальные и окружные деформации равны и с учётом изменения длины дуги окружности (рис. 2б) определяются по формуле:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{\rho}{R} \cdot \arcsin \frac{R}{\rho} - 1. \quad (24)$$

Из условия несжимаемости материала мембраны [13] в процессе пластического течения следует, что

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0, \quad (25)$$

тогда, с учетом (24) и (25) из (23), запишем:

$$\varepsilon^* = 2 \cdot \varepsilon_r. \quad (26)$$

В отличие от мембраны со сферической поверхностью, деформации которой во всех точках одинаковы, реальные мембраны жёстко зашпелены по круговому периметру. Согласно полученным нами экспериментальным данным радиальные и окружные деформации мембраны близки друг к другу по величине и распределены по параболическому закону в радиальном направлении (рис. 3). На рис. 3 n обозначены номера ячеек координатной сетки на поверхности мембраны (рис. 1а). Точки 1 и 11 на рисунке удалены приблизительно на расстояние R от оси мембраны. Максимальные деформации появляются в центре мембраны, а на внешнем контуре они существенно меньше. Средние деформации отличаются от максимальных в C_ε раз (приблизительно в пределах от 0,5 до 0,7 раза). Тогда условие (25) принимает вид

$$C_\varepsilon \cdot \varepsilon_r + C_\varepsilon \cdot \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0, \quad (27)$$

из которого средние эквивалентные деформации (23) определили по формуле

$$\varepsilon^* = 2 \cdot C_\varepsilon \cdot \varepsilon_r. \quad (28)$$

С учётом (24) и (15) средние эквивалентные деформации мембраны (28) представили в зависимости от её максимального относительного прогиба:

$$\varepsilon^* = 2 \cdot C_\varepsilon \cdot \left(\frac{1+w^2}{2 \cdot w} \cdot \arcsin \frac{2 \cdot w}{1+w^2} - 1 \right). \quad (29)$$

Подставив (29) в (22), получили:

$$\sigma^* = a \cdot \left[2 \cdot C_\varepsilon \cdot \left(\frac{1+w^2}{2 \cdot w} \cdot \arcsin \frac{2 \cdot w}{1+w^2} - 1 \right) \right]^b + \sigma_0. \quad (30)$$

Воспользовавшись (30) в (19), записали формулу для определения равновесного давления на оболочку в зависимости от её относительного максимального прогиба и относительной толщины:

$$p = \frac{4 \cdot w \cdot \delta_0^*}{(1+w^2)^2}. \quad (31)$$

$$\left\{ a \cdot \left[2 \cdot C_\varepsilon \cdot \left(\frac{1+w^2}{2 \cdot w} \cdot \arcsin \frac{2 \cdot w}{1+w^2} - 1 \right) \right]^b + \sigma_0 \right\}.$$

Аппроксимировали функцию (29), представленную в зависимости от относительного прогиба мембраны, степенной функцией:

$$\varepsilon_a^* = C_\varepsilon \cdot 1,2352 \cdot w^{1,9854}, \quad (32)$$

которая отличается от (29) не более чем на $\pm 5\%$ в интервале изменения w от 0 до 0,85. С учётом (32) и (22) преобразовали (31):

$$p(w) = \frac{4 \cdot w \cdot \delta_0^*}{(1+w^2)^2} \left[a \cdot (C_\varepsilon \cdot 1,2352 \cdot w^{1,9854})^b + \sigma_0 \right]. \quad (33)$$

После тождественных преобразований формула (33) приобрела вид

$$p(w) = 4 \cdot a \cdot C_\varepsilon^b \cdot 1,2352^b \cdot \delta_0^* \frac{w^{1,854 \cdot b + 1}}{(1+w^2)^2} + 4 \cdot \delta_0^* \cdot \sigma_0 \frac{w}{(1+w^2)^2}. \quad (34)$$

Используя безразмерный максимальный прогиб, (10) преобразовали формулу:

$$A = \frac{\pi \cdot R^3}{2} \cdot \int_0^w p(w) \cdot dw, \quad (35)$$

которая с учётом (34) была записана в развёрнутой форме:

$$A = \frac{\pi \cdot R^3}{2} \cdot \int_0^w \left[4 \cdot a \cdot C_\varepsilon^b \cdot 1,2352^b \cdot \delta_0^* \frac{w^{1,854 \cdot b + 1}}{(1+w^2)^2} + 4 \cdot \delta_0^* \cdot \sigma_0 \frac{w}{(1+w^2)^2} \right] \cdot dw. \quad (36)$$

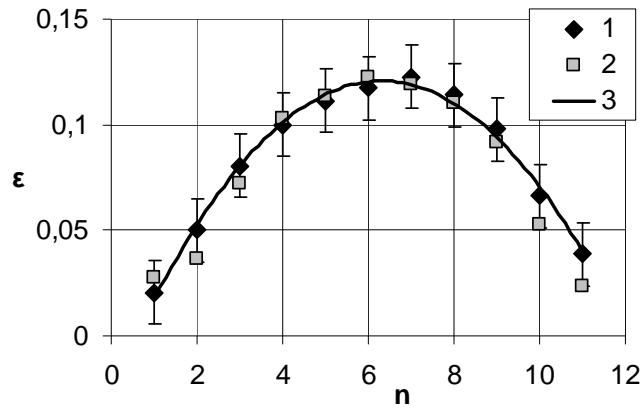


Рис. 3. Распределение радиальных (1) и окружных деформаций (2) сплава DP780 и аппроксимирующая их линия квадратной параболы (3).

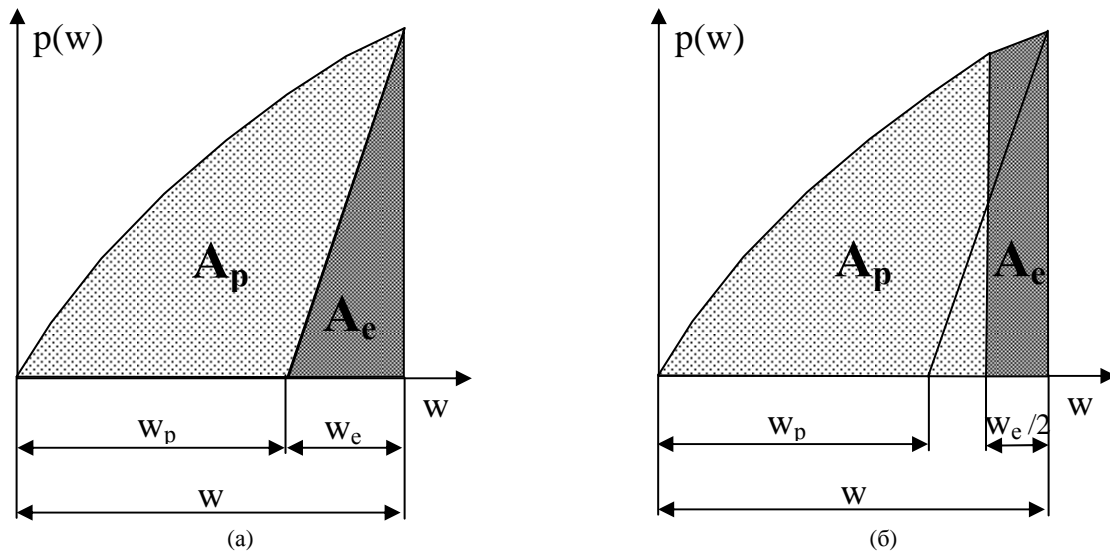


Рис. 4. Схемы фактической (а) и эквивалентной (б) диаграмм деформирования мембраны.

Выражение (36) представили в виде суммы двух интегралов, второй из которых вычислили точно, а первый – приближённо, по методу трапеций, при разных значениях коэффициента b , изменяющихся в интервале от 0 до 1, и аппроксимировали дробно-иррациональной функцией. Интервал изменения $0 \leq b \leq 1$ выбрали, исходя из постулата Друкера, определяющего условия возможности осуществления ассоциированного пластического течения однородного поликристаллического материала и диаграмм деформирования металлов [18]. В итоге получили выражение для вычисления работы деформации мембраны:

$$A = \pi \cdot \delta_0^* \cdot R^3 \cdot \left(2^b \cdot C_\varepsilon^b \cdot a \frac{w^{3-b+2}}{(1+w^2)^{2,2-b+1,15}} + \sigma_0 \frac{w^2}{1+w^2} \right). \quad (37)$$

Результат, вычисленный по формуле (31) с использованием метода трапеций, мало отличается от её значений, полученных по приближённой формуле (37). В интервале изменения относительного прогиба w от 0,02 до 0,1 погрешность

вычисления по формуле (37) находится в пределах от -8 до 0%, а в интервале от 0,1 до 1 – в пределах от -4 до +1%. Такую погрешность формулы (37) можно считать приемлемой, так как погрешность экспериментального определения максимального прогиба мембраны как минимум лежит в пределах $\pm 5\%$.

Работа, вычисленная по формуле (37), учитывает пластическую и упругую составляющие полного прогиба мембраны w . В процессе экспериментальных исследований можно достаточно просто определить пластическую составляющую максимального прогиба w_p . Упругий прогиб w_e можно оценить в результате статического деформирования мембраны в процессе определения зависимости $p = p(w)$. Тогда полный максимальный прогиб w будет равен сумме w_p и w_e . Работу пластической деформации мембраны можно найти по формуле (37), если вместо w подставить $(w-w_e/2)$. Это можно обосновать, исходя из геометрического смысла интеграла, входящего в формулу (35), и практически линейной зависимости давления на мембрану от её прогиба при упругой разгрузке (рис. 4). На рис. 4а пока-

зана фактическая диаграмма деформирования мембраны, а на рис. 4б – эквивалентная ей диаграмма по работе пластической (A_p) и упругой (A_e) деформации.

После подстановки (1) и (37) в (2) получили выражение для определения механического КПД деформирования мембраны под действием ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде:

$$\eta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta_0^* \cdot R^3}{C \cdot U_0^2} \cdot \left(2^b \cdot C_\varepsilon^b \cdot a \frac{w^{3 \cdot b + 2}}{(1 + w^2)^{2 \cdot 2 \cdot b + 1,15}} + \sigma_0 \frac{w^2}{1 + w^2} \right). \quad (38)$$

Предложенный метод определения A и η не учитывает скоростного упрочнения материала мембраны, при котором напряжения в ней и соответственно давление на её поверхность больше статических (рис. 4). Тогда при том же прогибе мембраны работа её статической деформации A_b будет меньше работы динамической деформации A_d . Степень их отличия зависит от склонности материала к скоростному упрочнению и скорости деформации. При скорости деформации меньше 300 с^{-1} напряжения в сплавах металлов мало отличаются от статических (обычно не более 3%) [19–23]. В такой же степени A меньше A_b . Скорость деформации оболочек под действием ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, существенно изменяется [24, 25]. Максимальная скорость их деформации имеет порядок 10^3 с^{-1} [25]. В начале и конце деформирования пластин скорость деформации близка к нулю, поэтому средняя скорость деформации может быть меньше максимальной в 2 или 3 раза. При такой скорости деформации мембраны среднее отличие динамических напряжений от статических может составлять от 5 до 20% в зависимости от динамических свойств материала. В такой же степени работа статической деформации будет меньше динамической. Поэтому можно считать, что предложенный метод даёт заниженную величину работы деформации мембраны и механического КПД разряда – в интервале от 5 до 20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зависимости $p = p(w_0)$ различных листовых сплавов (5754, 6111, АМг5, ВН240, IF, HSLA350, DP780), используемых в качестве мембран, определяли в процессе их статического деформирования в специальной оснастке (рис. 5) с помощью гидравлического пресса. Мембрана I жёстко закреплена в корпусе оснастки, что исключало её скольжение. Поэтому прогиб мембраны формировался только за счёт её деформи-

рования. Чтобы обеспечить равномерное давление на поверхность мембраны I , нагрузку F от плунжера 2 пресса передавали на её поверхность через слой увлажнённых резиновых прокладок 3 общей толщиной h , которая не менее R . Чтобы создать большое давление на мембрану, резиновые прокладки помещали в замкнутую цилиндрическую полость оснастки 4 над мембраной. Определено, что при давлениях более 1 МПа жёсткость резины практически не оказывает влияния на равномерность распределения давления на поверхность деформируемых мембран.

Скругление угла оснастки 5 радиусом R_a (рис. 5), на котором происходит изгиб мембраны, предотвращает её срез по контуру закрепления, но требует учёта изменения радиуса контура мембраны R в процессе огибания ею скруглённого угла 5 при обработке результатов измерения пластического прогиба w_p . Для учёта влияния R_a на величину пластического прогиба w_p из измеренного остаточного прогиба w_i вычитали смещение контура опирания w_a мембраны в направлении её прогиба. Смещение w_a вычисляли по формуле, полученной в результате анализа изгиба мембраны в месте её контакта с углом 5:

$$w_a = R_a \cdot \left[1 - \exp\left(-2,5 \frac{w_i}{R}\right) \right]. \quad (39)$$

Величину упругого прогиба мембраны w_e определяли экспериментально, измеряя её прогиб под действием давления и без давления. Учитывая w_a и w_e , максимальный прогиб мембраны под действием давления вычисляли по формуле

$$w_0 = w_i - w_a + w_e. \quad (40)$$

В формулы (37) и (38) входят параметры a , b и σ_0 , которые необходимо вычислить из условия наилучшего согласования результатов расчёта с экспериментальными данными. Определение параметров существенно облегчается, если выполнять сравнение не только зависимостей $p = p(w_0)$, но и $\sigma = \sigma(w_0)$, используя метод наименьших квадратов или осуществляя подбор величин a , b и σ_0 . Например, для мембраны радиусом 50,5 мм из алюминиевого сплава 5754 толщиной 1,45 мм наилучшее согласование экспериментальных данных с расчётными получено, когда $a = 250 \text{ МПа}$; $b = 0,293$; $\sigma_0 = 70 \text{ МПа}$ (рис. 6). Средние напряжения материала мембраны зависят только от её относительного прогиба, который определяет её деформацию (29). Процесс подбора параметров существенно упрощается, если известна аппроксимация диаграммы одноосного нагружения сплава по формуле (22). В частности, полученная нами диаграмма деформирования сплава 5754 аппроксимирована зависимостью

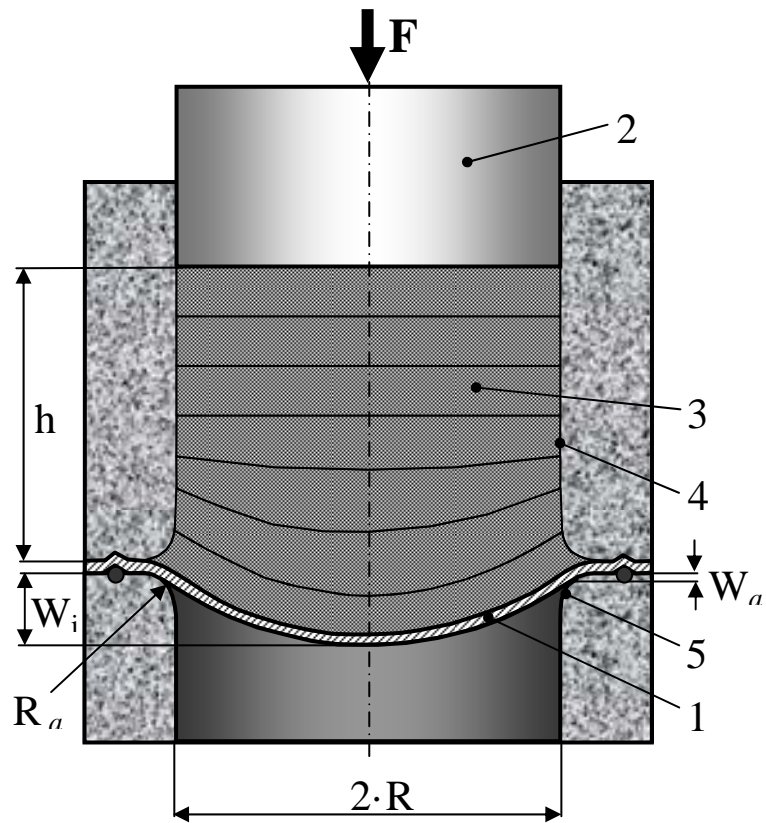


Рис. 5. Схема статического деформирования мембраны.

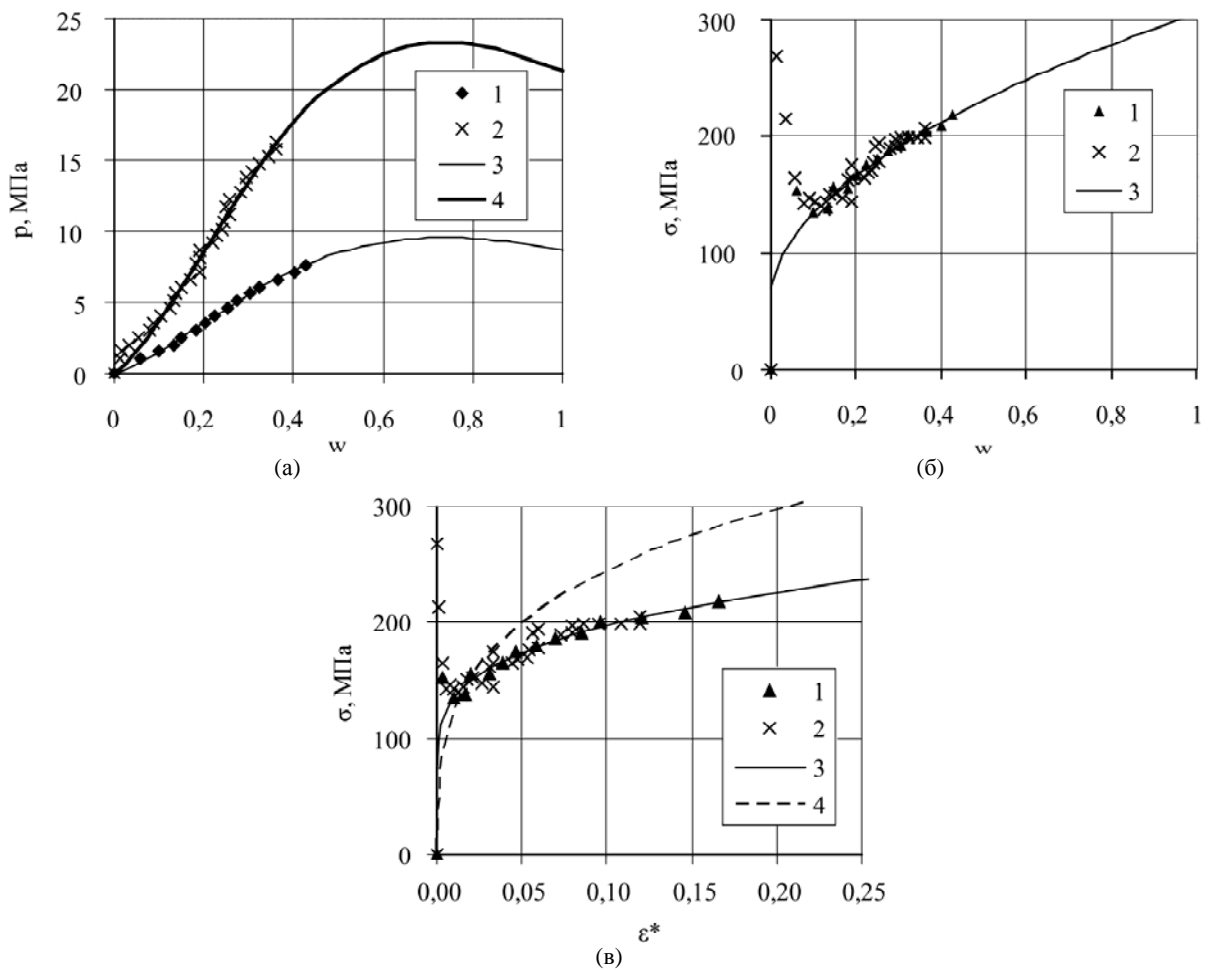


Рис. 6. Сравнение результатов статического деформирования мембраны из сплава 5754 с расчётом. Линии на рисунках соответствуют R , мм (а): 1 – 50,5 (эксперимент); 2 – 20,75 (эксперимент); 3 – 50,5 (расчёт); 4 – 20,75 (расчёт); (б): 1 – 50,5 (эксперимент); 2 – 20,75 (эксперимент); 3 – (расчёт); (в): 1 – 50,5 (эксперимент); 2 – 20,75 (эксперимент); 3 – (расчёт); 4 – аппроксимация диаграммы статического одноосного нагружения сплава 5754.

Таблица 1. Параметры аппроксимации давления и среднего напряжения в мембранах из различных сплавов

Марка сплава	a , МПа	b	σ_0 , МПа	Погрешность аппроксимации, %	
				минимум	максимум
5754	250	0,293	70	-5	+4
6111	305	0,244	100	-2	+5
АМг5	365	0,297	80	-6	+3
ВН240	440	0,212	150	-2	+3
IF	430	0,213	110	-2	+4
HSLA350	488	0,18	110	-4	+2
DP780	372	0,17	470	-1	+6

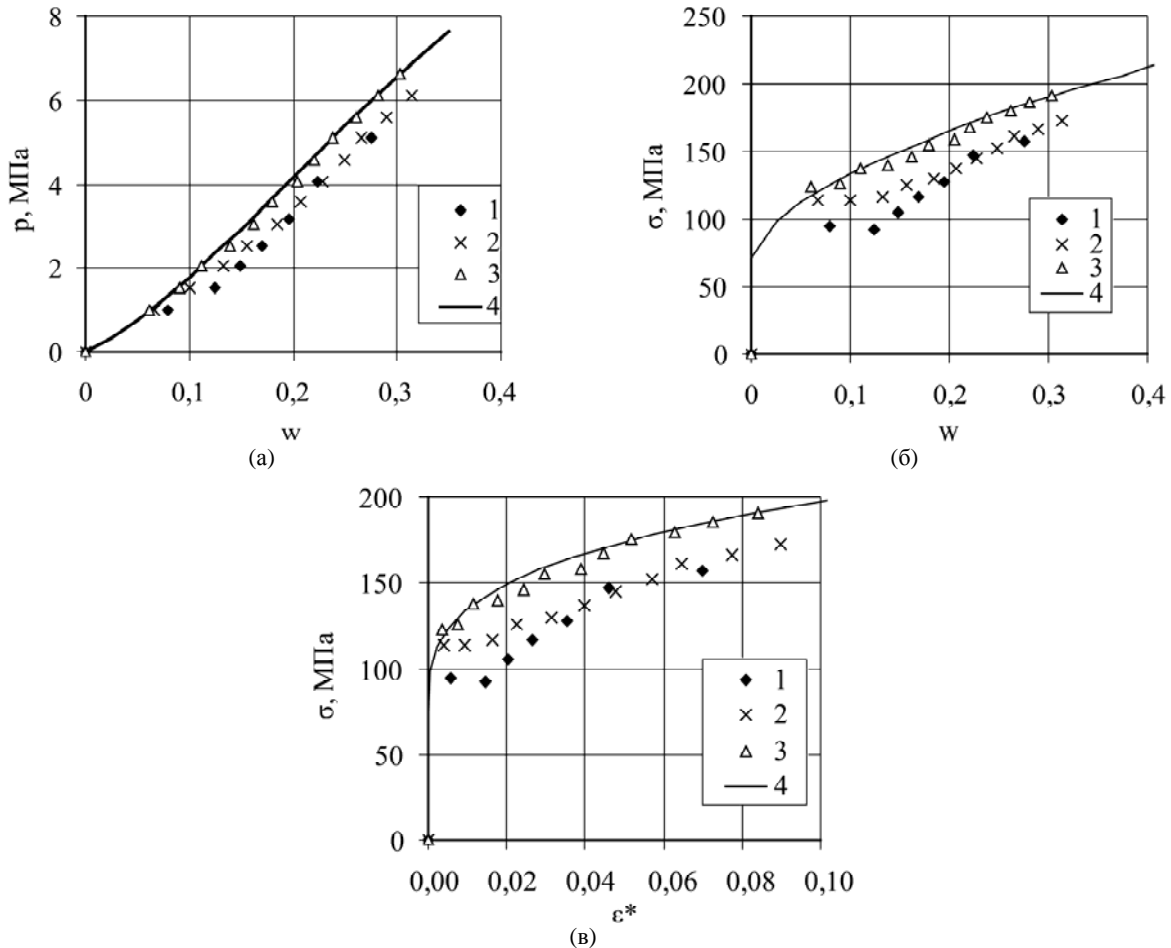


Рис. 7. Влияние радиуса скругления R_a на статическое деформирование мембраны ($R = 42,5$ мм) из сплава 5754 (1 – $R_a \approx 0$; 2 – $R_a = 0,5$ мм; 3 – $R_a = 2,5$ мм; 4 – расчёт).

$$\sigma^* = 479 \cdot 10^6 \cdot (\epsilon^*)^{0,293}, \quad (41)$$

погрешность аппроксимации которой в пределах пластической деформации составляет $\pm 6\%$. Тогда значение параметра b можно взять из (41), потому что его величина не зависит от деформации материала. Зависимости, аналогичные (41), получены нами для сплавов 6111 и АМг5. Показатели степени их аппроксимаций использованы в качестве параметра b в формулах (37) и (38), что облегчило определение величин a и σ_0 . Величины a , b и σ_0 для мембран из исследованных сплавов приведены в табл. 1. Сравнение экспериментальных и расчётных данных после определения a , b и σ_0 позволило оценить погрешность вычисления по формулам (30) и (31) в области

пластических деформаций, которые указаны в таблице 1.

Величины a , b и σ_0 , определённые для мембраны заданного радиуса R , можно использовать для мембран из этого же материала других радиусов контура (рис. 6). Как следует из данного рисунка, изменение R от 21 до 51 мм не приводит к изменению соотношений между расчётными и экспериментальными данными.

Относительно малые радиусы скругления R_a (см. рис. 5) вносят существенную погрешность в определение параметров a , b и σ_0 (рис. 7), так как в этом случае мембрана испытывает на контуре её закрепления существенный пластический сдвиг и разрушение срезом. Как видно из рис. 7, согласование экспериментальных и расчётных

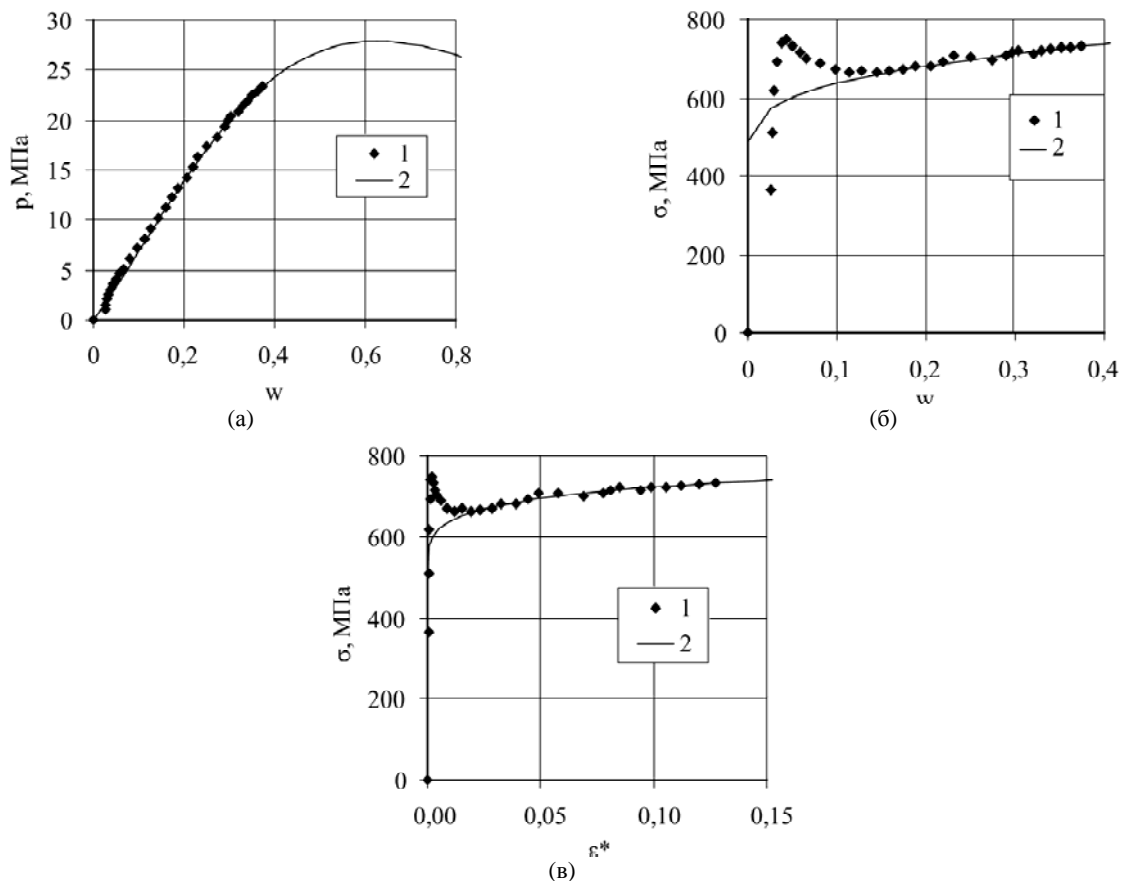


Рис. 8. Сравнение результатов статического деформирования мембраны из сплава DP780 (1) с расчётом (2).

Таблица 2. Работа и механический КПД разряда

E , кДж	C , мкФ	U_0 , кВ	l_{ch} , мм	W_0 , мм	W_e , мм	A , Дж	A_p , Дж	η , %	η_p , %	P , МПа
18,2	18	45	20,5	12,5	2	429	357	2,36	1,96	17,0
30,625	50	35	20,5	17,2	2	827	740	2,7	2,4	22,2

данных достигается только при увеличении радиуса R_a до 2,5 мм, что приблизительно в 2 раза больше толщины мембраны.

Вблизи упругого участка прогиба мембраны (хорошо диагностируемого для сплава DP780) давление и средние напряжения в соответствии с данными работы [13] существенно отличаются от расчётных значений (рис. 8). Это обстоятельство не снижает достоинства разработанного метода, потому что область измерений пластического прогиба мембраны лежит за пределами её упругости.

Для проверки возможности применения разработанного метода выполнили нагружение пластин из сплава DP780 ($R = 50,5$ мм; $\delta_0 = 1,4$ мм) ударными волнами, генерируемыми электрическим разрядом в воде, и определили их максимальный остаточный прогиб W_p . С учётом упругого прогиба W_e получили полный прогиб W_0 . Ось канала разряда располагалась параллельно плоскости пластины на расстоянии 180 мм от неё. Эксперимент выполнен для двух значений энергии, запасаемой в конденсаторной батарее. Результаты измерений и обработки данных по разработанному методу приведены в табл. 2.

Расстояние между электродами l_{ch} не изменяли. Отмечен низкий уровень как полного механического КПД η , так и КПД пластической деформации η_p мембраны. По формуле (34) с учётом данных о материале мембраны из табл. 1 определили величину среднего давления P на поверхность мембраны при максимальном её прогибе W_0 .

ВЫВОДЫ

В результате выполненного исследования разработан и экспериментально обоснован метод определения работы деформации мембран волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, и механического КПД разряда. Полученные данные позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Предлагаемый метод даёт заниженные значения работы деформации и КПД пластического деформирования мембран под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде, в интервале от 5 до 20%, так как в нём не учитывается скоростное упрочнение материала.

2. В процессе определения параметров аппроксимации среднего напряжения можно полу-

чить значение показателя степени в диаграмме одноосного деформирования материала мембраны, если он упрочняется по степенному закону.

3. Кроме работы деформации и механического КПД, предлагаемый метод позволяет получить нижнюю оценку среднего давления на поверхность мембраны при её максимальном прогибе, меньшую, чем давление жидкости, генерируемое электрическим разрядом, в пределах от 5 до 20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 206 с.
2. Ищенко Ж.Н., Поздеев В.А. *Деформирование и запрессовка труб электровзрывом*. Николаев: Атолл, 2003. 212 с.
3. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 258 с.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1977. 155 с.
5. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
6. Курец В.И., Соловьёв М.А., Жучков А.И., Барская А.В. *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 272 с.
7. Азизов Э. А., Емельянов А. И., Ягнов В. А. Методы обеззараживания воды электрическими разрядами. *Журнал прикладной физики*. 2003,(2), 26–30.
8. Поздов И.Н., Поздов К.И. Разработка способов повышения глубины вытяжки штампуемых деталей. *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ*. 2005, (8), 286–291.
9. Мамутов В.С., Поздов К.И. Расчет статико-электрогидроимпульсной вытяжки металлов. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением*. 2006, (4), 182–187.
10. Дубовенко К.В. Учёт взаимодействия плазмы канала подводного электрического разряда с ударной волной, отражённой от стенки камеры. *ЭОМ*. 2013. **49**(1), 30–38.
11. Kosenkov V.M., Rizun A.R. Characterization of the Pulse Destruction of Black Coal Using the Kolsky Method. ISSN 1068_3755. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011. **47**(2), 189–195.
12. Новожилов В.В. *Теория тонких оболочек*. Л.: Судостроение, 1962. 432 с.
13. Работнов Ю.Н. *Сопротивление материалов*. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
14. Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик сферических пленок и мембран со сложной структурой. *МТТ*. 2011. (3), 58–66.
15. Григолюк Э.И., Селезов И.Т. *Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек*. Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемых твердых тел. М.: ВИНТИ, 1973. Т. 5. 273 с.
16. Shen H., Lissenden C.J. 3D Finite Element Analysis of Particle-reinforced Aluminum. *Mater Sci Eng*. 2002, **A338**, 271–281.
17. Meyers M.A. *Dynamic Behavior of Materials*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1994. 382–447.
18. Качанов Л.М. *Основы теории пластичности*. М.: Наука, 1969. 420 с.
19. *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках*. Под общ. ред. М.В. Жерноклетова. Саров: ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ", 2005. 428 с.
20. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. *Исследование прочности материалов при динамических нагрузках*. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
21. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов. Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций: Всесоюз. межвуз. сб. Нижегород. ун-т, 1995. 127–136.
22. Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В., Петровцев А.В. Высокоскоростная деформация арможелеза. Тр. 6-й Междунар. конф. Забабахинские науч. чтения. 2001. Снежинск. 112–120.
23. Косенков В.М., Бычков В.М. Метод определения реологических и энергетических характеристик ударного сжатия металлов. *ПМТФ*. 2012. **53**(6). 134–143.
24. Косенков В.М. Резонансные колебания цилиндрической стенки разрядной камеры в результате электрического разряда в воде. *ПМТФ*. 2011. (4). 43–51.
25. Косенков В.М. Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки. *ЖТФ*. 2011. **81**(10). 133–139.

Поступила 08.04.13

Summary

An experimental method has been developed so as to determine mechanical efficiency of an electrical discharge in water through deforming round membrane by pressure waves. The credibility of this method is substantiated and the measurement error is determined. The method is has been tested by analyzing membrane deformation by shockwaves generated by an electrical discharge in water.

Keywords: electrical discharge in water, mechanical efficiency of discharge, membranes.