

# Эрозия электрода при высоковольтном электрическом разряде в жидкости

А. П. Смирнов\*, О. В. Хвощан, **В. Г. Жекул**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,*

*г. Николаев, 54018, Украина*

*\*e-mail: [smirnovap1978@gmail.com](mailto:smirnovap1978@gmail.com)*

Поступила в редакцию 21.09.2021

После доработки 09.11.2021

Принята к публикации 12.11.2021

Представлены результаты экспериментальных исследований массовой величины эрозии электрода (анода) при высоковольтном электрическом разряде в жидкости. Полученные данные позволили определить влияние технологических параметров и условий работы высоковольтных электроразрядных установок на массовую эрозию анода. Отмечено, что с повышением удельной электропроводности рабочей жидкости и увеличением длины межэлектродного промежутка наблюдается уменьшение величины массовой эрозии анода. Сравнение массовой эрозии анодов, выполненных из меди, стали и алюминия, показало, что среди них наибольшей эрозионной стойкостью при электрическом разряде в воде обладает стальной анод. На основе результатов экспериментальных исследований была разработана эмпирическая методика, которая позволяет оценить массовую эрозию анода за один электрический разряд в воде.

*Ключевые слова:* высоковольтный электрический разряд в воде, эрозия электрода, интеграл модуля разрядного тока, анод, корреляция

УДК 537.528:620.19

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.21>

## ВВЕДЕНИЕ

Электрический разряд в жидкости используется в различных сферах человеческой деятельности. Ярким примером может служить эффективное применение электроразрядного оборудования в нефтедобывающей и металлургической промышленности, машиностроении [1]. Одним из основных элементов электроразрядных устройств различного назначения является электродная система [2], в которой осуществляется высоковольтный пробой межэлектродного промежутка в жидкости. В ней происходит преобразование электрической энергии в механическую за счет ввода энергии, запасенной конденсаторами, в канал разряда. Электродная система должна обеспечивать эффективную и надежную работу электроразрядных установок, высокий коэффициент преобразования электрической энергии в механическую и иметь экономически обоснованный ресурс работы до ремонта или замены некоторых ее элементов.

Обеспечение высокого коэффициента преобразования электрической энергии в механическую выполняется на этапе разработки конструкции электродной системы за счет правильного выбора ее геометрии и согласования с электрическими параметрами разрядного

контура, с учетом оценки влияния внешних условий и свойств среды, в которой происходит разряд. Непрерывный режим работы электродной системы в технологическом цикле определяется стойкостью к разрушающему воздействию электрического разряда металлических электродов, подвергающихся эрозии при протекании импульсных токов килоамперного диапазона, и диэлектрических изоляторов. При этом следует учитывать, что работа электроразрядных устройств осуществляется в широком диапазоне технологических параметров и внешних условий. В связи с этим важной научно-технической задачей является как исследование влияния технологических параметров и условий работы высоковольтных электроразрядных установок на массовую эрозию анода, так и прогнозирование времени работы электроразрядного устройства до момента необходимости проведения замены анода. Это позволит не допустить снижения эффективности электроразрядной установки и обеспечит бесперебойный и безаварийный режим работы.

Учитывая все вышесказанное, цель данной работы – экспериментальное исследование влияния технологических параметров и условий работы высоковольтных электроразрядных установок на массовую эрозию анода, вызванную электрическим разрядом в воде.

## ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

Массовая эрозия электродов при электрическом разряде (электрическая эрозия) является важной и актуальной темой научных исследований [3–5]. Вкратце рассмотрим ее физическую сущность.

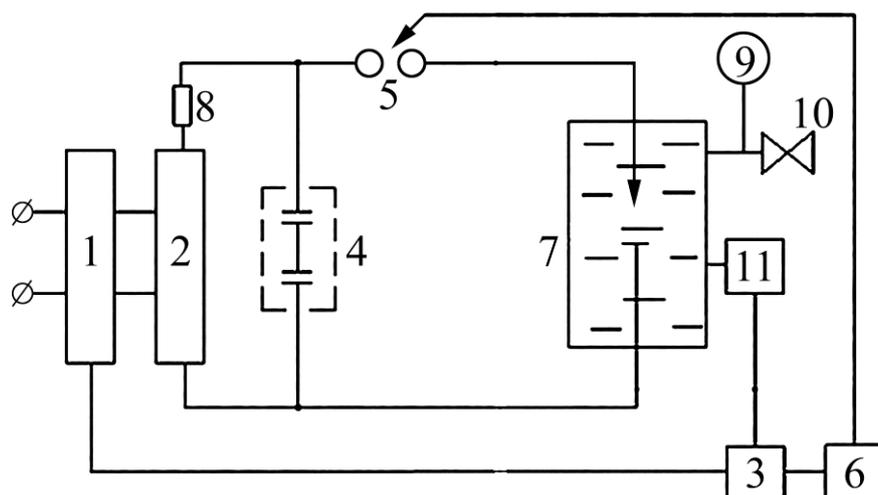
Электрическая эрозия – физическое явление, заключающееся в направленном выбрасывании материала электродов под действием самостоятельного электрического разряда, протекающего между ними. В настоящее время существуют две теории эрозии материала электродов, которые можно применить для электрического разряда в жидкости – электродинамическая [6–8] и тепловая [9–10].

Согласно электродинамической теории, в процессе протекания электрического тока поверхность электрода подвергается действию ударов потоков мелких и тяжелых капель; происходит плавление мишени, воспринимающей удар, за счет тепла, полученного при торможении материальных частиц, и последующий выброс волной расплавленного и размягченного материала. Согласно тепловой теории, после пробоя межэлектродного промежутка на поверхности электродов под воздействием потоков электронов на анод и ионов на катод возникают плоские, локализованные на небольших участках поверхности источники тепла. Под действием этих процессов металл на поверхности электрода плавится и частично испаряется, в результате чего на этом месте к концу импульса образуется лунка, в значительной части заполненная расплавленным и перегретым металлом. Металл удаляется из лунки за счет испарения. Силы, выбрасывающие металл из лунки, возникают благодаря гидро- и газодинамическим процессам, протекающим в межэлектродном зазоре и в приповерхностных слоях электродов. Следует отметить, что эти теории подтверждаются экспериментально и не противоречат, а дополняют друг друга. В обзорной работе [11] приведены основные положения эрозии металла при электрическом разряде: электрическая эрозия материала электродов при импульсных разрядах имеет «тепловую природу»; удаление материала из электродов происходит в жидкой и паровой фазах; эрозионная стойкость материала электродов определяется комплексом их теплофизических свойств; механические свойства не оказывают существенного влияния на эрозию материала.

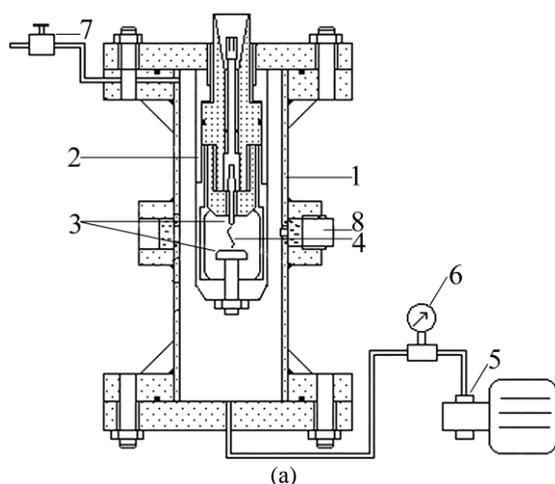
Согласно результатам работ [12, 13], процесс эрозии электродов под действием электрического разряда может быть разделен на несколько стадий. **Первая стадия.** Подготовка канала сквозной проводимости. Во время этой стадии происходит образование канала сквозной проводимости. **Вторая стадия.** Пробой жидкости. На этой стадии поверхность анода претерпевает ряд преобразований: разрушение кристаллов металла; нагрев до весьма высокой температуры определенного объема анода; в результате действия тепла происходят плавление и испарение металла в лунках на поверхности анода и выброс электродинамическими силами в межэлектродное пространство расплавленного и размягченного объема металла. **Третья стадия.** Прекращение тока. При прекращении прохождения электрического тока в межэлектродном промежутке начинаются деионизация газового промежутка и его схлопывание. В момент, когда давление в канале достаточно большое, расплавленный металл находится в лунках, расположенных на поверхностях электрода. По мере расширения газового пузыря давление внутри него резко падает. Содержащийся в лунках расплавленный металл выбрасывается в межэлектродный промежуток в жидкую диэлектрическую среду и затвердевает в виде мельчайших шариков.

Отметим еще ряд особенностей, присущих эрозии электродов при электрическом разряде в жидкости. Так, в работе [14] автором отмечается, что количество материала, выносимое с анода, а следовательно, и его износ, при одноименном материале электродов будет значительно больше, чем у катода. Поэтому в данной работе будет сделан акцент на исследовании эрозии анода.

В работе [15] приведены экспериментально установленные закономерности эрозии электродов применительно к электроразрядным технологиям, использующим электрический разряд в жидкости, в частности отмечается, что эрозия электродов при высоковольтных импульсных разрядах в жидкости зависит от материала электрода и от природы жидкости, а также что эрозия прямо пропорциональна энергии, выделившейся в канале разряда. Кроме того, отмечено, что эрозия анода превосходит эрозию катода и необходимо различать два режима эрозии электродов: в режиме приработки и в рабочем режиме, поэтому исследования будут проводиться на рабочем режиме (продолжительном режиме после приработки).



**Рис. 1.** Структурная схема испытательного стенда: 1 – регулировочный трансформатор РТТМ 25/0,5; 2 – высоковольтный трансформатор выпрямитель ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – разрядная камера высокого давления; 8 – зарядное сопротивление; 9 – манометр; 10 – клапан; 11 – насос высокого давления с электроприводом.



**Рис. 2.** Схема технологической части испытательного стенда (а): 1 – камера высокого давления; 2 – электродная система «Скиф»; 3 – электроды электродной системы типа острие (анод) – плоскость (катод); 4 – канал разряда; 5 – насос высокого давления; 6 – манометр; 7 – система сброса давления; 8 – технологическое отверстие для установки дополнительной регистрирующей аппаратуры. Общий вид разрядной камеры высокого давления (б).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭРОЗИИ АНОДА ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДАХ

Экспериментальные исследования проводились на стенде, позволяющем осуществлять серию разрядов в условиях повышенного гидростатического давления [16]. Экспериментальный стенд состоит из трех частей: энергетической, технологической и измерительной. Энергетическая часть обеспечивает установку требуемых параметров разрядного контура (напряжение и емкость). Она включает оборудование для осуществления высоковольтного электрического разряда, в частности (рис. 1): регулировочный трехфазный трансформатор масляный РТТМ 25/0,5 (1), выпрямитель трансформатор ВТМ 15/50 (2), пульт управления (3), батарею импульсных конденсаторов (4), воздушный

управляемый разрядник (5), блок поджига (6), зарядное сопротивление (8).

Схема технологической части экспериментального стенда представлена на рис. 2а. Ее основу составляет разрядная камера высокого давления (рис. 2б, на рис. 1 – позиция 7), в которой осуществляется электрический разряд. Помимо камеры в технологическую часть входит оборудование для обеспечения и контроля высокого гидростатического давления: манометр, клапан, насос высокого давления.

В экспериментальных исследованиях использовались аноды, изготовленные из стали (марка Ст 20), меди (сплав М2) и алюминия (сплав АМг6). Для обеспечения стабильности разрядных характеристик и массы выносимого за один разряд металла начальная конфигурация оконечности анодов имела вид полусферы,

которая была получена в режиме приработки. Диаметр анода – 4 мм.

В ходе экспериментальных исследований выполнялось осциллографирование разрядных токов и напряжений. Для измерения тока в канале разряда использовался коаксиальный омический шунт, разработанный в ИИПТ НАН Украины [17], для измерения напряжения на разрядном промежутке – делитель напряжения NorthStarPVM-2 [18].

Для регистрации сигналов, полученных с помощью шунта и делителя напряжения, использовался цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS 2024B, а для счета числа разрядов в каждой экспериментальной серии применялся электронно-счетный частотомер ЧЗ-57 в режиме суммирования импульсов с модернизацией измерительного тракта. Измерение начальной и конечной массы анода выполнялось с помощью лабораторных весов ТВЕ-0,21-0,001, класс точности II, цена деления 0,001 г, диапазон измерений от 0,02 г до 0,21 кг.

Экспериментальные исследования проводились согласно следующему алгоритму.

Разрядная камера заполнялась водным электролитом с требуемой удельной электропроводностью. В электродной системе устанавливался новый анод с длиной выступающей из изолятора части 10 мм. Выполнялась приработка анода в количестве 100 разрядов. Предварительные эксперименты показали, что после приработки анода в количестве 100 электрических разрядов наблюдалась стабилизация электрических характеристик разряда (разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке). Затем анод демонтировался и выполнялось измерение его массы (начальная масса  $m_{\text{нач}}$ ). По завершении этой процедуры анод вновь устанавливался в электродную систему. Регулированием положения катода устанавливалась определенная начальная длина межэлектродного промежутка, а с помощью насоса высокого давления в камере – требуемый уровень гидростатического давления. На каждой экспериментальной серии импульсов, характеризующейся комбинацией параметров разрядного контура и внешних условий, выполнялась серия разрядных импульсов, состоящая не менее чем из 400 разрядов. Количество импульсов  $n_{\text{имп}}$  фиксировалось счетчиком импульсов.

В ходе экспериментов отмечалась стабильность электрических характеристик в течение одной экспериментальной серии. Поэтому в рамках этой серии осуществлялась выборочная регистрация напряжения на разрядном промежутке и тока в канале разряда в количестве 10 осциллограмм тока и напряжения – по три в

начале и конце серии импульсов, четыре в середине экспериментальной серии. По окончании серии импульсов выполнялся демонтаж разрядной камеры и анода из электродной системы, а также измерялась его масса  $m_{\text{кон}}$ . Массовая эрозия анода за один импульс  $M_p$  определялась по выражению (1):

$$M_p = \frac{m_{\text{нач}} - m_{\text{кон}}}{n_{\text{имп}}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{нач}}$  – начальная масса анода, г;  $m_{\text{кон}}$  – масса анода после серии импульсов, г;  $n_{\text{имп}}$  – количество импульсов, шт.

### ВЕЛИЧИНЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭРОЗИЮ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

Анализ научной литературы [12, 15, 19–22] позволил выделить несколько характеристик, влияющих на величину эрозии:

– напряжение пробоя  $U_a$ , В – напряжение, соответствующее началу активной стадии разряда (резкое увеличение разрядного тока на осциллограмме);

– интеграл модуля разрядного тока  $I_{\text{инт}}$ , А:

$$I_{\text{инт}} = \int_{t_1}^{t_2} |i(t)| dt, \quad (2)$$

где  $t_1$  – время начала активной стадии разряда, мкс;  $t_2$  – время завершения разряда, мкс;  $|i(t)|$  – модуль тока на активной стадии разряда, А;

– средний разрядный ток  $I_{\text{ср}}$ , А:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |i(t)| dt}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

– максимальная мощность разряда  $S_{\text{max}} = \max(u(t) \cdot i(t))$ , ВА;

– средняя мощность разряда  $S_{\text{ср}}$ , ВА:

$$S_{\text{ср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [u(t) \times i(t)] dt}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

где  $i(t)$  – временной профиль разрядного тока, А;  $u(t)$  – временной профиль напряжения на разрядном промежутке, В;

– полезная энергия разряда  $W$ , Дж:

$$W = \frac{C \times U_a^2}{2}, \quad (5)$$

где  $C$  – зарядная емкость, Ф;

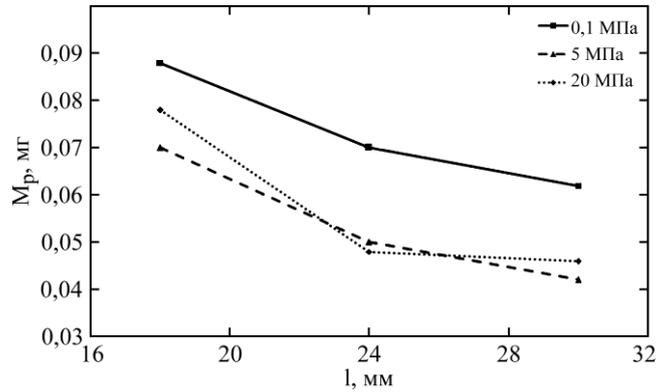
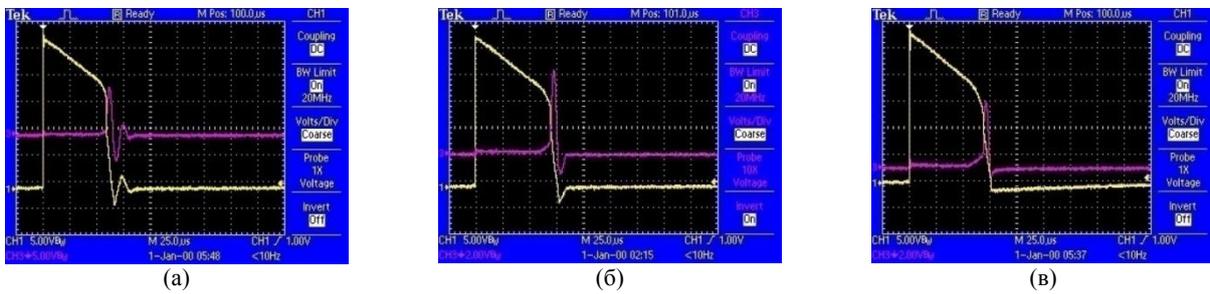
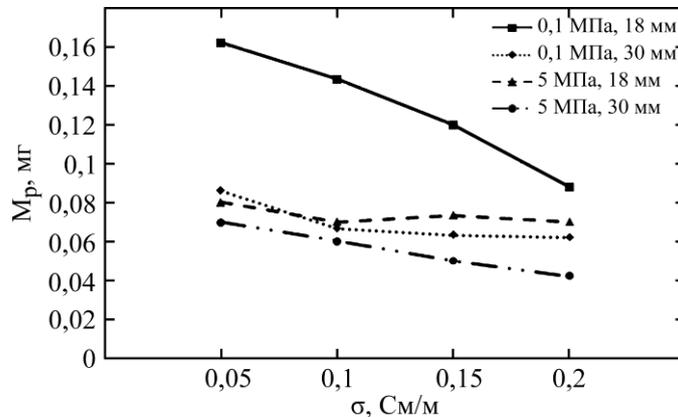
– перенос заряда  $q$ , Кл:

$$q = CU_a.$$

Вышеприведенные величины позволяют выявить влияние технологических параметров и условий работы высоковольтных электро-разрядных установок на массовую эрозию анода,

**Таблица 1.** Теснота связи между массовой эрозией анода за 1 электрический разряд и различными факторами

Фактор	$I_{int}$	$I_{cp}$	$S_{max}$	$S_{cp}$	$W$	$q$	$U_a$
Коэффициент корреляции	0,915	0,733	0,707	0,207	0,818	0,825	0,467

**Рис. 3.** Влияние длины межэлектродного промежутка на массовую эрозию анода за один электрический разряд при фиксированных значениях гидростатического давления.**Рис. 4.** Осциллограммы разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке при различных длинах межэлектродного промежутка и гидростатическом давлении 5 МПа: (а) – длина межэлектродного промежутка 18 мм; (б) – 24 мм; (в) – 30 мм.**Рис. 5.** Влияние удельной электропроводности жидкости на массовую эрозию анода за один разряд для фиксированных значений гидростатического давления и длин межэлектродного промежутка.

так как изменение начальных параметров и условий разряда приводит к изменению характера выделения энергии, что сказывается на временном профиле тока в канале разряда и напряжения на разрядном промежутке, а соответственно и на этих величинах.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить значения вышеперечисленных величин. Для установления взаимосвязи между рассчитанными величинами и массовой эрозией анода был использован корреляционный анализ [23, 24]. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 1.

Анализ приведенных в табл. 1 данных позволяет сделать вывод, что сильная теснота связи для массовой эрозии анода наблюдается с интегралом разрядного тока (коэффициент корреляции 0,915), средним значением разрядного тока (0,733), максимальной мощностью (0,707), полезной энергией разряда (0,818) и переносом заряда (0,825). Выявлена слабая теснота связи эрозии с напряжением пробоя (0,467) и практически отсутствует связь эрозии со средним значением мощности (0,207). Результаты корреляционного анализа показали, что эрозия анода при электрическом разряде в

воде зависит от совокупности факторов, основным из которых является интеграл разрядного тока, что подтверждает вывод, сделанный другими авторами [22].

#### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК, А ТАКЖЕ МАТЕРИАЛА АНОДА НА ЕГО МАССОВУЮ ЭРОЗИЮ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

Современное высоковольтное электро-разрядное оборудование используется во многих отраслях человеческой деятельности и соответственно при различных технологических параметрах и условиях работы. Эти технологические параметры и условия работы влияют на конструкцию и параметры электроразрядного оборудования, его ресурс, эффективность работы, а также на величину эрозии электродов. Поэтому в данной работе было исследовано влияние некоторых технологических параметров и условий работы электроразрядного оборудования на величину эрозии анода. В качестве таких параметров были выбраны длина межэлектродного промежутка; электропроводность и гидростатическое давление рабочей жидкости. Выбор длины межэлектродного промежутка и электропроводности жидкости обусловлен тем, что данные параметры могут изменяться в процессе работы электроразрядного оборудования за счет эрозии анода и загрязнения рабочей жидкости. А при повышенных гидростатических давлениях работает некоторое электроразрядное оборудование, например электроразрядное устройство для декольматации скважин [25].

В большинстве современных электроразрядных устройств из-за преимуществ в технологичности использования и обработки, дешевизны материала, хороших эксплуатационных качеств применяется стальной анод. Поэтому в данных экспериментальных исследованиях в качестве материала анода была выбрана сталь марки Ст 20. Исследования проводились при следующих параметрах разрядного контура: емкость конденсаторной батареи – 1,9115 мкФ; зарядное напряжение – 30 кВ.

Результаты изучения влияния длины межэлектродного промежутка в диапазоне от 18 до 30 мм на массовую эрозию анода при фиксированных величинах гидростатического давления в жидкости с удельной электропроводностью 0,2 См/м приведены на рис. 3.

Анализ приведенных на рис. 3 результатов показывает, что увеличение межэлектродного промежутка с 18 до 30 мм приводит к

уменьшению эрозийного износа электрода-анода на величину до 40%. Это связано с тем, что с увеличением длины промежутка меняется характер ввода энергии. Анализ осциллограмм разрядного тока и напряжения при разных длинах межэлектродного промежутка (рис. 4) показывает, что с увеличением длины межэлектродного промежутка от 18 до 30 мм происходит трансформация временного профиля разрядного тока от колебательного (рис. 4а) до близкого к апериодическому (рис. 4в) с одновременным уменьшением его амплитудного значения. Это приводит к уменьшению интеграла модуля тока и соответственно к снижению величины массовой эрозии анода.

Результаты исследования влияния удельной электропроводности рабочей среды в диапазоне от 0,05 до 0,2 См/м на массовую эрозию анода при фиксированных величинах гидростатического давления в жидкости и длинах межэлектродного промежутка приведены на рис. 5.

Анализ представленных результатов (рис. 5) показывает, что с увеличением удельной электропроводности жидкости происходит уменьшение массовой эрозии анода. Это вызвано тем, что с ростом удельной электропроводности жидкости происходит увеличение предпробивных потерь, что приводит к уменьшению величины напряжения активной стадии пробоя, интеграла модуля разрядного тока и энергии, выделившейся в канале разряда, а соответственно к уменьшению массовой эрозии анода.

В работе также исследовалось влияние изменения гидростатического давления в пределах от 0,1 до 20 МПа в жидкости с начальной удельной электропроводностью 0,2 См/м, заполняющей электродную систему, на массовую эрозию анода. Результаты экспериментальных исследований при фиксированных величинах длины межэлектродного промежутка представлены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшая величина массовой эрозии наблюдается при нормальных условиях. С ростом гидростатического давления рабочей жидкости от 0,1 до 5 МПа происходит некоторое уменьшение величины эрозии анода. Однако при последующем увеличении гидростатического давления до 20 МПа ярко выраженной зависимости уже не наблюдается. Это подтверждают данные, которые приведены на рис. 3 и 5. Полученные результаты можно объяснить тем, что изменение гидростатического давления оказывает аналогичное влияние на электрические характеристики разряда. Так, на осциллограммах (рис. 7) хорошо заметны значительная трансформация сигнала разрядного

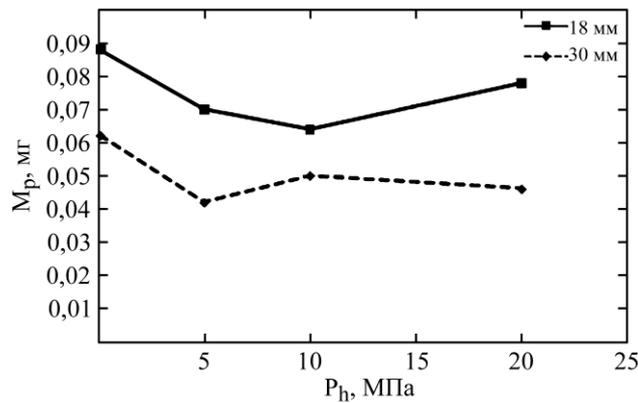


Рис. 6. Зависимость массовой эрозии анода за один разряд от гидростатического давления для различных значений межэлектродного промежутка.

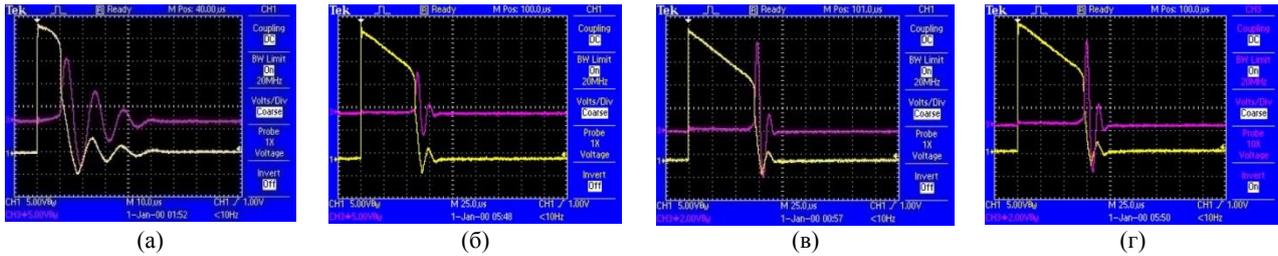


Рис. 7. Оциллограммы разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке при неизменных параметрах разрядного контура на различных гидростатических давлениях (длина межэлектродного промежутка 18 мм): (а) – гидростатическое давление 0,1 МПа; (б) – 5 МПа; (в) – 10 МПа; (г) – 20 МПа.

тока и увеличение длительности предпробивной стадии, что приводит к уменьшению интеграла модуля разрядного тока при повышении гидростатического давления от 0,1 до 5 МПа. В тоже время последующее повышение гидростатического давления от 5 до 20 МПа сопровождается незначительными изменениями оциллограмм разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке.

Величина эрозии анода, а соответственно и частота его замены в процессе работы электро-разрядного оборудования будут зависеть от материала анода. В рамках данной работы было выполнено исследование по влиянию материала анода на его массовую эрозию при электрическом разряде в воде. Аноды были изготовлены из стали (марка Ст 20), меди (сплав М2) и алюминия (сплав АМг6). Эксперименты проводились при следующих параметрах разрядного контура и характеристиках рабочей жидкости: зарядное напряжение – 30 кВ; емкость конденсаторной батареи – 1,9115 мкФ; удельная электропроводность рабочей жидкости – 0,2 См/м; длина межэлектродного промежутка – 18, 24, 30 мм.

Полученные результаты (рис. 8) показывают, что большую эрозионную стойкость имеет стальной анод, причем уменьшение его массовой эрозии в сравнении с другими материалами на разных режимах разряда может достигать от 40 до 180%.

#### ЭМПИРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАССОВОЙ ЭРОЗИИ АНОДА

Корреляционный анализ и анализ научной литературы показал, что основным параметром,

который определяет массовую эрозию анода, является интеграл модуля разрядного тока ( $\text{Int}(i)$ ). В связи с этим было принято решение при разработке расчетной методики определения эрозии материала анода за один разряд использовать зависимость массовой эрозии от модуля интеграла тока. В работе [22] отмечается, что зависимость эрозии от интеграла модуля тока носит линейный характер.

Для разработки расчетной методики использовались данные экспериментальных исследований, полученные на четырех режимах. На рис. 9 приведены результаты при использовании стального анода (марка стали Ст 20). Все результаты разбиты на четыре группы по запасенной энергии разряда: 646, 860, 1635 и 2177 Дж.

На рис. 9 также приведены линии тренда полученных экспериментальных зависимостей, их математические интерпретации и коэффициенты достоверности аппроксимации. Полученные результаты позволяют выбрать линейную функцию вида (7) в качестве базовой зависимости массовой эрозии анода от интеграла модуля тока:

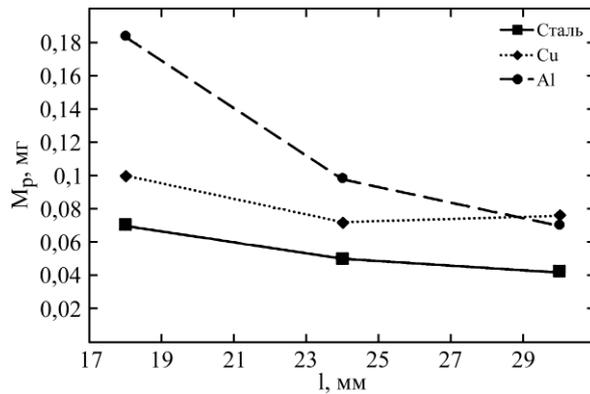
$$M_p = k \cdot \text{Int}(i) + B, \quad (7)$$

где  $M_p$  – массовая эрозия анода за один разряд, мг;  $\text{Int}(i)$  – интеграл модуля разрядного тока, А·с;  $k$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты.

Считаем, что эмпирические коэффициенты  $k$  и  $B$  будут представлять из себя функцию от величины запасенной энергии ( $W_z$ ) (8):

$$k = f(W_z), \quad B = F(W_z), \quad (8)$$

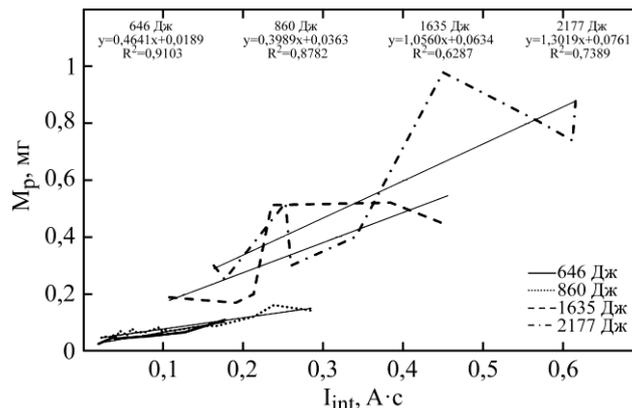
где  $W_z$  – запасенная энергия, Дж.



**Рис. 8.** Зависимость массы эрозии анода, выполненного из разного материала, за один разряд от длины межэлектродного промежутка при гидростатическом давлении 5 МПа.

**Таблица 2.** Параметры разрядного контура для экспериментальных исследований влияния запасенной энергии разряда на массовую эрозию анода

Емкость конденсаторной батареи, мкФ	Индуктивность разрядного контура, мкГн	Напряжение зарядки конденсаторной батареи, кВ	Запасенная энергия, Дж
1,9115	1,98	26	646,1
1,9115	1,98	30	860,2
4,838	1,76	26	1635,2
4,838	1,76	30	2177,1



**Рис. 9.** Зависимость массовой эрозии стального анода за один разряд от интеграла тока при разных значениях запасенной энергии.

Графический вид зависимостей  $k = f(W_z)$ ,  $B = F(W_z)$  приведен на рис. 10. Анализ показывает, что для их математической интерпретации можно использовать линейную аппроксимацию. Математические выражения зависимостей и коэффициенты достоверности аппроксимации также приведены на рис. 10.

С учетом зависимостей, приведенных на рис. 10, выражение (7) приобретает вид (9):

$$M_p = (0,0006146W_z - 0,0120313) \text{Int}(i) + (0,0000360W_z + 0,0008679). \quad (9)$$

Выражение (9) может быть использовано для оценочного расчета массовой эрозии стального анода, вызванной электрическим разрядом в воде, в диапазоне параметров, которые приведены в табл. 2.

Для оценки точности полученного выражения (9) были выполнены расчет массовой эрозии анода и сравнение полученных расчетных

результатов с экспериментальными данными (рис. 11), который показал, что на режимах с запасенной энергией до 1 кДж получено удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и расчета – до 33%. При этом для  $\approx 90\%$  режимов расхождение составляет менее 25%, а для более 70% режимов – менее 20%. На режимах с запасенной энергией более 1 кДж наблюдается большее расхождение результатов расчета и эксперимента – до  $\approx 46\%$ . При этом расхождение менее 40% отмечается для  $\approx 82\%$  режимов, расхождение менее 35% – для  $\approx 76\%$  режимов, а для 58% режимов – менее 25%.

#### УЧЕТ ТИПА МАТЕРИАЛА АНОДА В ЭМПИРИЧЕСКОЙ МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ЭРОЗИИ АНОДА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

В работах [2, 22] приведено выражение (10), которое позволяет определить количество

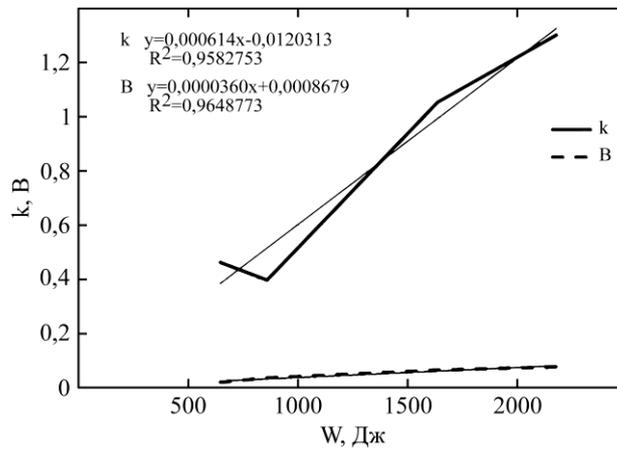


Рис. 10. Зависимость коэффициентов линейной функции (7) от запасенной энергии.

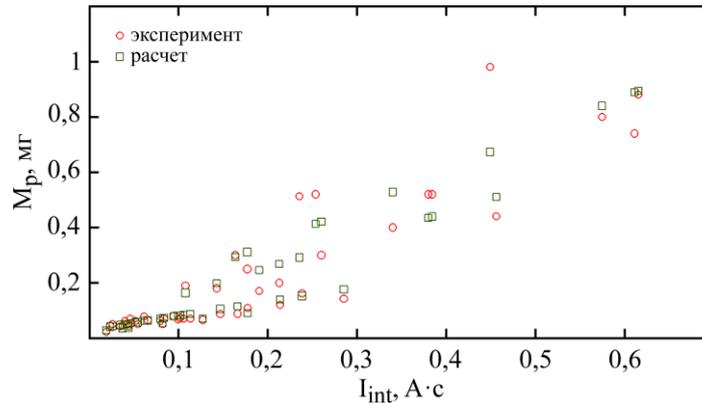


Рис. 11. Экспериментальные и расчетные значения массовой эрозии анода за один разряд.

металла, уносимого с электрода из разного материала в течение одного разряда:

$$m_d = \frac{k_d U_e I_{\text{int}}}{\frac{3C_T(T_m - T_0) + q_m}{K_e} + q_e}, \quad (10)$$

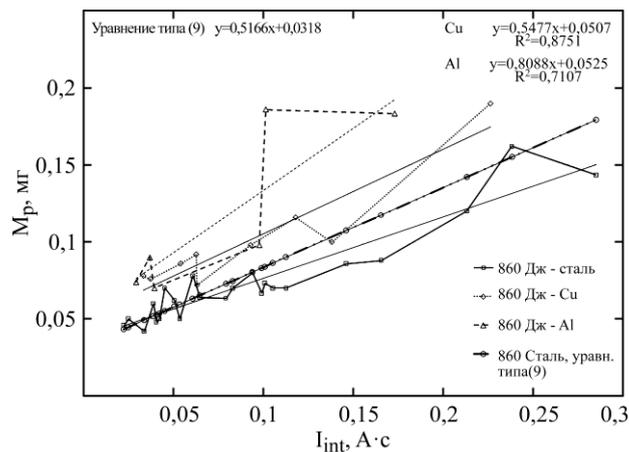
где  $k_d$  – коэффициент, учитывающий влияние диаметра токопроводящего стержня на эрозию;  $U_e$  – эквивалентный энергетический потенциал, В;  $I_{\text{int}}$  – интеграл от модуля разрядного тока, А·с;  $C_T$  – удельная теплоемкость материала стержня анода, Дж/кг·°С;  $T_m$ ,  $T_0$  – температура плавления и начальная температура материала стержня анода соответственно, °С;  $q_m$ ,  $q_e$  – удельная теплота плавления и испарения материала анода соответственно, Дж/кг;  $K_e$  – коэффициент выброса материала за один разряд.

Выражение (10) было получено путем обработки результатов экспериментальных исследований, и его использование требует проведения дополнительных исследований по определению границ его применимости, уточнению входящих в него коэффициентов, а также сравнения результатов расчета и эксперимента при различных параметрах разрядного контура. Однако подходы, используемые авторами выражения (10), можно применить при разработке других расчетных моделей. Так, в выражении

(10) учет влияния материала анода на его массовую эрозию осуществляется с помощью постоянных коэффициентов и теплофизических свойств материала анода:  $k_d$ ,  $C_T$ ,  $T_m$ ,  $q_m$ ,  $q_e$ ,  $K_e$ . В диапазоне рабочих температур до 50 °С комбинацию этих коэффициентов с малой погрешностью можно заменить единым коэффициентом ( $k_m$ ) и найти его экспериментальным путем.

Для определения влияния материала анода на его эрозию при электрическом разряде в воде рассмотрим зависимости массовой эрозии анода от интеграла модуля тока для разных материалов (рис. 12) при запасенной энергии 860 Дж (емкость конденсаторной батареи 1,9115 мкФ, зарядное напряжение 30 кВ).

На рис. 12 приведены линейные аппроксимации экспериментальных кривых, полученных при исследовании эрозии анода из меди (сплав М2) и алюминия (сплав АМг6), а также выражение для расчета массовой эрозии стального анода (марка стали Ст 20), найденное из выражения (9). Линейная зависимость массовой эрозии анода от модуля интеграла разрядного тока характеризуется коэффициентами  $k$  и  $B$  (8). В табл. 3 приведены коэффициенты  $k$  и  $B$  линейных зависимостей для меди и алюминия при запасенной энергии 860 Дж (коэффициенты взяты из выражений линейной



**Рис. 12.** Зависимость массовой эрозии анода за один разряд от интеграла модуля разрядного тока для разных материалов при запасенной энергии 860 Дж.

**Таблица 3.** Значения коэффициентов линейной зависимости массовой эрозии анода от интеграла модуля разрядного тока для разных материалов

Коэффициент	Энергия, Дж	Материал		
		Ст 20	АМг6	М2
$k$	860	0,5166	0,8088	0,5477
$B$	860	0,0318	0,0525	0,0507
$k_r$		1	1,5656	1,0602
$B_r$		1	1,6509	1,5943
$k$	2177	1,326	2,076	1,4058
$B$	2177	0,0792	0,13075	0,1263

аппроксимации на рис. 12). Для стали эти коэффициенты определялись согласно зависимостям  $k = f(W_2)$ ,  $B = F(W_2)$ , математическое выражение которых приведено на рис. 10, для режимов с запасенной энергией 860 и 2177 Дж.

Влияние материала на массовую эрозию анода из меди и алюминия при разных значениях запасенной энергии учтем двумя эмпирическими поправочными относительными коэффициентами  $k_r$  и  $B_r$ . Эти относительные коэффициенты представляют собой отношение коэффициентов линейной зависимости (7)  $k$  и  $B$  для исследуемого материала (в нашем случае сплавов АМг6 и М2) к аналогичным коэффициентам линейной зависимости сплава Ст 20 для запасенной энергии 860 Дж и позволяют уточнить линейные коэффициенты зависимости (9) для различных материалов. Было принято допущение, что  $k_r$  и  $B_r$  не зависят от величины запасенной энергии. Поэтому, зная коэффициенты линейной зависимости массовой эрозии анода от интеграла модуля разрядного тока  $k$  и  $B$  при запасенной энергии 2177 Дж для стали, с помощью поправочных относительных эмпирических коэффициентов  $k_r$  и  $B_r$  были определены коэффициенты линейной зависимости  $k$  и  $B$  при запасенной энергии 2177 Дж для анодов из сплавов АМг6 и М2. Все расчетные значения приведены в табл. 3.

С помощью данных коэффициентов был выполнен расчет массовой эрозии анода за один

разряд для анодов из сплавов АМг6 и М2 и проведено сравнение с результатами экспериментальных исследований при двух значениях запасенной энергии (860 и 2177 Дж). Можно отметить, что для сплава АМг6 при энергии 860 Дж расхождение результатов расчета и экспериментальных данных до  $\approx 34\%$ , а при энергии 2177 Дж – до  $\approx 23\%$ . Для сплава М2 при энергии 860 Дж расхождение результатов расчета и экспериментальных данных до  $\approx 26\%$ , а при энергии 2177 Дж – до  $\approx 41\%$ .

Полученные результаты показывают, что описанный выше подход можно применить для оценки массовой эрозии анодов, изготовленных из сплавов АМг6 и М2.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ ПРИ ПАРАМЕТРАХ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Проверка универсальности расчетной методики выполнялась при параметрах существующей электроразрядной технологии, отличных от использованных в приведенных экспериментальных исследованиях. В качестве тестовой технологии была выбрана электрогидроимпульсная штамповка на гидропрессе, разработанной в ИИПТ НАН Украины [26]. Данная технология реализуется при следующих параметрах разрядного контура: запасаемая энергия – 5,625 кДж; рабочее напряжение – 30,0 кВ; емкость конденсаторной батареи – 12,5 мкФ; индуктивность разрядного контура –

**Таблица 4.** Результаты экспериментальных исследований эрозии анода

Тип анода	$M_p$ , мг	$I_{int}$ , А·с	$U_a$ , В
Цилиндрический анод, диаметр 8 мм	2,1	1,761	29023

**Таблица 5.** Влияние диаметра электрода, выполненного из стали марки Ст.3, на количество выброшенного за один разряд металла [2]

$d$ , мм	4	5	6	7	8	9	10
$m_d$ , мг	1,12	0,848	0,701	0,563	0,485	0,406	0,390

**Таблица 6.** Сравнение результатов расчета и эксперимента

Анод	$I_{int}$ , А·с	$M_{p\ э}$ , мг	$M_{p\ p1}$ , мг	$k_d$	$M_{p\ p2}$ , мг	$\delta$ , %
Цилиндрический, Ø 8 мм	1,761	2,1	6,2702	2,31	2,714	-29,2

5,44 мкГн; электропроводность рабочей среды – 0,042 См/м; длина межэлектродного промежутка – 20 мм. При данных параметрах разрядного контура реализуется гидродинамическое воздействие, величина которого не позволяет использовать аноды диаметром 4 мм. Поэтому в исследованиях применялись цилиндрические аноды диаметром 8 мм.

Результаты экспериментальных исследований эрозии анода представлены в табл. 4.

Известно, что диаметр анода оказывает существенное влияние на массовую искровую эрозию: анод большего диаметра обладает большей эрозионной стойкостью. Соответственно в расчетную методику необходимо ввести корректировочный коэффициент ( $k_d$ ), учитывающий величину диаметра анода. Для его определения необходимо проведение специальных экспериментов либо можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 5 [2].

Анализируя данные табл. 5, можно отметить, что увеличение диаметра от 4 до 8 мм дает уменьшение массы выброшенного за один разряд металла для стального анода (из стали марки Ст 3) в 2,31 раза. Учитывая все вышесказанное, выражение (9) с учетом энергии разряда 5,625 кДж и коэффициента  $k_d$  приобретает вид (11). Используя полученное выражение (11), можно выполнить расчет эрозии анода с диаметром 8 мм за один разряд:

$$M_p = (3,4451I_{int}(i) + 0,20337) / k_d. \quad (11)$$

Результаты расчета приведены в табл. 6, в которой приняты следующие обозначения:  $I_{int}$  – интеграл модуля разрядного тока, А·с;  $M_{p\ э}$  – определенная в ходе эксперимента искровая эрозия анода за один разряд, мг;  $M_{p\ p1}$  – расчетная искровая эрозия за один разряд анода диаметром 4 мм, мг;  $M_{p\ p2}$  – расчетная искровая эрозия за один разряд анода диаметром 8 мм, мг;  $k_d$  – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение диаметра анода от 4 до 8 мм;  $\delta$  – отклонение результатов расчета и эксперимента.

Тестирование расчетной методики показало, что отклонение результатов расчета и эксперимента составило 29,2%. Это дало возможность использования разработанной расчетной методики массовой эрозии анода при электрическом разряде в воде для режимов с повышенной энергетикой. Однако в случае использования анодов большего диаметра необходимо определение коэффициента влияния диаметра анода на каждый конкретный тип материала.

## ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований эрозии анода при высоковольтном электрическом разряде в воде показали, что как с увеличением межэлектродного промежутка от 18 до 30 мм, так и с повышением удельной электропроводности рабочей жидкости от 0,05 до 0,2 См/м происходит уменьшение величины массовой эрозии анода при электрическом разряде в воде при других неизменных параметрах разрядного контура. При атмосферном значении гидростатического давления в электродной системе массовая эрозия анода имеет повышенные величины, в то время как с его увеличением четкой зависимости не наблюдается. Сравнение анодов, изготовленных из стали марки Ст 20, меди (сплав М2), алюминия (сплав АМг 6), показало, что наибольшей эрозионной стойкостью при электрическом разряде в воде обладает стальной анод, причем уменьшение его массовой эрозии в сравнении с другими материалами на разных режимах разряда может достигать от 40 до 180%.

Для определения величины массовой эрозии анода при электрическом разряде в жидкости была разработана эмпирическая методика, позволяющая определить массовую эрозию стального анода за один разряд, которая показала удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными. Для анода из другого материала необходимо использовать эмпирические коэффициенты, которые позволяют уточнить коэффициенты

линейной зависимости массовой эрозии анода от интеграла модуля разрядного тока для разных сплавов по сравнению с идентичным выражением для массовой эрозии анода, изготовленного из стали Ст20. Учет диаметра анода в расчете массовой эрозии, согласно полученной в работе формуле, можно произвести введением уточняющих эмпирических коэффициентов.

Тестирование расчетной методики при параметрах электрогидроимпульсной штамповки показало возможность ее использования для определения массовой эрозии анода при электрическом разряде в воде в более широком диапазоне технологических параметров (отклонение результатов расчета и эксперимента составило 29,2%).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко, А.И., 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов, *Материалы XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах», 19–22 августа 2013*, Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013, с. 3.
2. Гулый, Г.А., Малюшевский, П.П., *Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах*, Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
3. Potocký, S., Saito, N., Takai, O., Needle electrode erosion in water plasma discharge, *Thin Solid Films*, 2009, vol. 518, p. 918.
4. Bonnen, J.J.F., Golovashchenko, S.F., Dawson, S.A. and Mamutov, A.V., Electrode erosion observed in electro-hydraulic discharges used in pulsed sheet metal forming, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, vol. 22, no. 12, p. 3946.
5. Shakirov, Yu.I., Valiev, R.I., Khafizov, A.A., Valiev, R.A., et al., Erosion of electrode metal in the electric discharge under the exposure of the electrolyte stream, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, vol. 669, no. 1, p. 012064.
6. Рыкалин, Н.Н., Зуев, И.В., Углов, А.А., *Основы электронно-лучевой обработки материалов*, М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
7. Лазаренко, Б.Р., Лазаренко, Н.И., Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов. В кн.: *Проблемы электрической обработки материалов*, М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 44.
8. Лазаренко, Б.Р., Городекин, Д.И., Краснолоб, К.Я., Динамическая теория выброса материала электрода коротким электрическим импульсом и закономерности образования ударных кратеров, *ЭОМ*, 1969, № 2, с. 18.
9. Золотых, Б.Н., *Физические основы электроискровой обработки металлов*, М.: Гостехтеориздат, 1953, 108 с.
10. Золотых, Б.Н., Круглов, А.И., Тепловые процессы на поверхности электродов при электроискровой обработке металлов, *Проблемы электрической обработки материалов*, М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 65.
11. Верхотуров, А.Д., Подчерняева, И.А., Коневцов, Л.А., Самсонов Г.В. и Лазаренко Б.Р. – основатели нового научного направления «Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки», *Электрические контакты и электроды*, Киев: ИПМ НАН Украины, 2010, с. 274.
12. Лазаренко, Б.Р., *Физические основы электроискровой обработки металлов*, *Вестник АН СССР*, 1959, т. 29, № 6, с. 49.
13. Поляков, З.И., Исаков, В.М., Исаков, Д.В., Шамин В.Ю., *Электрофизические и электрохимические методы обработки*, Челябинск: ЮУрГУ, 2006, 89 с.
14. Лазаренко, Б.Р., Лазаренко, Н.И., Электроискровой способ обработки металлов, *Вестник машиностроения*, 1947, т. 27, № 1, с. 25.
15. Гулый, Г.А., Малюшевский, П.П., Кривицкий, Е.В., *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта*, М.: Машиностроение, 1977, 320 с.
16. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Mel'kher, Yu.I., Taftai, E.I., et al., Experimental investigation of the pressure waves generated by an electric explosion in a closed volume of a fluid, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 5, p. 475. doi: 10.3103/S1068375518050101.
17. Жекул, В.Г., Поклонов, С.Г., Смирнов, А.П., Макаренко, В.С., Комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости, *Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений*, 2016, № 14, с. 34.
18. Сайт компании North Star High Voltage. <https://www.highvoltageprobes.com/>
19. Горячев, В.Л., Уфимцев, А.А., Ходаковский, А.М., О механизме эрозии электродов при импульсных разрядах в воде с энергией в импульсе  $\approx 1$  кДж, *Письма в ЖТФ*, 1997, т. 23, № 10, с. 25.
20. Артамонов, Б.А., Волков Ю.С., Дрожалов В.И., *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: т. 1. Обработка материалов с применением инструмента*, М.: Высшая школа, 1983, 247 с.
21. Белкин, Г.С., Киселев, В.Я., Эрозия электродов при сильноточных импульсных разрядах, *ЖТФ*, 1966, т. XXXVI, № 2, с. 384.
22. Ткаченко, А.К., Эрозия токопроводящего стержня электрода при высоковольтных импульсных

разрядах в воде. *Тезисы докладов III республиканского научно-технического совещания «Научные основы электрогидравлического эффекта и использование его в машиностроении и металлообработке»*, Николаев, 1973, с. 88.

23. Шмойлова, Р.А., Минашкин, В.Г., Садовникова, Н.А., Шувалова, Е.Б., *Теория статистики*, Под ред. Р.А. Шмойловой, М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с.
24. Минашкин, В.Г., Шмойлова, Р.А., Садовникова, Н.А., Моисейкина, Л.Г., Рыбакова Е.С., *Теория статистики: Учебно-методический комплекс*, М.: Изд. центр ЕАОИ, 2008. 296 с.
25. Жекул, В.Г., Литвинов, В.В., Мельхер, Ю.И., Смирнов, А.П. и др. Погружные электроразрядные установки для интенсификации добычи полезных ископаемых, *Нафтогазова енергетика*, 2017, т. 27, № 1, с. 23.
26. Косенков, В.М., Старков, Н.В., Аврамец, Д.Р., Подобие процессов релаксации напряжений в конструкционных материалах при импульсно-статическом нагружении. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Международная конференция IX Харитоновские тематические научные чтения 12–16 марта 2007 г.*, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007, с. 409.

## Summary

The paper presents the results of experimental studies of the mass value of electrode (anode) erosion during a high-voltage electric discharge in a liquid. The results obtained made it possible to determine the influence of technological parameters and operating conditions of high-voltage electric discharge installations on the mass erosion of an anode. It is noted that with an increase in the specific electrical conductivity of the working fluid and in the length of the interelectrode gap, a decrease in the value of the mass erosion of the anode is observed. Comparison of mass erosion of anodes made of copper, steel, and aluminum showed that among them the steel anode has the highest erosion resistance during an electric discharge in water. Based on the results of the performed experimental studies, an empirical technique was developed that allows to estimate the mass erosion of the anode in one electric discharge in water.

*Keywords:* high-voltage electric discharge in water, electrode erosion, integral of the discharge current module, anode, correlation