

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ВОДНОГО МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОМЕЖУТКА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

При проектировании и практической работе электротехнических комплексов и установок, использующих высоковольтный электрический пробой (разряд) в жидкости, всегда возникает необходимость в выборе уровня рабочего напряжения установки U_0 (пробивного напряжения $U_{пр}$) для реализации стабильного и эффективного по механическому воздействию [1] разряда в разнообразных условиях, диктуемых особенностями осуществления технологии. К первичным технологическим условиям, влиять на которые не представляется возможным, можно отнести исходную удельную электропроводность рабочей среды (УЭРС) σ_0 и гидростатическое давление $P_{ГС}$ в жидкости. Ко вторичным условиям, возникающим в процессе осуществления разрядов (и соответственно их можно регулировать можно отнести изменяющиеся вследствие эрозии геометрию потенциального электрода и длину межэлектродного промежутка (МП) $l_{МЭ}$, а также электропроводность среды, изменяющуюся вследствие эрозии электродов либо растворения отложений.

Анализ проблемы

Очевидно, что УЭРС – наиболее важный параметр, влияющий как на величину напряжения возникновения первичного лидера на стадии зажигания разряда, так и на необходимый уровень напряжения на электроде на стадии прорастания лидерной системы в межэлектродном промежутке, вплоть до момента перемигания его проводящим каналом [2–7].

Так, исследования [8] показали, что при увеличении УЭРС время зажигания разряда уменьшается, что фактически также означает снижение напряжения зажигания разряда при увеличении УЭРС.

Феноменология лидерной стадии процесса пробоя также претерпевает существенные изменения при увеличении УЭРС: в области малых значений (менее 5×10^{-2} См/м) разряд формируется преимущественно в виде одиночного лидера, перемигающего МП, а в области значений более 5×10^{-2} См/м лидерная система представляет собой разветвленную структуру [2–5]. Каждой пространственной структуре соответствуют характерные скорости распространения лидерной системы вдоль МП: одиночный лидер распространяется со скоростью выше скорости звука в жидкости ($\sim 10^4$ м/с и более), а разветвленная лидерная система – порядка скорости звука.

Указанные особенности протекания каждой из стадий формирования пробоя на практике реализуются в сложной зависимости пробиваемой длины МП $l_{МЭ}$ от УЭРС σ_0 (рис. 1) [3–5].

В соответствии с рис. 1 для каждого конкретного набора электротехнических параметров разрядной цепи существует максимальная длина пробиваемого МП при некоторой оптимальной величине УЭРС $\sigma_{опт}$. При этом область, лежащая под кривой, является областью реализации пробойных разрядов, а область над кривой – областью реализации беспробойных разрядов.

Зависимость, представленная на рис. 1, получена при неизменном уровне зарядного напряжения U_0 на конденсаторной батарее. В данном случае это напряжение являлось также и напряжением пробоя ($U_0 = U_{пр}$), поскольку приводило к пробую МП различной длины при изменяющейся УЭРС.

Если попытаться представить эту зависимость в координатах “напряжение пробоя межэлектродного промежутка $U_{пр}$ ” от “удельной электропроводности жидкости σ_0 ” при неизменной величине МП, то подобная качественная зависимость должна иметь вид, представленный на рис. 2.

Автором были получены экспериментальные зависимости пробивной напряженности от электропроводности воды [9], подобные представленным на рис. 2, однако обоснования этих данных не приведены.

Постановка задачи

В связи с этим цель данной работы – определение и анализ явлений и процессов, влияющих на зависимость пробивного напряжения МП от электропроводности жидкости.

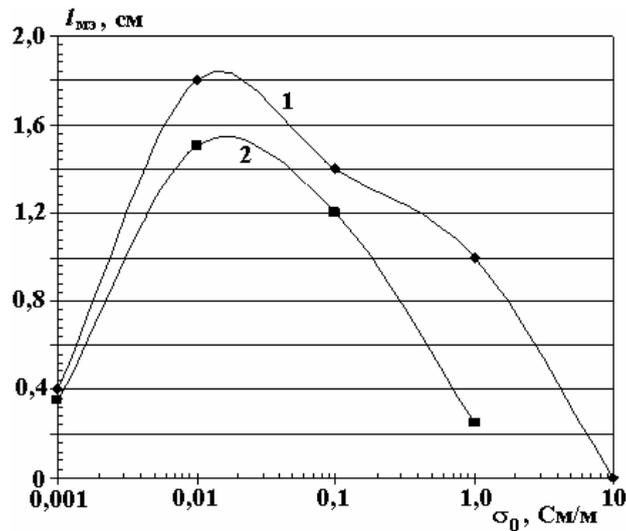


Рис. 1. Зависимость пробиваемого межэлектродного расстояния $l_{MЭ}$ от удельной электропроводности жидкости σ_0 при $U_0=14$ кВ, $C=0,2$ мкФ [4]: 1 – положительная полярность потенциального электрода; 2 – отрицательная полярность потенциального электрода



Рис. 2. Качественная зависимость напряжения пробоя межэлектродного промежутка от удельной электропроводности жидкости

Основная часть

Как уже отмечалось, пробой является результатом реализации двух последовательных, динамически связанных процессов: зажигания разряда и следующего за ним перекрытия МП прорастающей лидерной системой (будем считать, что перекрытие межэлектродного промежутка лидером означает его пробой).

В категориях вероятностей событий связь реализации этих двух стадий разряда с пробоем МП следующая: $P_{\text{пробой}} = P_{\text{зажиг}} \times P_{\text{перекр}}$.

Приведем возможные сценарии реализации событий:

- если произошло зажигание разряда ($P_{\text{зажиг}}=1$), а затем перекрытие МП ($P_{\text{перекр}}=1$), то вероятность события пробоя МП составит $P_{\text{пробой}}=1$;
- если зажигание разряда произошло ($P_{\text{зажиг}}=1$), а перекрытия промежутка не произошло ($P_{\text{перекр}}=0$), то нет и пробоя ($P_{\text{пробой}}=0$);
- если зажигание разряда не произошло ($P_{\text{зажиг}}=0$), то не произойдет и перекрытия промежутка ($P_{\text{перекр}}=0$) и пробоя ($P_{\text{пробой}}=0$).

В категориях характерных напряжений рассмотренная нами схема может быть записана в следующем виде:

$$U_{\text{ПР}} = \max\{U_{\text{ЗАЖ}} ; U_{\text{ПЕР}}\}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – напряжение пробоя межэлектродного промежутка; $U_{\text{ЗАЖ}}$ – напряжение зажигания разряда, то есть напряжение на электроде, обеспечивающее необходимую для зажигания разряда напряженность электрического поля; $U_{\text{ПЕР}}$ – напряжение перекрытия межэлектродного промежутка, то есть напряжение на электроде, обеспечивающее необходимую напряженность электрического поля для прорастания лидера (лидерной системы) на длину межэлектродного промежутка.

Выражение (1) следует понимать так, что величина напряжения $U_{\text{ПР}}$, необходимого для пробоя МП, определяется либо величиной $U_{\text{ЗАЖ}}$, либо величиной $U_{\text{ПЕР}}$, в зависимости от этого требования к ней в каждом конкретном случае максимальны.

Таким образом, в соответствии с предложенным подходом задача определения зависимости напряжения пробоя $U_{\text{ПР}}$ от УЭРС разбивается на две отдельные задачи: определение характеристики напряжения зажигания разряда $U_{\text{ЗАЖ}}$ и определение напряжения перекрытия $U_{\text{ПЕР}}$ межэлектродного промежутка.

1. Методика и результаты исследований напряжения зажигания разряда

Для разработки методики исследований имеет значение выбор разрядной схемы, которая определяет форму импульса напряжения на МП. В приближении к потребностям разрядноимпульсных технологий [10] это разряд емкостного накопителя на водный межэлектродный промежуток, при нем формируется импульс напряжения с крутым передним фронтом и экспоненциально спадающей средней частью, в течение которой организуется пробой МП. Электродная система преимущественно представляет собой конфигурацию “стержень-плоскость”. Стержневой потенциальный электрод имеет цилиндрическую форму с закругленной под полусферу рабочей частью.

Методика исследования напряжения зажигания разряда $U_{\text{ЗАЖ}}$ состояла в подборе такого напряжения зарядки конденсаторной батареи $U_0=U_{\text{ЗАЖ}}$, при котором время зажигания разряда $t_{\text{ЗАЖ}}$ составляло 50 ± 10 мкс (таким образом, на вольт-секундной зависимости зажигания разряда была выбрана одна временная точка). Время зажигания определялось от момента подачи напряжения на электрод до момента появления на нем свечения (по фотограммам), а также до момента интенсивного роста тока (по осциллограммам) [11, 12].

В данной методике напряжение U_0 зарядки конденсаторов изменялось в диапазоне от 15 до 50 кВ; гидростатическое давление в жидкости $P_{\text{ГС}}$ изменялось в диапазоне от 0,1 до 50 МПа.

Межэлектродное расстояние устанавливалось до 50 мм для исключения пробойных разрядов. Поверхность электродов тренировалась большим числом незавершенных разрядов. Для одного набора варьируемых параметров проводилось до 10 реализаций с последующей статистической обработкой данных.

В условиях варьирования УЭРС σ_0 и диаметра цилиндрического электрода (радиус скругления электрода $r_{\text{ЭЛ}}$ составлял от 0,5 до 2,5 мм) происходит изменение сопротивления МП R_0 , что приводит к изменению характеристического времени разряда конденсаторной батареи $\tau_C=R_0C$, где C – емкость конденсаторной батареи. Поддержание значения τ_C (неизменность формы импульса) в диапазоне от 250 до 300 мкс осуществлялось подбором емкости конденсатора C .

Для положительно заряженного электрода в результате исследований были получены зависимости типа $U_{\text{ЗАЖ}}=f(\sigma_0)$ [12] (сплошная линия – эксперимент, штрихпунктирная линия – расчет), графически представленные на рис. 3. Зависимости демонстрируют асимптотическое уменьшение напряжения зажигания при увеличении σ_0 , из чего следует, что существует качественное совпадение хода этих кривых с ходом левой ветви “ab” (до точки экстремума “b” на зависимости рис. 2), а также то, что зависимость $U_{\text{ЗАЖ}}=f(\sigma_0)$ физически не может определять ход правой ветви “bc”.

2. Методика и результаты исследований напряжения перекрытия межэлектродного промежутка

К началу стадии формирования лидерной системы в межэлектродном промежутке напряжение на стержневом электроде, в соответствии с принятой нами схемой воздействия, будет составлять:

$$U_{\text{НЛ}} = U_0 \exp(-t_{\text{дл}} / \tau_C), \quad (2)$$

где $U_{\text{НЛ}}$ – напряжение начальное лидерное, при котором заканчивается стадия зажигания разряда и начинается лидерная стадия процесса; U_0 – начальное напряжение зарядки конденсаторной батареи (поскольку зажигание разряда произошло, то в данном случае $U_0=U_{\text{ЗАЖ}}$); $t_{\text{дл}}$ – долидерное время, то же, что и время зажигания разряда $t_{\text{ЗАЖ}}$.

Например, для напряжения зажигания $U_{\text{ЗАЖ}}$ (кривая 1 рис. 3) соответствующие значения напряжения $U_{\text{НЛ}}$ показаны штрихпунктирной линией (примерно на 15% меньше $U_0=U_{\text{ЗАЖ}}$).

Напряжение $U_{НЛ}$ будет являться напряжением перекрытия МП $U_{ПЕР}$ только в том случае, если оно обеспечит процесс переключения МП лидерным каналом.

Одним из возможных путей решения поставленной задачи определения напряжения перекрытия $U_{ПЕР}$ межэлектродного промежутка (продольных градиентов потенциала лидерного канала $E_{ПРОД}$) является определение длины прорастания лидерной системы $l_{ЛИД}$ (в режимах статической фотосъемки незавершенного разряда) при известном значении $U_{НЛ}$.

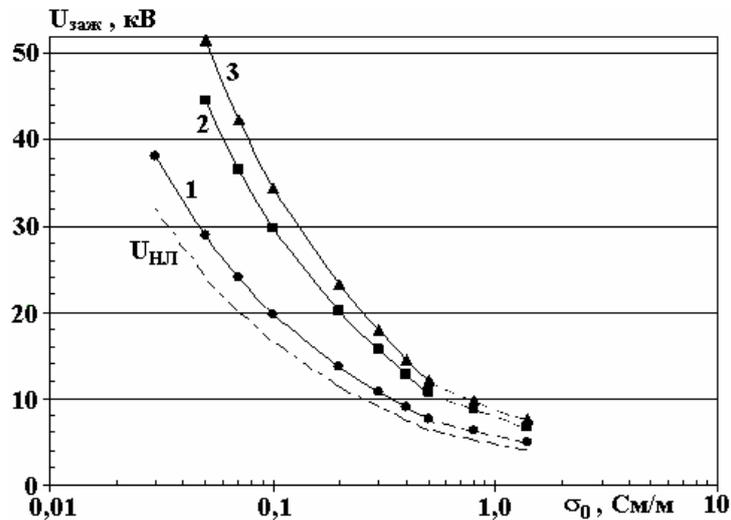


Рис. 3. Зависимость напряжения зажигания разряда $U_{зжж}$ от удельной электропроводности жидкости σ_0 при $r_{ЭЛ}=1,5$ мм (положительное острие): 1 – $P_{ГС} = 0,1$ МПа; 2 – $P_{ГС} = 3$ МПа; 3 – $P_{ГС} = 10$ МПа

В этом случае оценить продольные градиенты потенциала лидерного канала (в целом – лидерной системы) $E_{ПРОД}$ в направлении противоположного электрода можно по выражению

$$E_{ПРОД} = U_{НЛ} / l_{МЭ}, \quad (3)$$

где $U_{НЛ} = U_{ПЕР}$ для межэлектродного промежутка длиной $l_{ЛИД}$; $l_{МЭ} = l_{ЛИД}$ в предположении расположения противоиэлектрода на расстоянии $l_{ЛИД}$.

В нашем случае оптические наблюдения были ограничены возможностями конструкции камеры высокого давления, поэтому данная методика не была использована.

Также в методике определения $U_{ПЕР}$ не совсем удобно учитывать влияние долидерной стадии разряда на величину $U_{НЛ}$, которая бы удовлетворяла условию $U_{НЛ} = U_{ПЕР}$. В идеале это неудобство мог бы снять потенциальный электрод, создающий высокую напряженность электрического поля и обеспечивающий быстрое зажигание разряда. В качестве такого электрода можно использовать тонкое острие (сильно подвержено износу из-за эрозии) либо электрод, представляющий собой металлическую поверхность, полностью покрытую диэлектрической пленкой, с малым сквозным отверстием в ней со стороны противоиэлектрода [13]. В области этого отверстия формируется электрическое поле высокой напряженности, приводящее к зажиганию разряда за микросекунды в широком диапазоне изменения УЭРС. В связи с этим напряжение U_0 будет практически являться для этой схемы напряжением $U_{НЛ}$.

Характерным проявлением высокой эффективности электрода к зажиганию разряда должна быть независимость времени зажигания разряда от гидростатического давления. Однако предварительные исследования показали, что это условие для указанных электродов удовлетворительно выполняется лишь для электропроводности жидкости более 0,77 См/м.

С учетом перечисленных факторов, было принято решение использовать методику исследования 50% пробивного напряжения [7] различных по длине межэлектродных промежутков. Тогда в выражении (3) вместо величины $U_{НЛ}$ была использована характеристика $\Delta U = U_{ПР2} - U_{ПР1}$, равная разнице 50% пробивных напряжений межэлектродных промежутков длиной $l_{МЭ2}$ и $l_{МЭ1}$. А вместо величины $l_{МЭ}$ – величина $\Delta l = l_{МЭ2} - l_{МЭ1}$, равная изменению длины лидерного канала, обусловленного приращением испытательного напряжения на величину ΔU .

В соответствии с данной методикой исследованы 50 % пробивные напряжения для межэлектродных промежутков 25 мм и 45 мм в диапазоне изменения УЭРС от 0,015 до 1,4 См/м, и на основании полученных данных оценены продольные градиенты потенциала лидерного канала.

Как следует из рис. 4, для положительно заряженного электрода $E_{\text{ПРОД}}^{\text{п}}$ монотонно возрастает от 1,3 до 3,7 кВ/см в обозначенных пределах увеличения электропроводности среды. Для сравнения: в литературных источниках приводятся значения для $E_{\text{ПРОД}}^{\text{п}}$ в диапазоне от 2 до 8 кВ/см [7] и от 1 до 2 кВ/см [4], что свидетельствует о корректности полученных оценок.

Для отрицательной полярности электрода оценка дает увеличение $E_{\text{ПРОД}}^{\text{н}}$ от 3 кВ/см до 18 кВ/см при увеличении электропроводности среды от 0,07 См/м до 0,77 См/м (две точки условно соединены штриховой линией 2 на рис. 4).

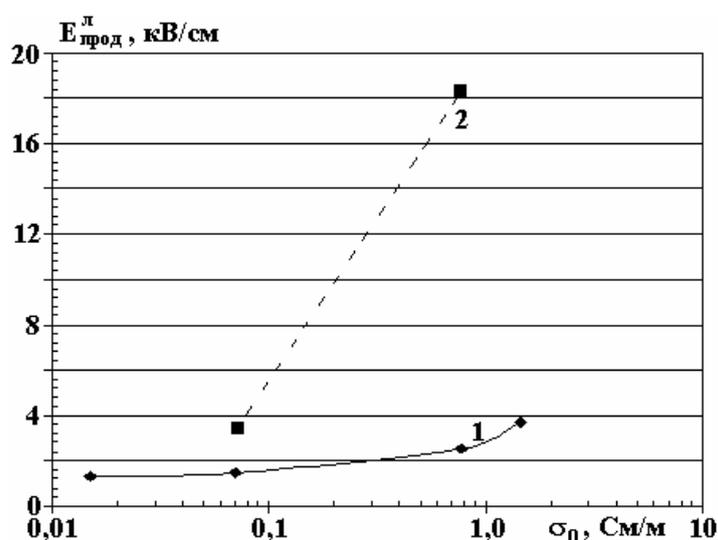


Рис. 4. Зависимость продольных градиентов потенциала лидерного канала от электропроводности рабочей среды: 1 – положительная полярность потенциального электрода; 2 – отрицательная полярность потенциального электрода

Таким образом, имеем выраженную тенденцию увеличения удельной величины напряжения перекрытия (то есть отнесенной к единице длины – продольного градиента потенциала лидерного канала) по мере увеличения электропроводности рабочей среды. Из чего следует, что существует качественное совпадение хода этих кривых с ходом правой ветви “bc” (от точки экстремума “b” на зависимости рис. 2) и что эти кривые физически не могут описывать левую ветвь рассматриваемой зависимости.

Обсуждение результатов

Для пояснения практической значимости выработанного подхода для предварительного анализа и прогноза пробивного напряжения воспользуемся совмещенным графиком характерных напряжений (рис. 5), на котором представлены зависимость $U_{\text{ЗАЖ}}$ и соответствующая ей $U_{\text{НЛ}}$ (из рис. 3), а также зависимости $U_{\text{ПЕР}}$, построенные в соответствии с расчетными данными по выражению

$$U_{\text{ПЕР}} = E_{\text{ПРОД}}^{\text{п}} l_{\text{МЭ}} \quad (4)$$

для нескольких длин межэлектродных промежутков – от 1 до 4 см (для положительного электрода на основании данных рис. 4).

Как следует из анализа представленных данных, для межэлектродных промежутков, меньших и равных 1 см во всем диапазоне рассматриваемых проводимостей среды, напряжение зажигания разряда будет определяющей величиной для значения пробивного напряжения этих промежутков. При увеличении длины межэлектродного промежутка в области повышенных электропроводностей (более 0,5 См/м) напряжение перекрытия превышает напряжение зажигания (фактически – напряжение начальное лидерное $U_{\text{НЛ}}$) и становится определяющим для величины пробивного напряжения данного межэлектродного промежутка.

Из полученных в рамках нашего рассмотрения экспериментальных зависимостей пробивного напряжения МП от электропроводности среды при положительной и отрицательной полярности электродов (рис. 6) следует, что поведение левых ветвей этих кривых соответствует характерным признакам поведения напряжения зажигания разряда: увеличение при повышении гидростатического давления, уменьшение при увеличении электропроводности среды (см. рис. 3). При этом абсолютные значения этих напряжений вблизи точки экстремума составляют единицы киловольт, что становится сравнимым, а при дальнейшем увеличении электропроводности и меньшим, чем напряжение перекрытия МП в данных условиях.

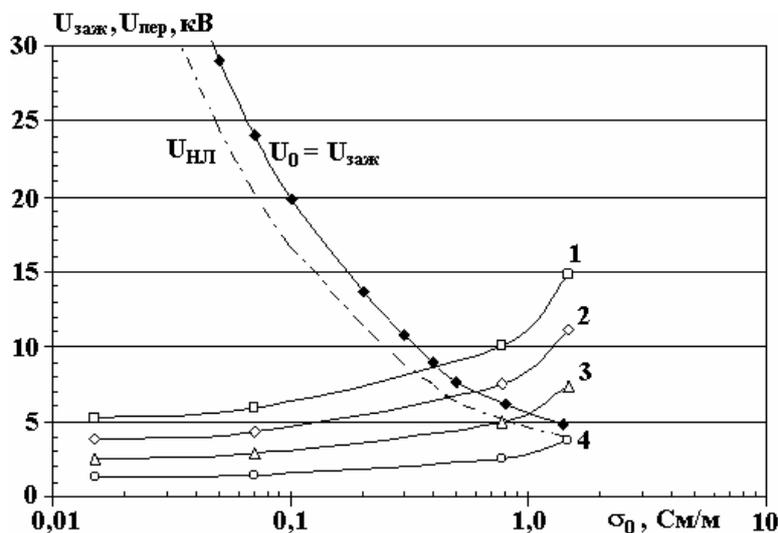


Рис. 5. Зависимости характерных напряжений от электропроводности среды

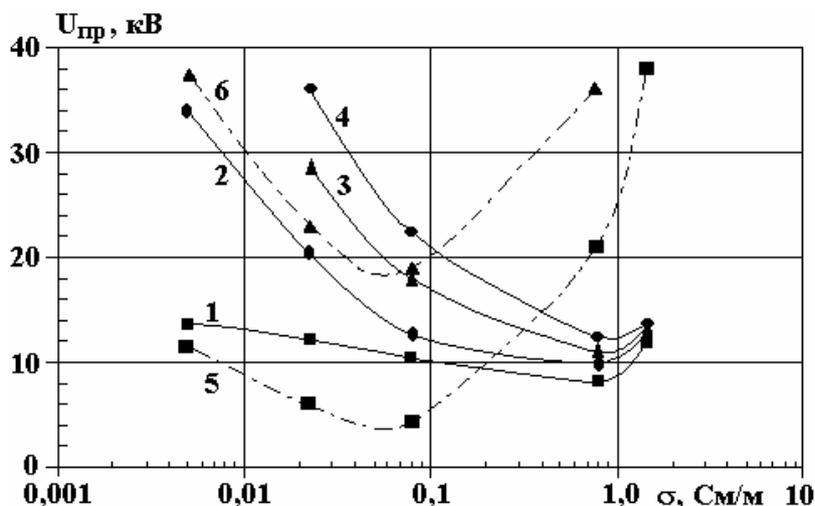


Рис. 6. Зависимость пробивного напряжения от электропроводности среды для $l_{МЭ} = 25$ мм при положительной (1,2,3,4) и отрицательной (5,6) полярности электрода: 1 – $P_{ГС} = 0,1$ МПа; 2 – $P_{ГС} = 5$ МПа; 3 – $P_{ГС} = 10$ МПа; 4 – $P_{ГС} = 30$ МПа; 5 – $P_{ГС} = 0,1$ МПа; 6 – $P_{ГС} = 5$ МПа

Выводы

Таким образом, величина пробивного напряжения $U_{пр}$, необходимого для пробоя межэлектродного промежутка, определяется либо величиной напряжения зажигания разряда $U_{заж}$, либо величиной напряжения перекрытия межэлектродного промежутка $U_{пер}$, в зависимости от того, какие требования к ней в каждом конкретном случае максимальны.

При этом ход левой ветви на зависимости пробивного напряжения $U_{пр}$ межэлектродного промежутка от электропроводности жидкости определяет зависимость напряжения зажигания разряда $U_{заж}$, а правой ветви - зависимость напряжения перекрытия межэлектродного промежутка $U_{пер}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 207 с.
2. *Трофимова Н.Б.* Исследование пробоя недегазированных жидкостей // Пробой диэлектриков и полупроводников. М.-Л.: Энергия, 1964. С. 219–224.
3. *Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Штейнберг А.А.* Некоторые особенности электрического разряда в электролитах // Пробой диэлектриков и полупроводников. М.; Л.: Энергия, 1964. С. 232–235.
4. *Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Стояк М.Ю.* Развитие электрического пробоя в водных электролитах // Пробой диэлектриков и полупроводников. М.; Л.: Энергия, 1964. С. 246–248.
5. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 156 с.
6. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
7. *Ушаков В.Я.* Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Томский ун-т, 1975. 256 с.
8. *Скорых В.В., Жук И.А.* Влияние проводимости на запаздывание зажигания разряда в воде // Теория, эксперимент, практика электроразрядных процессов. Киев: Наукова думка, 1992. С. 15–21.
9. *Трофимова Л.П., Поклонов С.Г., Глушенко В.Ж.* Влияние гидростатического давления на пробой воды в условиях слабонеоднородного электрического поля // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Киев: Наукова думка, 1993. Вып. 1. С. 25–29.
10. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядноимпульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
11. *Поклонов С.Г.* Режимы работы электродной системы электрогидроимпульсного скважинного устройства // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Электроэнергетика и преобразовательная техника”. Харьков, 2003. Т. 1. № 1. С. 154–162.
12. *Поклонов С.Г.* Выбор рабочей среды для электроразрядных погружных установок // Электронная обработка материалов. 2009. № 1. С. 81–87.
13. *Щерба А.А., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г.* Стабилизация режимных параметров высоковольтных систем электрогидроимпульсной обработки жидких неоднородных сред // Технічна електродинаміка. 2004. № 3. С. 23–26.

Поступила 27.10.09

Summary

Characteristics of pre-breakdown and leader stages of high-voltage breakdown of interelectrode gap are studied. It is shown that the level of pre-breakdown voltage is determined either by the value of voltage of discharge ignition, or by the value of overlapping voltage for the interelectrode gap, depending on the fact which requirements are maximum set for the value for each particular case.
