

**А.Д.БЛАЩЕНКО**, науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
**Н.П.ГОЛОВИНА**, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДПРОБОВНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ**

Розроблено підхід щодо визначення параметрів електродної системи імпульсного електророзрядного джерела енергії, що реалізує високовольтний пробій рідини. Представлені алгоритм та рівняння дозволяють з урахуванням механічної стійкості електроду та його ерозії у результаті електричного розряду визначати радіус та довжину оголеної частини електроду, а також довжину міжелектродного проміжку за умови забезпечення мінімально можливих передпробовних втрат енергії.

The approach for determining the electrode system parameters of pulse electrical discharge energy source with high-voltage breakdown of water is developed. The presented algorithm and equations allow considering the electrode mechanical stability and its erosion as a result of electrical discharge to determine radius and length of the exposed electrode part, as well as length of the electrode gap providing the minimum of breakdown energy losses.

Разработан подход к определению параметров электродной системы импульсного электроразрядного источника энергии, реализующего высоковольтный пробой воды. Представленные алгоритм и уравнения позволяют с учетом механической стойкости электрода и его эрозии в результате электрического разряда определять радиус и длину оголенной части электрода, а также длину межэлектродного промежутка при условии обеспечения минимально возможных предпробовных потерь энергии.

**Введение.** В работе [1] был представлен подход к оптимизации разрядно-импульсных технологий (РИТ) на базе высоковольтного пробоя воды. Суть подхода заключается в нахождении параметров импульсного электроразрядного источника энергии (ИЭРИЭ), которые могли бы обеспечить необходимое силовое воздействие на объект обработки, требуемое для реализации выбранной РИТ. Посредством решения цепочки обратных задач по известной временной зависимости давления в точке рабочей среды  $P(t)$  при заданных величинах геометрии электродной системы (радиуса электрода –  $r_e$  и длины его оголенной части –  $l_e$ ), электропроводности рабочей среды (воды)  $\sigma_v$  и относительных предпробовных потерь энергии определяются параметры ИЭРИЭ (индуктивность –  $L$ , емкость конденсаторной батареи –  $C$ , зарядное напряжение –  $U_z$ , длина межэлектродного промежутка –  $l$ ).

Однако вышеупомянутый подход не затрагивает вопрос расчета параметров электродной системы ( $r_e$ ,  $l_e$ ). Но поскольку от параметров электродной системы зависят предпробовные потери энергии, минимизация которых является критерием, на который следует опираться при проведении оптимизации РИТ, выбор величин  $r_e$  и  $l_e$  должен быть научно обоснован.

С одной стороны, уменьшение радиуса электрода  $r_e$  и длины его оголенной части  $l_e$  приводят к уменьшению неизолированной поверхности электрода  $S_e$ , контактирующей с жидкостью, и способствует уменьшению производительных предпробивных потерь энергии  $W_{п}$  [2, 3]. С другой стороны, с уменьшением  $S_e$  увеличивается износ электрода вследствие электрической эрозии металла, а также снижается его механическая стойкость. Кроме того, уменьшение  $l_e$  приводит к увеличению скользящих разрядов по поверхности изоляции электрода, что ведет к ее разрушению. Таким образом, очевидно, что для обеспечения минимальной величины  $W_{п}$ , при достаточной механической стойкости и высокой долговечности, электродная система должна отвечать противоречивым требованиям.

Поэтому **цель** данной работы: с учетом требуемой механической стойкости электрода и допустимой электрической эрозии определить оптимальные значения радиуса  $r_e$  и оголенной части электрода  $l_e$ , обеспечивающие минимально возможные предпробивные потери энергии  $W_{п}$ .

**Основная часть.** Для достижения поставленной цели рассмотрено выражение для определения предпробивных потерь энергии с учетом параметров электродной системы [2]

$$W_{п} = \frac{2\sqrt{\pi \cdot S_e \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_v \cdot U_z^2 \cdot (1 + 40l)}}{(U_z - U_0)^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$  – постоянная,  $V^2 \cdot c/m$ ;  $\sigma_v$  – удельная электропроводность воды,  $См/м$ ;  $S_e = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot l_e$  – площадь оголенной поверхности электрода,  $m^2$ ;  $U_0 = 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln(4 \cdot l/r_e)$  – минимальное пороговое напряжение пробоя,  $V$ .

В работе [4] показано, что при определении параметров ИЭРИЭ по известному давлению в точке рабочей среды  $P(t)$  с использованием подхода на базе решения обратных задач [1], зарядное напряжение  $U_z$  может быть представлено в виде функции длины межэлектродного промежутка  $U_z(l)$ . Таким образом, при известной зависимости  $U_z(l)$  и значениях  $r_e$ ,  $l_e$ ,  $\sigma_v$  предпробивные потери энергии  $W_{п}$ , определяемые выражением (1), можно представить в виде функции длины межэлектродного промежутка  $W_{п}(l)$ .

Для проведения дальнейших рассуждений воспользуемся данными расчета, представленными в работе [3], где по давлению  $P(t)$  была найдена функциональная зависимость  $U_z(l)$ . Проводимость воды  $\sigma_v$ , определяемую местом эксплуатации создаваемого технологического устройства, принимаем равной  $\sigma_v = 0,055$   $См/м$  (характерное значение для Николаевского региона). При указанных условиях для фиксированного значения длины оголенной части электрода  $l_e = 0,02$  м, изменяя его радиус  $r_e$  в диапазоне от 2 до 6 мм, построена серия функциональных зависимостей  $W_{п}(l)$ , которые имеют минимумы (рис. 1).

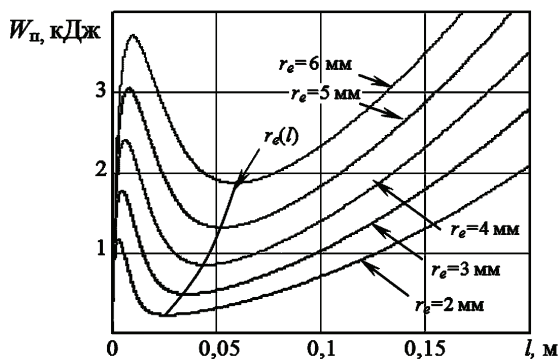


Рисунок 1 – Зависимость предпробивных потерь энергии  $W_{II}$  в функции длины разрядного промежутка  $l(U_z)$  [4]

Путем анализа представленных характеристик на экстремум (рис. 1) определялась зависимость радиуса электрода от длины разрядного промежутка  $r_e(l)$  соответствующая минимальным значениям предпробивных потерь энергии  $W_{min}$  (рис. 2). Проведя аналогичные расчеты для длин оголенной части электрода  $l_e$ , изменяющихся от 0,01 до 0,08 м (диапазон значений  $l_e$  в электродных системах большинства используемых РИТ), получена серия зависимостей радиуса электрода от длины межэлектродного промежутка  $r_e(l)$  при условии минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{min}$  (рис. 2).

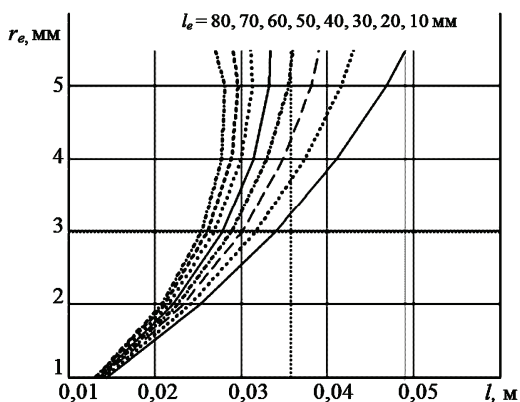


Рисунок 2 – Функциональные зависимости  $r_e(l)$ , полученные при условии обеспечения минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{min}$

Как уже упоминалось выше, при конструировании электродной системы необходимо учитывать электрическую эрозию материала электрода. Она может быть определена исходя из массы металла, которая выносятся с электрода на протяжении одного разряда заданной мощности [5]

$$mb = \frac{Kd \cdot U_{\text{э}} \cdot A}{\frac{3 \cdot C_{\text{у}} \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + Q_{\text{пл}}}{Kb} + Q_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где  $Kd$  – коэффициент, учитывающий влияние поперечного сечения электрода на массу выброшенного за разряд металла;  $U_{\text{э}}$  – эквивалентный энергетический потенциал, В;  $A$  – интеграл разрядного тока, А·с;  $C_{\text{у}}$  – удельная теплоемкость материала электрода, Дж/кг·С°;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала электрода, С°;  $T_0$  – начальная температура, С°;  $Q_{\text{пл}}$  – удельная теплота плавления, Дж/кг;  $Q_{\text{и}}$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $Kb$  – коэффициент выброса.

Для расчета в качестве материала электрода выбрана сталь. Для стали:  $Kb = 0,055$ ,  $C_{\text{у}} = 450$  Дж/кг·С°,  $T_{\text{пл}} = 1539$  С°,  $Q_{\text{пл}} = 266 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $Q_{\text{и}} = 61,2 \cdot 10^5$  Дж/кг, начальная температура принята  $T_0 = 20$  С°. При подводных искровых разрядах средней мощности значение эквивалентного потенциала частиц плазмы, взаимодействующих с электродом,  $U_{\text{э}}$  находится в диапазоне от 17 В до 20 В [5]. При колебательном разряде с малым декрементом затухания без значительной погрешности можно принять как для анода, так и для катода  $U_{\text{э}} = 18,5$  В [5]. Интеграл разрядного тока определен для рассматриваемого случая, представленного в работе [3],  $A = 0,32$  А·с. Влияние диаметра электрода на массу выброшенного за разряд металла учитывается коэффициентом  $Kd$ , который зависит от радиуса электрода и может быть представлен в виде функциональной зависимости от  $r_e$  (рис. 3) [5].

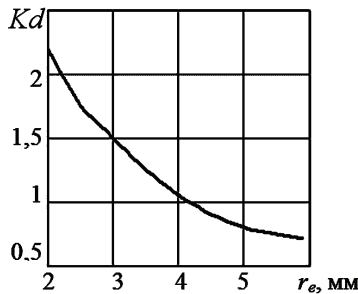


Рисунок 3 – Функциональная зависимость  $Kd$  ( $r_e$ )

При расчете параметров электродной системы оперируют количеством металла, выносимым за час работы [5], то есть необходимо знать число разрядов за час работы, которое можно определить из соотношения

$$N_p = f \cdot 3600, \quad (3)$$

где  $f$  – частота следования импульсов, определяемая требованиями технологии. Для расчета принято  $f = 0,5$  Гц (технология электрогидроимпульсной штамповки), тогда, исходя из (3), число разрядов за 1 час работы  $N_p = 1800$ .

В результате может быть определено уменьшение длины электрода за 1

час работы

$$\Delta l_e = \frac{mb \cdot Np}{\gamma \cdot \pi \cdot r_e^2}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность материала электрода, кг/м<sup>3</sup>; для стали  $\gamma = 7,88 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Длительность непрерывной работы электродной системы может быть выражена как отношение длины оголенной части электрода к уменьшению его длины

$$Tp = \frac{l_e}{\Delta l_e}. \quad (5)$$

Для расчета принято  $Tp = 24$  часа.

На основании опыта эксплуатации и рекомендаций к конструированию электродных систем линейной геометрии [5] минимальная величина оголенной части электрода  $h_{min}$  принята равной 0,03 м и должна быть учтена в выражении определения начального размера высоковольтного электрода. С учетом вышесказанного, выражение (5) принимает вид

$$l_e = Tp \cdot \Delta l_e + h_{min}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражения (2) – (4), получаем возможность построения  $l_e(r_e)$  (рис. 4).

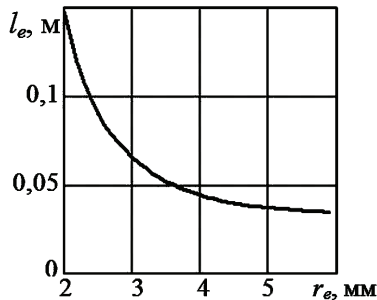


Рисунок 4 – Зависимость оголенной части электрода от его радиуса  $l_e(r_e)$

Следует отметить, что за время эксплуатации электродной системы с целью поддержания необходимого технологического режима межэлектродный промежуток должен сохраняться постоянным, что может быть достигнуто путем автоматического или ручного регулирования.

Для того, чтобы по рис. 4 стало возможным однозначно определять радиус электрода и длину его оголенной части, проводились исследования механической стойкости электрода.

Известно, что при искровом разряде в воде с высоковольтным пробоем длина канала разряда превышает межэлектродный промежуток [2]. Это утверждение позволяет допустить, что плазменный канал развивается с электрода под некоторым углом к его оси. Такое же несоосное развитие канала

может быть вызвано любой незначительной асимметрией края электрода. Подтверждением этого допущения может служить форма края электрода, которая в процессе эксплуатации становится сферической. Соответственно, вектор силового воздействия на конец электрода будет направлен под некоторым углом. Таким образом, можно утверждать, что в процессе эксплуатации к электроду прилагаются поперечные нагрузки, способные в определенных случаях повлечь за собой его деформацию и, в конечном итоге, привести к разрушению. Этот факт предлагается использовать при расчете радиуса электрода, обеспечивающего длительную его механическую стойкость. Опираясь на теоретические основы сопротивления материалов [6], предлагается рассматриваемый электрод представить в виде зажатой балки (консоли) (рис. 5) с круглым сечением.

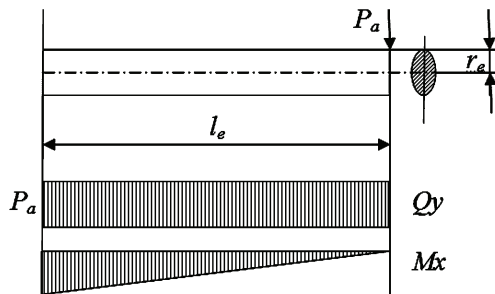


Рисунок 5 – Распределение поперечной силы и изгибающего момента

Как видно из рис. 5 в поперечном сечении стержня при поперечном изгибе возникают два силовых фактора: изгибающий момент  $M_x$  и поперечная сила  $Q_y$ . По эпюрам  $M_x$  и  $Q_y$  определяется опасное сечение (в конечном итоге радиус электрода), т.е. сечение при котором может произойти разрушение. При этом напряженное состояние представляется упрощенно плоским, при котором в окрестности произвольно выбранных точек поперечного сечения действуют нормальные и касательные напряжения. Поэтому условие прочности для таких точек должно быть сформулировано на основе какого-нибудь уже известного критерия прочности.

Вполне очевидно, что максимальная нагрузка на зажатую балку, приложенная к ее оконечности, создает в материале в точке ее зажатия максимальное напряжение  $max \sigma$ . При этом обеспечение целостности материала стальной балки может быть реализовано при условии

$$\max \sigma = \frac{\max M_x}{W} \leq [150 \cdot 10^6], \quad (7)$$

где  $W$  – момент сопротивления при сгибе (для цилиндра  $W = \pi \cdot (2 \cdot r_e)^3 / 32$ ),  $m^3$ ; допустимое напряжение или предел упругости для стали  $[max \sigma] = 150$  МПа.

В выражении (7) остается неизвестной величина изгибающего момента  $M_x$ .

$$Mx = FM_e \cdot l_e, \quad (8)$$

где  $FM_e$  – поперечная составляющая усилия, в результате давления в плазменном канале, приложенного к концу электрода, Н. Анализ результатов экспериментов и параметров электродных систем реальных технологических установок позволил предположить, что в среднем

$$FM_e = \frac{P_a \cdot \pi \cdot r_a^2}{8}, \quad (9)$$

где  $P_a$  – давление в канале разряда, Па;  $r_a$  – радиус канала разряда, м<sup>2</sup>.

Параметры  $P_a$  и  $r_a$  являются временными зависимостями, однако для расчетов достаточно использовать амплитудные значения. В рассматриваемом случае [3]:  $P_a = 315 \cdot 10^6$  Па,  $r_a = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $FM_e = 123,64$  Н.

На рис. 6 графически представлено условие (7) с учетом выражений (8), (9).

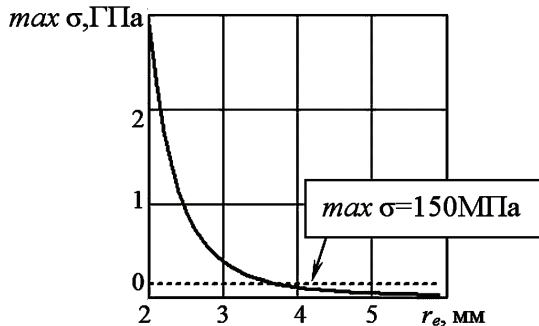


Рисунок 6 – Выбор допустимого с точки зрения прочности радиуса электрода

Таким образом, для принятых в работе условий значение радиуса электрода, соответствующее точке пересечения зависимостей на рис. 6,  $r_e = 0,038$  м является наименьшим допустимым с точки зрения механической прочности. Используя это значение в зависимостях, представленных на рис. 4 и рис. 2, становится возможным определить длину оголенной части электрода и длину межэлектродного промежутка соответственно при условии минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{\min}$ :  $l_e = 0,048$  м,  $l = 0,031$  м.

### Выводы

1. Представлен подход к определению оптимальных параметров электродной системы ( $r_e$ ,  $l_e$ ,  $l$ ) для ИЭРИЭ, использующих электроразряд с высоковольтным пробоем. Разработанный алгоритм и соответствующие уравнения позволяют с учетом механической стойкости электрода и влияния на него электрической эрозии проводить расчет значений радиуса  $r_e$  и оголенной части электрода  $l_e$ , а также длину межэлектродного промежутка  $l$ , обеспечивающие минимально возможные предпробивные потери энергии.

2. Предложенные уравнения могут служить дополнением к математическим моделям, разработанным в рамках подхода на базе решения обратных задач и позволяющим определять оптимальные параметры ИЭРИЭ, которые обеспечивали бы заданный разрядноимпульсный технологический процесс.

**Список литературы:** 1. *Вовченко А.И.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак, Р.В. Тертилов* // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 54-60. 2. *Кужекин И.П.* Импульсный пробой и канал разряда в жидкости: Дис. канд. техн. наук. 05.09.05 / Моск. энерг. ин-т. – М.: 1967. – 186 с. 3. *Вовченко А.И.* Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электротехнологических установок с учетом предразрядных процессов / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 18. – С. 61-67. 4. *Дивак Н.П.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий на базе высоковольтного пробоя, использующих энергоисточники с зарядным напряжением до  $5 \cdot 10^4$  В / *Н.П. Дивак* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 34. – С. 18-24. 5. *Гулый Г.А.* Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах / *Г.А Гулый, П.П. Малюшевский.* – К.: Наукова думка, 1977. – 174 с. 6. *Беляев Н.М.* Сопrotивление материалов / *Н.М. Беляев.* – М.: Наука, 1976. – 608 с.

*Поступила в редколлегию 31.03.2012.*