

Исследование влияния технологических условий эксплуатации электроразрядных установок на предпробойные характеристики электрического разряда

А. П. Смирнов*, О. В. Хвощан

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина*

*e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2022

После доработки 12.09.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Исследовано влияние параметров рабочей жидкости (гидростатического давления, температуры, удельной электропроводности) и геометрии электродной системы (длины межэлектродного промежутка и неизолированной части анода) на предпробойные характеристики электрического разряда в жидком водном электролите (напряжение и время задержки пробоя) и минимальное зарядное напряжение, которое обеспечивает стабильный высоковольтный пробой межэлектродного промежутка. Исследования показали, что повышение гидростатического давления приводит к увеличению большинства изучаемых характеристик. При повышении удельной электропроводности и температуры наблюдается обратная картина – их уменьшение. Показано отсутствие для рассмотренного диапазона параметров влияния длины межэлектродного промежутка на напряжение пробоя и предпробойное время, а также минимальное зарядное напряжение. Разработан критерий определения зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный высоковольтный пробой водного межэлектродного промежутка и показано, что он может быть применен для проектирования электроразрядного оборудования и выбора технологических режимов работы для оговоренного диапазона параметров.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, зарядное напряжение, напряжение пробоя, время задержки пробоя, стабильный пробой

УДК 537.528

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.5.71>

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный высоковольтный разряд в жидкости в настоящее время нашел широкое применение в различных отраслях промышленности. Под импульсным высоковольтным разрядом в жидкости понимается пробой жидкого промежутка между электродами (анодом и катодом) в результате подачи на анод высокого напряжения. В процессе электрического разряда в определенном объеме (канале разряда) в течение малого промежутка времени образуется высокая плотность энергии и резко повышается давление и температура. В последующем происходит быстрое расширение канала разряда, в результате чего во внешнюю среду излучается волна давления [1], которая может быть использована для различных целей. Так, электрический разряд в жидкости применяется в качестве источника акустических сигналов [2] и для обработки различных материалов [3–5],

используется в медицине [6] и сельском хозяйстве [7]. Очень широко электроразрядные технологии применяются в нефтедобывающей промышленности, в частности для интенсификации добычи нефти и для бурения [8–13].

Основное требование к электроразрядным установкам различного назначения – их стабильная и эффективная работа. Это достигается за счет обеспечения устойчивого пробоя межэлектродного промежутка. Для этого на стадии проектирования необходимо определить зарядное напряжение, которое обеспечивает стабильный и устойчивый электрический разряд в жидкости, то есть стабильный пробой межэлектродного промежутка. При этом стоит разделять понятия зарядного напряжения U_0 и напряжения пробоя U_b (рис. 1). Зарядное напряжение – это напряжение, которое прикладывается к аноду в электродной системе, а напряжение пробоя – это

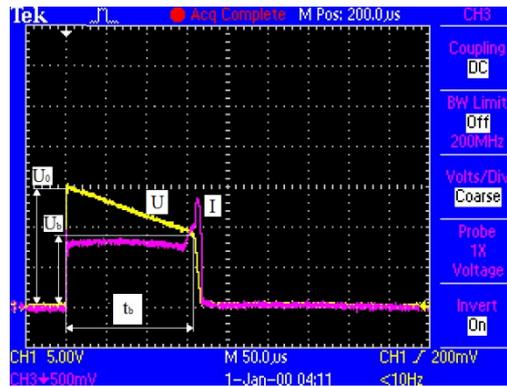


Рис. 1. Осциллограмма разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке: длина межэлектродного промежутка – 24 мм; длина оголенной части – 2 мм; электропроводность жидкости – 0,2 См/м; гидростатическое давление 10 МПа; U – напряжение на разрядном промежутке; I – разрядный ток; U_b – напряжение пробоя, U_0 – зарядное напряжение, обеспечивающее пробой водного промежутка, V ; t_b – время предпробойной стадии, с.

напряжение, при котором осуществляется пробой межэлектродного промежутка. В идеальном случае напряжение пробоя равно зарядному напряжению. Однако в существующих электроразрядных установках обеспечить идеальные условия для пробоя невозможно, а реализуется условие (1):

$$U_b < U_0. \quad (1)$$

Между моментом подачи зарядного напряжения на электродную систему и пробоем межэлектродного промежутка существует предпробойная стадия, во время которой происходит формирование канала разряда [14]. Процесс формирования канала разряда требует затрат энергии, в результате чего происходит падение напряжения – от зарядного напряжения до напряжения пробоя. Длительность предпробойной стадии (t_b , рис. 1) и величина падения напряжения в основном зависят от условий формирования канала разряда.

Электроразрядные установки могут эксплуатироваться в разнообразных условиях, которые диктуются особенностями применения электроразрядных технологий [15]. Это разнообразие условий оказывает влияние на протекание процессов во время предпробойной стадии. Электроразрядное оборудование может применяться в условиях повышенных давлений и температур, при этом удельная электропроводность рабочей жидкости (жидкость, в которой осуществляется электрический разряд) может лежать в широком диапазоне. На предпробойные процессы оказывает влияние и геометрия электродной системы – длина межэлектродного промежутка и длина изолированной части электрода – анода. Следует отметить, что в процессе работы электроразрядного оборудования условия его эксплуатации могут меняться. Так, за счет искровой

эрозии электродов изменяется геометрия электродной системы, а за счет растворения в рабочей жидкости в процессе обработки различных примесей или отложений меняется ее удельная электропроводность. Таким образом, можно выделить две основные группы технологических условий, влияющих на напряжение пробоя и зарядное напряжение: параметры рабочей жидкости (давление, температура и удельная электропроводность) и геометрию электродной системы (длина межэлектродного промежутка, длина изолированной части электрода–анода).

Обобщая все вышесказанное, можно заключить, что исследование влияния технологических условий на характеристики предпробойной стадии электрического разряда в жидкости является актуальной научно-технической задачей.

Данная тематика рассматривалась в работах ученых разных стран мира [11, 12, 15–18]. Так, в работе [16] авторами отмечается, что необходимо разделять понятия «зарядное напряжение» и «напряжение пробоя», особенно это важно для электроразрядных технологий, в которых основным действующим фактором является волна давления. Также авторами представлена зависимость времени задержки пробоя (времени предпробойной стадии) от зарядного напряжения. Показано, что с увеличением зарядного напряжения происходит уменьшение времени задержки пробоя.

Влиянию величины гидростатического давления на предпробойные характеристики было посвящено сразу несколько работ [11, 15, 17, 18]. Так, в работе [11] авторами отмечается, что повышение гидростатического давления приводит к увеличению времени предпробойной стадии. Этот результат подтверждается выводами работы [17]. Там же [17] отмечается,

что повышение зарядного напряжения приводит к уменьшению времени задержки пробоя, подтверждая тем самым заключение, сделанное в работе [16]. В [17] авторы приходят к выводу о взаимосвязи сопротивления канала разряда и времени задержки пробоя – чем выше сопротивление, тем больше время предпробойной стадии. Подобная взаимосвязь сопротивления канала разряда и предпробойных характеристик отмечена также в [18], где также показано, что повышение гидростатического давления приводит к увеличению напряжения пробоя и необходимого для пробоя зарядного напряжения.

В работе [12] исследовалось влияние на предпробойные характеристики удельной электропроводности рабочей жидкости. Полученные результаты показали, что увеличение удельной электропроводности приводит к уменьшению напряжения пробоя и длительности предпробойной стадии. Причем фиксировалось резкое уменьшение длительности предпробойной стадии при увеличении удельной электропроводности до 5 мСм/см. Дальнейшее увеличение удельной электропроводности не приводило к изменению длительности предпробойной стадии. В [15] отмечалось уменьшение напряжения пробоя с повышением электропроводности рабочей жидкости, что согласуется с результатами, представленными в [12]. Также в работе [15] исследовалось влияние гидростатического давления. Полученные результаты свидетельствовали об увеличении значения напряжения пробоя с повышением гидростатического давления.

Выполненный анализ работ по данной тематике показал, что в каждой из них рассматривалось влияние всего нескольких технологических условий (в большинстве работ одного или двух) на характеристики предпробойной стадии. Чаще всего исследовалось влияние удельной электропроводности и гидростатического давления. В некоторых работах была определена прямая взаимосвязь между величинами предпробойных процессов и сопротивлением канала разряда – чем больше сопротивление канала разряда, тем большее напряжение необходимо для пробоя межэлектродного водного промежутка и тем большее время тратится на процесс формирования канала разряда. При этом отсутствуют работы, в которых рассматривалось комплексное влияние на величину характеристик предпробойных процессов двух групп технологических условий – параметров рабочей жидкости и геометрии электродной системы. Проведение подобной работы позволит разработать критерии определения зарядного напряжения электроразрядных уста-

новок для осуществления стабильного электрического разряда в воде.

Учитывая все вышеизложенное, цель данной работы – исследовать влияние технологических условий на характеристики предпробойной стадии и разработать критерий определения зарядного напряжения электроразрядных установок для осуществления стабильного электрического разряда в жидком водном электролите.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде (рис. 2). Оборудование стенда позволяет фиксировать характеристики электрических процессов при высоковольтном пробое водного межэлектродного промежутка при различных технологических условиях [19].

Экспериментальный стенд по выполняемым функциям условно можно разбить на три части: энергетическую, технологическую и измерительную. Энергетическая часть стенда (рис. 2) состоит из оборудования для осуществления высоковольтного электрического разряда. С помощью регулировочного трансформатора (1) через выпрямитель–трансформатор (2) и зарядное сопротивление (8) (для ограничения тока зарядки) происходит зарядка батареи импульсных конденсаторов (4) до необходимого значения высоковольтного напряжения. После достижения данного напряжения запускается воздушный разрядник (5) и осуществляется электрический разряд в разрядной камере высокого давления (7). Также в энергетическую часть входит пульт управления (3) с блоком поджига (6), который позволяет осуществить электрический разряд при фиксированном значении напряжения. Емкость разрядного контура в данной работе получена путем параллельного соединения двух высоковольтных конденсаторов типа ИКУ-50-1 и составляет 2,47 мкФ. Индуктивность разрядного контура 0,9 мкГн. Эти параметры близки к эксплуатационным параметрам некоторого электроразрядного оборудования, в частности электроразрядных устройств для декольматации скважин типа «Скиф» [13]. Рабочее напряжение данного оборудования до 30 кВ, поэтому для соответствия экспериментальных исследований реальным технологиям это значение напряжения было принято максимально возможным: если не было высоковольтного пробоя при достижении

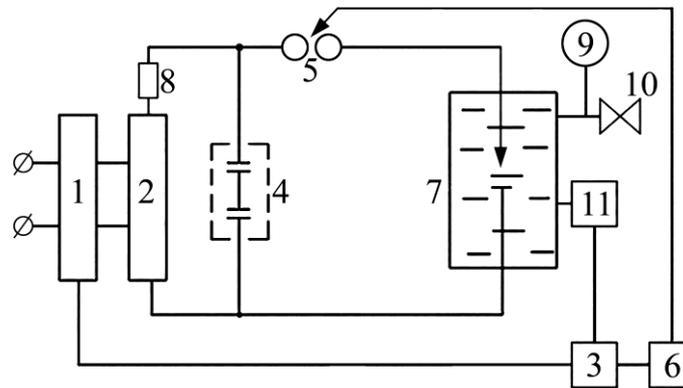


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда: 1 – регулировочный трансформатор РТТ 25/0,5; 2 – высоковольтный трансформатор–выпрямитель ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – камера высокого давления; 8 – зарядное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

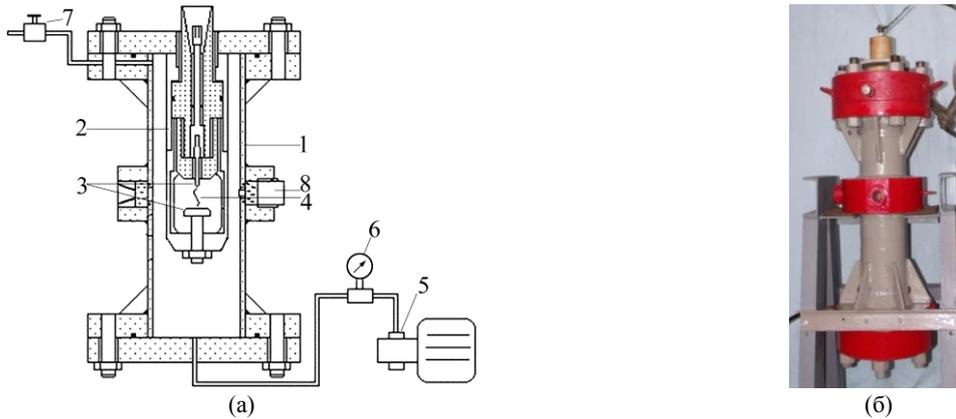


Рис. 3. Принципиальная схема технологической части испытательного стенда (а) и внешний вид (б): 1 – разрядная камера высокого давления; 2 – электродная система «Скифф»; 3 – электроды; 4 – канал разряда; 5 – насос высокого давления; 6 – манометр; 7 – система сброса давления; 8 – технологическое отверстие для установки дополнительной регистрирующей аппаратуры.

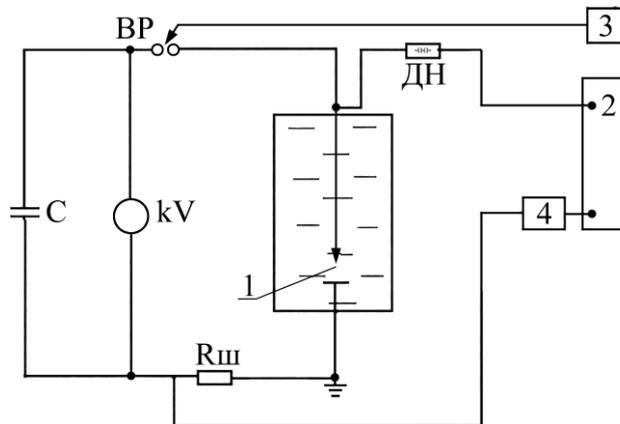


Рис. 4. Схема измерений характеристик разряда: С – емкость накопительной батареи импульсных высоковольтных конденсаторов; kV – киловольтметр; ВР – воздушный разрядник; Rш – коаксиальный шунт; ДН – делитель напряжения; 1 – разрядный промежуток; 2 – осциллограф; 3 – блок поджига разрядника; 4 – блок ограничения сигнала шунта.

напряжения 30 кВ, дальнейшее повышение напряжения не осуществлялось.

Основу технологической части (рис. 2) составляет разрядная камера высокого давления (7) с внутренним диаметром 0,12 м. Помимо камеры в технологическую часть входит оборудование для обеспечения и контроля в ней гидростатического давления: манометр (9), клапан (10), насос высокого давления с электроприводом (11).

На рис. 3а представлена более подробная принципиальная схема технологической части испытательного стенда. С помощью насоса высокого давления (5) в разрядной камере (1) создается необходимое гидростатическое давление, уровень которого фиксируется манометром (6). Соединение энергетической и технологической частей осуществляется с помощью коаксиального высоковольтного кабеля (на рис. 3а не показан). По кабелю импульс



Рис. 5. Внешний вид электродной системы, которая использовалась в экспериментальных исследованиях.

высокого напряжения подается на электродную систему (2), в результате чего между электродами (3) возникает электрический разряд (4). По окончании эксперимента гидростатическое давление в камере сбрасывается с помощью системы сброса давления (7). В камере предусмотрено технологическое отверстие (8) для установки дополнительной аппаратуры, например, датчика давления. До поднятия в камере гидростатического давления при необходимости возможен нагрев воды непосредственно в камере высокого давления. Для этого используется термоэлектрический нагреватель.

Внешний вид подготовленной к электрическому разряду камеры высокого давления представлен на [рис. 3б](#).

Проведение экспериментальных исследований предполагало измерение разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке. Для этого использовался коаксиальный омический шунт (разработан в ИИПТ НАН Украины) [20] и делитель напряжения NorthStar PVM-2. На [рис. 4](#) представлена схема измерений электрических характеристик разряда. Для регистрации сигналов использовался цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS 2024B.

В экспериментах использовалась электродная система типа острие–плоскость с анодом радиусом 2 мм и геометрией его конечной части в виде полусферы. Она идентична электродной системе электроразрядного устройства типа «Скиф» ([рис. 5](#)) [13]. Ее особенностью является наличие металлических ребер. При этом расстояние от анода до ребер в несколько раз больше межэлектродного расстояния (расстояния до катода). Соответственно наличие ребер не оказывает существенного влияния на процессы формирования канала разряда.

В ходе экспериментальных исследований определялись характеристики предпробойной

стадии – напряжение пробоя и длительность предпробойной стадии, а также минимальное зарядное напряжение, которое обеспечивает стабильный пробой жидкого межэлектродного промежутка при различных сочетаниях параметров технологических условий: температуры, гидростатического давления, удельной электропроводности рабочей жидкости, длины межэлектродного промежутка и длины изолированной части анода. Под минимальным зарядным напряжением понималось то зарядное напряжение, при котором пробой осуществляется со 100%-й вероятностью.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ПРЕДПРОБОЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ

Исследования влияния гидростатического давления на условия пробоя межэлектродного жидкого промежутка выполнялись со следующими начальными условиями: удельная электропроводность жидкости – 0,2 См/м; длина межэлектродного промежутка – 22 мм; длина оголенной части анода – 2 мм. Гидростатическое давление варьировалось в диапазоне от 0,1 до 20 МПа.

Результаты экспериментальных исследований представлены на [рис. 6–7](#).

Представленные результаты показывают, что с повышением гидростатического давления наблюдается рост необходимого зарядного напряжения конденсаторов (кривая 1, [рис. 6](#)), которое позволит обеспечить гарантированный пробой межэлектродного промежутка. Также с ростом гидростатического давления происходит незначительное повышение напряжения пробоя (кривая 2, [рис. 6](#)), однако нельзя говорить о какой-то тенденции. Точка при нормальном давлении (0,1 МПа) несколько выпадает из

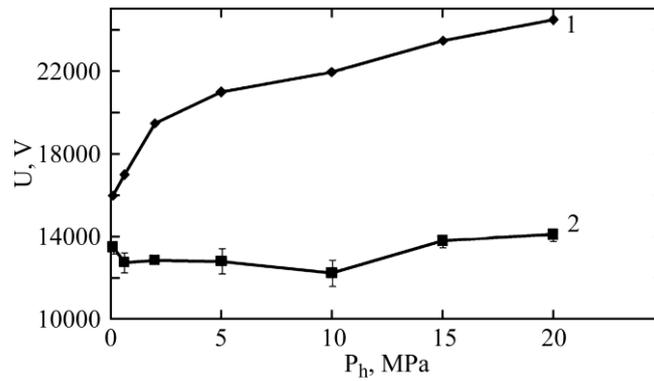


Рис. 6. Зависимость минимального напряжения пробоя U_b (кривая 2) и зарядного напряжения U_0 (кривая 1) от гидростатического давления рабочей среды.

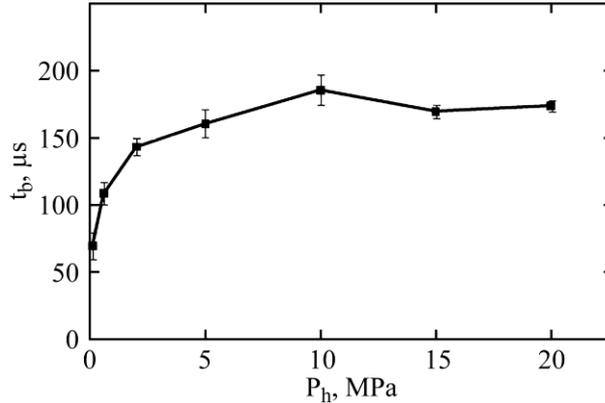


Рис. 7. Зависимость предпробойного времени от гидростатического давления рабочей среды.

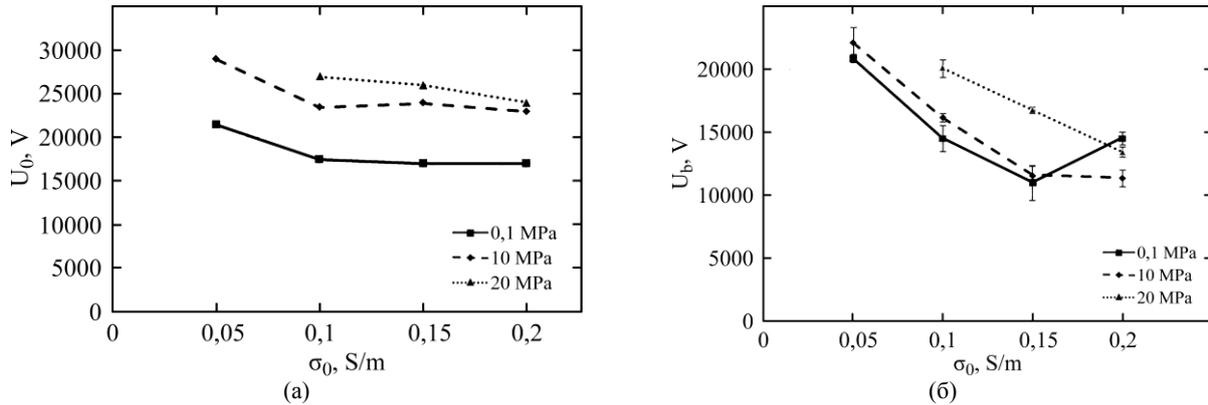


Рис. 8. Влияние удельной электропроводности рабочей жидкости на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее стабильный пробой межэлектродного промежутка (а), и минимальное напряжение пробоя межэлектродного промежутка (б).

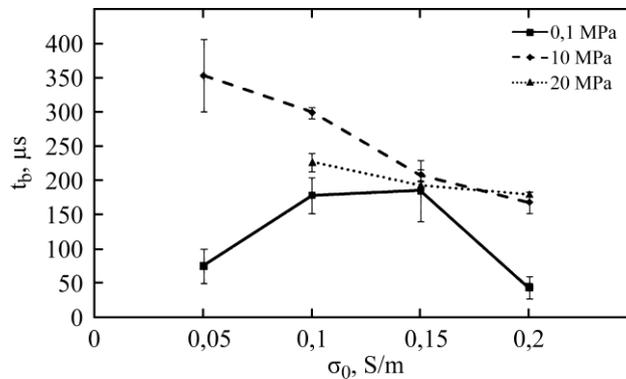


Рис. 9. Влияние удельной электропроводности рабочей жидкости на предпробойное время общей картины (кривая 2, рис. 6). Предположительно это связано с наличием при этом давлении газовых включений, которые искажают общую картину зажигания и пробоя межэлектродного промежутка, тем самым влияя на изменяемые характеристики. В дальнейшем на таких результатах внимание акцентироваться не будет. Исследования влияния гидростатического давления на длительность предпробойной стадии (рис. 7) показало, что при повышении

гидростатического давления до 10 МПа наблюдается существенный рост предпробойного времени. Последующее повышение гидростатического давления не приводит к изменению данной временной характеристики. Полученные результаты качественно согласуются с данными, приведенными в работах [11, 15, 17, 18].

Исследование влияния на предпробойные характеристики величины удельной электропроводности рабочей жидкости выполнялись в диапазоне от 0,05 до 0,2 См/м при следующих начальных условиях: длина межэлектродного промежутка – 24 мм; длина оголенной части анода – 2 мм. Гидростатическое давление рабочей жидкости принималось 0,1; 10 и 20 МПа. Полученные результаты приведены на рис. 8–9. Следует отметить, что при 0,05 См/м и 20 МПа пробоя не было.

Результаты исследований свидетельствуют, что с ростом величины удельной электропроводности от 0,05 до 0,2 См/м при повышенных гидростатических давлениях наблюдается снижение напряжения пробоя (рис. 8б), величины зарядного напряжения, обеспечивающего стабильный пробой водного промежутка (рис. 8а), и длительности предпробойной стадии (рис. 9). В целом полученные результаты качественно согласуются с результатами других авторов, которые приведены в работах [12, 15].

Экспериментальные исследования влияния температуры рабочей жидкости на исследуемые характеристики выполнялись при следующих начальных условиях: длина межэлектродного промежутка – 24 мм; длина неизолированной части анода – 2 мм; начальная электропроводность жидкости (при 17 °С) – 0,1 См/м. Температура варьировалась в диапазоне от 17 до 97°С при трех значениях гидростатического давления 0,1; 10 и 20 МПа.

Полученные результаты (рис. 10 и 11) свидетельствуют, что увеличение температуры приводит к уменьшению минимального зарядного напряжения, а при повышенных гидростатических давлениях – и к уменьшению напряжения пробоя (рис. 10). Из этих данных также следует, что при нормальном давлении влияние температуры на напряжение пробоя отсутствует. Повышение температуры рабочей среды также приводит к уменьшению времени предпробойной стадии (рис. 11). Влияние температуры на предпробойные характеристики связано с изменением величины удельной электропроводности рабочей жидкости при ее нагреве, так как известно, что электропроводность воды увеличивается с ростом ее температуры [21, 22].

Результаты исследований, которые приведены на рис. 6–11, подтверждают вывод, сделанный в работах [17, 18], о взаимосвязи сопротивления канала разряда с предпробойными характеристиками. Так, повышение гидростатического давления вызывает увеличение сопротивления канала разряда, что в свою очередь приводит к увеличению длительности предпробойной стадии, росту необходимого для осуществления пробоя зарядного напряжения и напряжения пробоя. Как известно, удельная электропроводность – это величина, обратная сопротивлению. Поэтому, увеличивая удельную электропроводность жидкости либо за счет растворения в водном электролите солей, либо за счет нагрева, мы тем самым уменьшаем сопротивление жидкой среды. Это приводит к уменьшению длительности предпробойной стадии, напряжения пробоя и зарядного напряжения, при котором осуществляется пробой водного межэлектродного промежутка.

Данные по влиянию удельной электропроводности и температуры были приведены при трех уровнях гидростатического давления – 0,1; 10 и 20 МПа. Качественно они подтверждают результаты, которые показаны на рис. 6–7. Так, из рис. 8а и 10б видно, что большему гидростатическому давлению соответствует большее зарядное напряжение, обеспечивающее стабильный пробой. Эта же тенденция сохраняется и для напряжения пробоя (рис. 8б и 10а): чем выше гидростатическое давление, тем больше значение напряжения пробоя. Однако при достижении определенного значения (температура более 65 °С и удельная электропроводность более 0,15 См/м) влияние гидростатического давления становится менее выраженным и не имеет четкой тенденции. Что касается времени предпробойной стадии, то все значения при гидростатическом давлении 0,1 МПа лежат ниже значений для повышенных гидростатических давлений (кроме одной точки на рис. 11, выбивающейся из общей тенденции, – объяснение этому было приведено выше). Различия между временем задержки пробоя при 10 и 20 МПа не существенны, о чем свидетельствуют данные рис. 7, 9 и 11.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРЕДПРОБОЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ

При исследовании взаимосвязи геометрии электродной системы и предпробойных характеристик рассматривалось влияние двух параметров – длины межэлектродного проме-

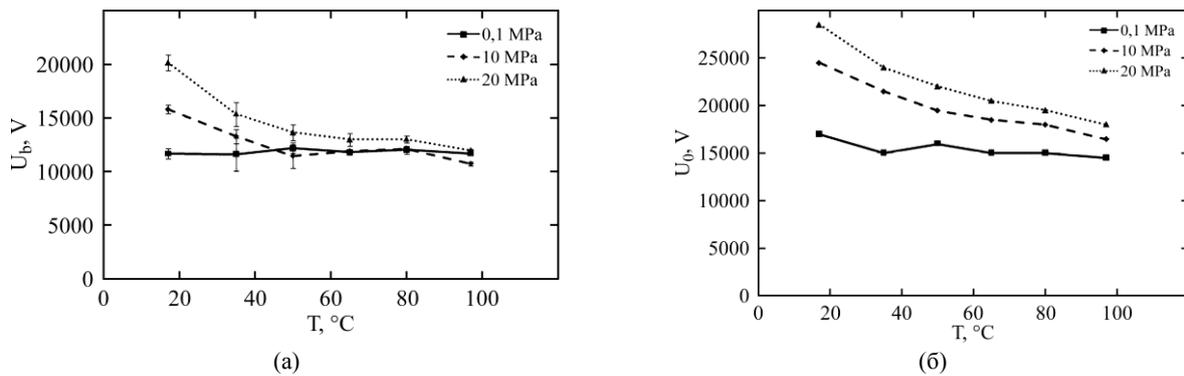


Рис. 10. Влияние температуры рабочей жидкости на минимальное зарядное напряжение (б), обеспечивающее стабильный пробой межэлектродного промежутка, и минимальное напряжение пробоя (а) межэлектродного промежутка.

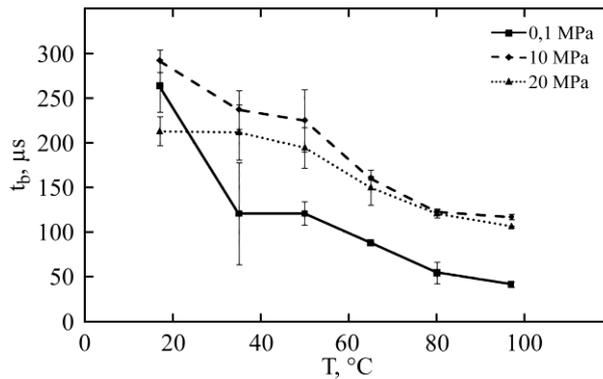


Рис. 11. Влияние температуры рабочей жидкости на предпробойное время.

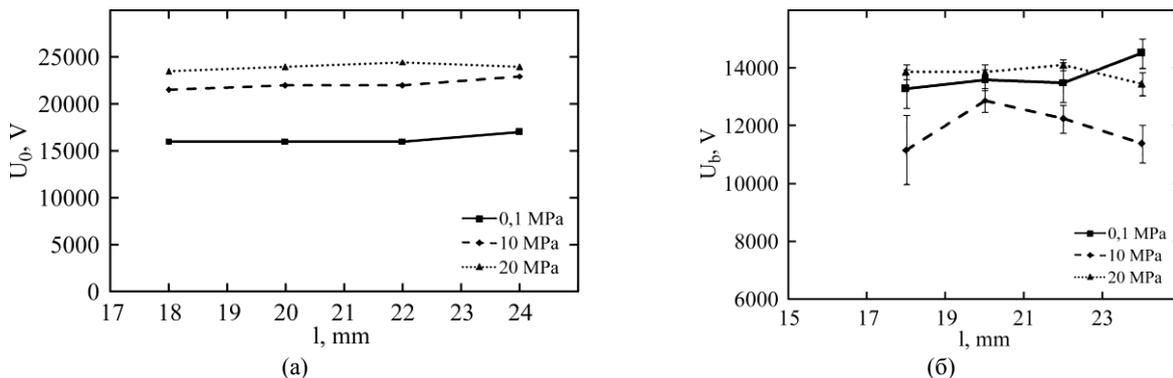


Рис. 12. Влияние длины межэлектродного промежутка на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее стабильный пробой межэлектродного промежутка (а), и минимальное напряжение пробоя межэлектродного промежутка (б).

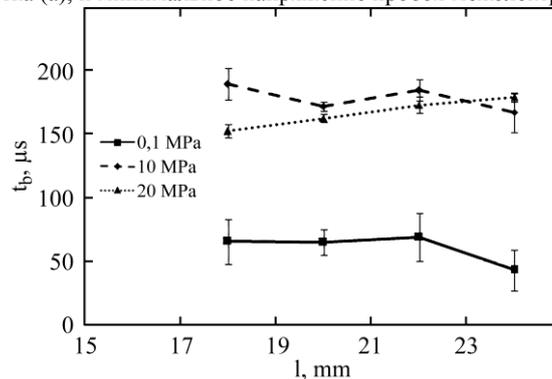


Рис. 13. Влияние длины межэлектродного промежутка на предпробойное время

жутка и длины неизолированной части электрода-анода.

Исследование влияния длины межэлектродного промежутка на предпробойные характеристики при трех значениях гидростатического давления (0,1; 10; 20 МПа) и следующих начальных параметрах: удельная электропровод-

ность жидкости – 0,2 См/м; длина оголенной части анода – 2 мм. Длина межэлектродного промежутка варьировалась от 18 до 24 мм с шагом 2 мм. Результаты, полученные на трех уровнях гидростатического давления, приведены на рис. 12 и 13. Они показывают, что изменение длины межэлектродного промежутка в заданных

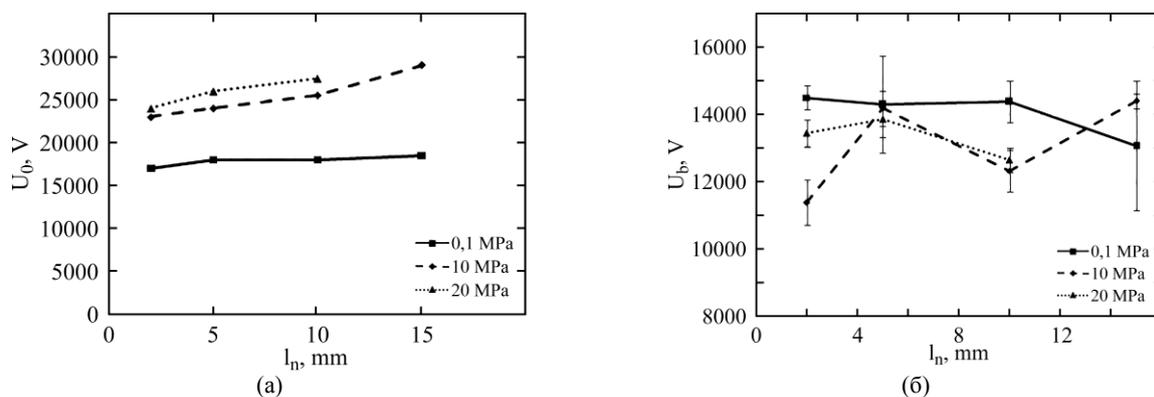


Рис. 14. Влияние длины неизолированной части анода на минимальное зарядное напряжение (а), обеспечивающее стабильный пробой межэлектродного промежутка, и минимальное напряжение пробоя межэлектродного промежутка (б).

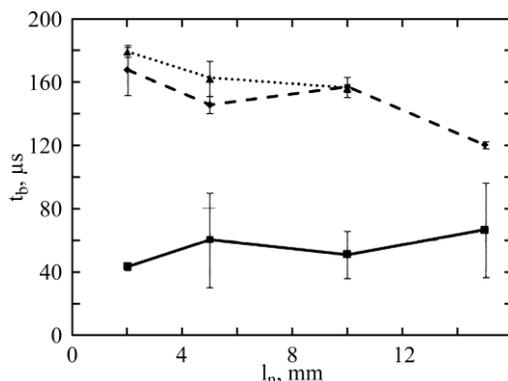


Рис. 15. Влияние длины неизолированной части анода на предпробойное время.

пределах не оказывает влияния на исследуемые характеристики: минимальное напряжение пробоя (рис. 12б), минимальное зарядное напряжение, его обеспечивающее (рис. 12а), время предпробойных процессов (рис. 13).

Исследование влияния неизолированной части анода на исследуемые характеристики проводилось в воде с удельной электропроводностью 0,2 См/м, длиной межэлектродного промежутка 24 мм и при трех значениях гидростатического давления: 0,1; 10; 20 МПа. Длина неизолированной части анода изменялась в диапазоне от 2 мм до 15 мм.

Полученные результаты, которые представлены на рис. 14 и 15, позволяют сделать вывод, что увеличение длины неизолированной части анода приводит к увеличению потерь энергии на предпробойной стадии разряда, а следовательно, к повышению величины зарядного напряжения, необходимого для обеспечения стабильного пробоя (рис. 14а). Одновременно с этим результаты исследований показали отсутствие ярко выраженной зависимости величины напряжения пробоя от длины неизолированной части анода (рис. 14б). При повышенных гидростатических давлениях наблюдается тенденция к уменьшению предпробойного времени с увеличением длины неизолированной части анода (рис. 15). При нормальном давлении отмечается обратная картина – рост

длительности предпробойного времени с увеличением длины неизолированной части анода.

Анализируя результаты, приведенные на рис. 12–15, с точки зрения влияния гидростатического давления на предпробойные характеристики, можно заключить, что они подтверждают ранее сделанные выводы по зарядному напряжению и длительности предпробойной стадии. Что касается напряжения пробоя, то экспериментальные результаты получены при удельной электропроводности 0,2 См/м, когда, как отмечено выше, влияние гидростатического давления не имеет четко выраженной тенденции.

КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СТАБИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ

При проектировании электроразрядного оборудования одной из главных задач является определение зарядного напряжения, которое при технологических условиях эксплуатации оборудования обеспечит стабильный пробой жидкого межэлектродного промежутка. В данной работе будет разработан критерий определения зарядного напряжения электроразрядных установок для осуществления стабильного электрического разряда в воде. Как известно, критерий – это признак, на основании которого

производится оценка, определение, классификация исследуемого явления [23]. В данном случае разработанный критерий позволит определить минимально допустимый уровень зарядного напряжения, который обеспечит непрерывную работу электроразрядного оборудования за счет стабильного высоковольтного пробоя жидкого межэлектродного промежутка.

Как было сказано выше, каждая электроразрядная технология характеризуется определенными условиями эксплуатации. Поэтому при разработке критерия желательна привязка к конкретному электроразрядному оборудованию с учетом особенностей его эксплуатации. В данной работе будут разрабатываться критерии для электроразрядного оборудования декольматации скважин типа «Скиф» [13]. Данное оборудование эксплуатируется в условиях повышенных гидростатического давления и температуры, при этом удельная электропроводность рабочей жидкости может находиться в широком диапазоне значений. В процессе работы оборудования в связи с искровой эрозией электрода–анода происходит увеличение межэлектродного промежутка и соответственно длины неизолированной части анода. Длина межэлектродного промежутка, которая устанавливается при обработке скважин, лежит в диапазоне от 18 до 24 мм. Результаты исследования (рис. 12а) показали, что изменение длины межэлектродного промежутка в этом диапазоне не оказывает влияния на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее стабильный пробой. Учитывая все вышесказанное, при разработке критериев определения зарядного напряжения электроразрядных установок для декольматации скважин необходимо учитывать влияние на предпробойные характеристики следующих параметров: длины неизолированной части анода, электропроводности и температуры рабочей жидкости, величины гидростатического давления.

При разработке критерия для каждого из условий нужно построить графические зависимости (типовая приведена на рис. 16а). Эта зависимость является границей и разбивает двумерное пространство на две области: область, где будет осуществляться пробой водного межэлектродного промежутка (область *breakdown*, рис. 16а), и область, где пробоя не будет (область *no breakdown*, рис. 16а).

Границу этой области можно представить математически (2):

$$U_{0(\text{проб})} = f(A_i), \quad (2)$$

где A_i – параметр, оказывающий влияние на минимальное напряжение пробоя (на рис. 16а приведен частный случай для $U_{0(\text{проб})} = f(P_h)$).

В этом случае для осуществления пробоя должно выполняться условие (3):

$$U_{0(\text{проб})} \geq f(A_i). \quad (3)$$

Когда же напряжение зависит от i параметров, условие (3) превращается в систему условий (4):

$$U_{0(\text{проб})} \geq \max \begin{pmatrix} f(A_1) \\ f(A_2) \\ \dots \\ f(A_i) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Только при соблюдении всех условий выражения (4) мы можем утверждать, что произойдет пробой водного межэлектродного промежутка. Таким образом, задача сводится к нахождению граничного условия для каждого технического условия, в нашем случае их будет четыре.

Для разработки критерия были использованы экспериментальные данные из предыдущего раздела по влиянию технологических условий (параметров рабочей жидкости и геометрии электродной системы) на зарядное напряжение, обеспечивающее стабильный пробой водного промежутка. Выбор типа зависимости (например, степенной или линейной) будет осуществлен по коэффициенту достоверности аппроксимации (R^2) экспериментальной зависимости, то есть будет выбран тип зависимости с большим значением R^2 .

Влияние гидростатического давления на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее пробой, показано на рис. 16б. В электроразрядном оборудовании для обработки скважин типа «Скиф» [13] используется электродная система закрытого типа, которую можно эффективно эксплуатировать при гидростатическом давлении свыше 1,8 МПа [24]. В связи с этим, а также принимая во внимание то, что глубина нефтяных скважин больше 200 м, при разработке критерия будут учитываться данные, полученные на гидростатических давлениях больше 2 МПа. На рис. 16б приведена линия тренда линейного вида с коэффициентом достоверности аппроксимации ($R^2 = 1$), которая может быть использована в виде первого уравнения критерия (5):

$$U_{0(\text{проб})} \geq 268,8P_h + 19304,9, \quad (5)$$

где P_h – гидростатическое давление, МПа.

Аналогично рассмотрим влияние температуры рабочей жидкости. Для этого построим график зависимостей минимального зарядного напряжения, обеспечивающего стабильный пробой, от температуры рабочей жидкости (рис. 17а) для разных уровней гидростатического

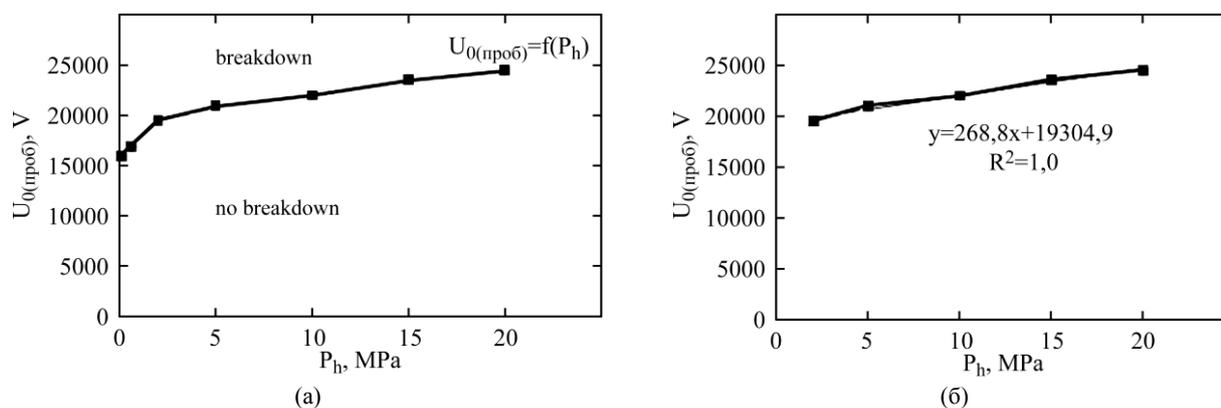


Рис. 16. Влияние гидростатического давления на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее пробой водного межэлектродного промежутка.

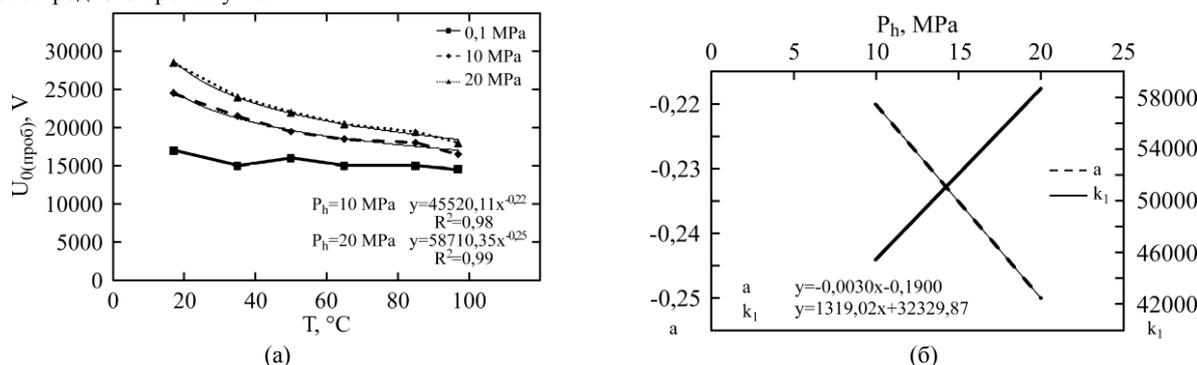


Рис. 17. Влияние температуры окружающей среды на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее пробой водного межэлектродного промежутка, (а) и график зависимостей линейных коэффициентов от гидростатического давления (б).

давления. На рис. 17а приведены также линии тренда с коэффициентами достоверности аппроксимации для гидростатического давления 10 и 20 МПа (график для гидростатического давления 0,1 МПа приведен только для информации и, как было сказано выше, в дальнейшем не учитывается). Полученные данные свидетельствуют, что зависимость минимального зарядного напряжения от температуры лучше всего представить в виде степенной зависимости (6):

$$U_{0(\text{проб})2} = k_1 T^a. \quad (6)$$

Будем считать (исходя из данных, представленных на рис. 17а), что коэффициенты k_1 и a зависят от гидростатического давления. Графики, приведенные на рис. 17б, показывают, что эта зависимость носит линейный характер. Здесь же представлены линии тренда и дана их математическая интерпретация.

С учетом данных, приведенных на рис. 17б, выражение для второго критериального условия приобретет вид (7):

$$U_{0(\text{проб})2} \geq (1319,02P_h + 32329,87)T^{(-0,003P_h - 0,19)}, \quad (7)$$

где P_h – гидростатическое давление, МПа.

На следующем шаге выведем критерий для разных значений длины неизолированной части анода. На рис. 18а для повышенных гидростатических давлений приведен график зависимостей

минимального зарядного напряжения, обеспечивающего пробой, от длины неизолированной части анода, а также соответствующие им линии тренда и коэффициенты достоверности аппроксимации.

Как видно из данных, представленных на рис. 18а, зависимость минимального зарядного напряжения, обеспечивающего пробой, от неизолированной части анода носит линейный характер и ее можно представить в виде (8):

$$U_{0(\text{проб})3} = k_2 l_n + B. \quad (8)$$

Считаем, что коэффициенты k_2 и B линейно зависят от величины гидростатического давления, тогда эту зависимость можно описать линейными уравнениями, которые представлены на рис. 18б.

С учетом данных, приведенных на рис. 18б, критериальное выражение приобретет вид:

$$U_{(\text{проб})3} \geq (-2,55P_h + 474,49)l_n + (165,05P_h + 20132,65), \quad (9)$$

где P_h – гидростатическое давление, МПа.

На рис. 8а приведена зависимость минимального зарядного напряжения, обеспечивающего пробой межэлектродного водного промежутка, от удельной электропроводности жидкости. При 20 МПа и 0,05 См/м в диапазоне исследуемых напряжений (до 30 кВ) пробой не осуществлялся. Поэтому при разработке

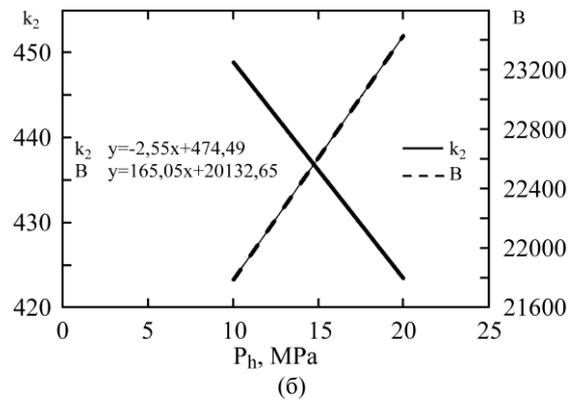
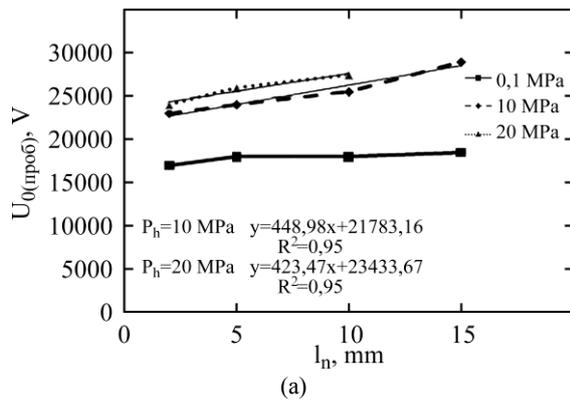


Рис. 18. Влияние длины неизолированной части анода на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее пробой водного межэлектродного промежутка, (а) и график зависимостей линейных коэффициентов от гидростатического давления (б).

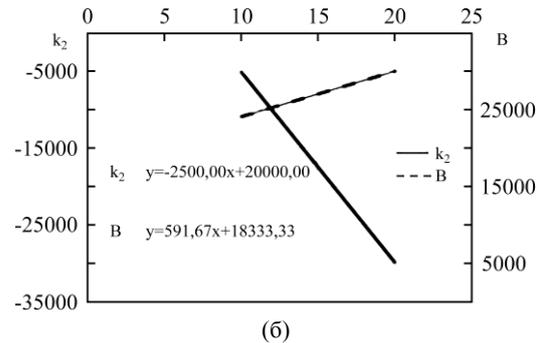
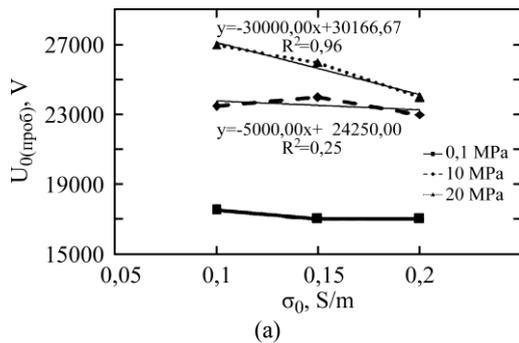


Рис. 19. Влияние удельной электропроводности рабочей жидкости на минимальное зарядное напряжение, обеспечивающее пробой водного межэлектродного промежутка, (а) и график зависимостей линейных коэффициентов от гидростатического давления (б).

критерия нами был рассмотрен диапазон удельных электропроводностей от 0,1 до 0,2 См/м (см. рис. 19а). Зависимость минимального зарядного напряжения от удельной электропроводности в исследуемом диапазоне имеет линейный характер, что математически можно выразить в виде выражения (8).

Считаем, что коэффициенты k_2 и B линейно зависят от величины гидростатического давления, их математические выражения представлены на рис. 19б. С учетом данных, приведенных на рис. 19б, критериальное выражение приобретет вид:

$$U_{(проб)4} \geq (-2500P_h + 20000)\sigma_0 + (591,67P_h + 18333,3). \quad (10)$$

С учетом полученных уравнений (5), (7), (9), (10) система критериальных выражений (4) приобретает вид

$$U_{(проб)} \geq \max \left(\begin{array}{l} 268,8P_h + 19304,9 \\ (1319,02P_h + 32329,87)T^{(-0,003P_h - 0,19)} \\ (-2,55P_h + 474,49)l_n + (165,05P_h + 20132,65) \\ (-2500P_h + 20000)\sigma_0 + (591,67P_h + 18333,3) \end{array} \right). \quad (11)$$

Данная система критериальных выражений может быть использована для определения величины зарядного напряжения, которое обеспе-

чивает стабильный пробой водного промежутка в электродной системе типа острие–плоскость с радиусом анода 2 мм в следующих диапазонах технических условий: гидростатическое давление – от 2 до 20 МПа; удельная электропроводность жидкости – от 0,1 до 0,2 См/м; температура рабочей жидкости – от 17 до 97 °С; длина межэлектродного промежутка – от 18 до 24 мм; длина неизолированной части анода – от 2 до 15 мм.

Была выполнена экспериментальная проверка критерия (11). Для этого сравнивались экспериментально полученные данные по минимальному зарядному напряжению, обеспечивающему стабильный пробой со значениями, которые были получены с помощью системы критериальных выражений (11). Полученные результаты показали, что рассчитанное с помощью критерия зарядное напряжение во всех случаях больше экспериментального минимального зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный пробой. Расхождение экспериментальных и расчетных значений составляет менее 33%. Соответственно система критериальных выражений (11) позволяет определить зарядное напряжение, которое обеспечивает стабильный высоковольтный пробой водного промежутка и может быть использовано при проектировании электро-

разрядного оборудования и выборе технологических режимов работы в оговоренном диапазоне параметров.

ВЫВОДЫ

Выполненные экспериментальные исследования влияния технологических условий на характеристики предпробойной стадии позволили установить, что повышение гидростатического давления рабочей жидкости до 20 МПа приводит к увеличению необходимого зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный пробой водного промежутка. Также при повышении гидростатического давления до 10 МПа происходит резкий рост длительности предпробойной стадии разряда, при этом последующее повышение давления до 20 МПа не оказывает существенного влияния на данную характеристику.

Повышение температуры или увеличение удельной электропроводности рабочей жидкости приводит к уменьшению напряжения пробоя, длительности предпробойной стадии и минимальной величины зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный пробой, при этом влияние температуры на предпробойные характеристики опосредовано связано с изменением величины удельной электропроводности рабочей жидкости при ее нагреве. Полученные результаты свидетельствуют о прямой взаимосвязи предпробойных характеристик разряда с сопротивлением его канала.

Увеличение длины неизолированной части анода при рассмотренных в статье параметрах приводит к повышению минимальной величины зарядного напряжения, необходимого для обеспечения стабильного пробоя, а при повышенных гидростатических давлениях наблюдается тенденция к уменьшению предпробойного времени. В данном диапазоне параметров также наблюдается отсутствие влияния длины межэлектродного промежутка на предпробойные характеристики разряда и минимальную величину зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный пробой.

Полученные результаты позволили разработать критерий определения зарядного напряжения, которое обеспечивает стабильный высоковольтный пробой водного межэлектродного промежутка. Данный критерий может быть применен для проектирования электроразрядного оборудования типа «Скиф» и выбора технологических режимов его работы для оговоренного в работе диапазоне параметров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривицкий, Е.В., Шамко, В.В., *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979, 208 с.
2. Liang Qiao, Xiaobing Zhang, Bing Yan, Yang Liu, et al., An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum, *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 9, 095109. doi: 10.1063/5.0064322
3. Titova, Y.V., Stokozenko, V.G. and Maximov, A.I., Application of underwater discharge for modification of cellulose materials, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, vol. 38, no. 4, p. 933. doi: 10.1109/TPS.2010.2042181
4. Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., Milicevic, B., et al., High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste, *Sustainability*, 2021, no. 13, p. 4481. <https://doi.org/10.3390/su13084481>
5. Rizun, A.R., Denisyuk, T.D. and Domershchikova, A.O., Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2017, vol. 53, p. 592. <https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
6. Mitsuhiro Sato, Takashi Sakugawa, Tomohiko Yamashita, Nushin Hosano, et al., Effects of voltage and current waveforms on pulse discharge energy transfer to underwater shock waves for medical applications, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2020, vol. 48, no. 7, p. 2639. doi: 10.1109/TPS.2020.2992638
7. Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K., Loncaric, A., et al., Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions, *Plants*, 2021, vol. 10, p. 2137. <https://doi.org/10.3390/plants10102137>
8. Bian, D.C., Yan, D., Zhao, J.C. and Niu, S.Q., Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>
9. Kern Lee, Kyoung-Jae Chung, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, no. 4, 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
10. Kyoung-Jae Chung, Seok-geun Lee, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning, *Curr. Appl. Phys.*, 2015, vol. 15, no. 9, p. 977. doi: 10.1016/j.cap.2015.05.010
11. Yan Bingnana, Zhou Jing, Zhao Liang, Liu Chongxin, et al., Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal, *J. Power Technol.*, 2016, vol. 96, no. 4, p. 261.

12. Zhixiang Cai, Hui Zhang, Kerou Liu, Yufei Chen, et al., Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity, *Energies*, 2020, vol. 13, 5432. doi: 10.3390/en13205432
13. 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.
14. Жекул, В.Г., Хвошан, О.В., Смирнов, А.П., Тафтай Э.И., и др. Анализ и развитие пузырьковой модели стадии формирования высоковольтного пробоя водного промежутка, *Електротехн. Електромехан.*, 2018, № 4, с. 63. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.11
15. Poklonov, S.G., Determination of the breakdown voltage of an aqueous interelectrode gap, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 1, p. 64.
16. Touya, G., Reess, T., Pecastaing, L., Gibert, A., et al., Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2006, vol. 39, no. 24, p. 5236. doi: 10.1088/0022-3727/39/24/021
17. Yan, D., Bian, D.C., Ren, F., Yin, C.Q., et al., Study on breakdown delay characteristics based on high-voltage pulse discharge in water with hydrostatic pressure, *J. Power Technol.*, 2017, vol. 97, no. 2, p. 89.
18. Dong Yan, Decun Bian, Jinchang Zhao, Shaoqing Niu, Study of the electrical characteristics, shock-wave pressure characteristics, and attenuation law based on pulse discharge in water, *Shock Vibrat.*, 2016, 6412309. doi: 10.1155/2016/6412309
19. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Taftai, E.I., Khvoshchan, O.V., et al., Effect of parameters of liquids on amplitudes of pressure waves generated by electric discharge, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 84. doi: 10.3103/S1068375519010149
20. 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.
21. Wei Bai, Lingwei Kong and Aiguo Guo, Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil, *J. Rock Mechan. Geotech. Eng.*, 2013, vol. 5, no. 5, p. 406. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.07.003
22. Thomas Hermans, Frédéric Nguyen, Tanguy Robert and Andre Revil, Geophysical methods for monitoring temperature changes in shallow low enthalpy geothermal systems, *Energies*, 2014, vol. 7, no. 8, p. 5083. doi: 10.3390/en7085083
23. Бородієнко, О., Критерії, показники, рівні сформованості професійної компетентності керівників структурних підрозділів підприємств сфери зв'язку, *Молодь і ринок*, 2017, № 7, с. 109. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mir_2017_7_22
24. Poklonov, S.G., Zhekul, V.G. and Smirnov, A.P., Technique and results of experimental investigations of the influence of the elastic barrier on pressure wave parameters in electric discharge in water, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 5, p. 350. doi: 10.3103/S1068375507050079

Summary

This work deals with the influence of the parameters of the working fluid (hydrostatic pressure, temperature, electrical conductivity) and the geometry of the electrode system (the length of the interelectrode gap and the uninsulated part of the anode) on the pre-breakdown characteristics of an electric discharge in a liquid aqueous electrolyte (breakdown voltage and breakdown delay time) and the minimum charging voltage, which provides a stable high-voltage breakdown of the interelectrode gap. Studies have shown that an increase in the hydrostatic pressure leads to an increase in most of the studied characteristics. At the same time, an increase in the specific electrical conductivity and temperature was observed to lead to their decrease. At the same time, it was suggested that the effect of temperature on the pre-breakdown characteristics is associated with a change in the specific electrical conductivity of the working fluid during its heating. The data obtained showed no effect of the length of the interelectrode gap on the breakdown voltage and its breakdown delay time, as well as the minimum charging voltage. The results of the experimental studies made it possible to develop a criterion for determining the charging voltage, which provides a stable high-voltage breakdown of the water interelectrode gap. Its experimental verification has shown that it can be applied to the design of electric discharge equipment and to the choice of technological modes of operation in the specified range of parameters.

Keywords: high-voltage electric discharge, charging voltage, breakdown voltage, breakdown delay time, stable breakdown