

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ ЭЛЕКТРОДАМИ

*Технический университет Молдовы,  
бул. Штефан чел Маре, 168, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

В последние годы возрос интерес к источникам плазмы, в которых одним из электродов является электролитный электрод. Это связано с перспективностью практических применений этих разрядов в технологии нанесения высококачественных теплозащитных, диэлектрических, антифрикционных и противокоррозионных покрытий.

Исследование зависимости пробивного напряжения от межэлектродного расстояния и других параметров электролитической ячейки проводилось с учетом электрогидродинамических эффектов, возникающих под действием электрического поля на поверхность электролита. Типичные кадры скоростной киносъемки разрядного промежутка при положительной полярности (при отрицательной полярности они аналогичны) электролитного электрода представлены на рис. 1,а–в. В качестве электролитного электрода использовался водный раствор хлористого натрия электропроводностью  $0,2 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , а металлическим электродом служил вольфрамовый стержень с полированной полусферической поверхностью диаметром 2,7 мм.

В предпробивной стадии электрического разряда под действием электрического поля под металлическим электродом происходит подъем электролита, поверхность которого принимает конусообразную форму, и электрический пробой разрядного промежутка осуществляется между электролитным “острием” и металлическим электродом (рис. 1,а).

В определенных пределах электрического напряжения, зависящего от формы и диаметра металлического электрода, величины межэлектродного зазора, подъем жидкости прекращается, поверхность электролита не деформируется и электрический разряд протекает между металлическим электродом и плоской поверхностью электролита (рис. 1,б).

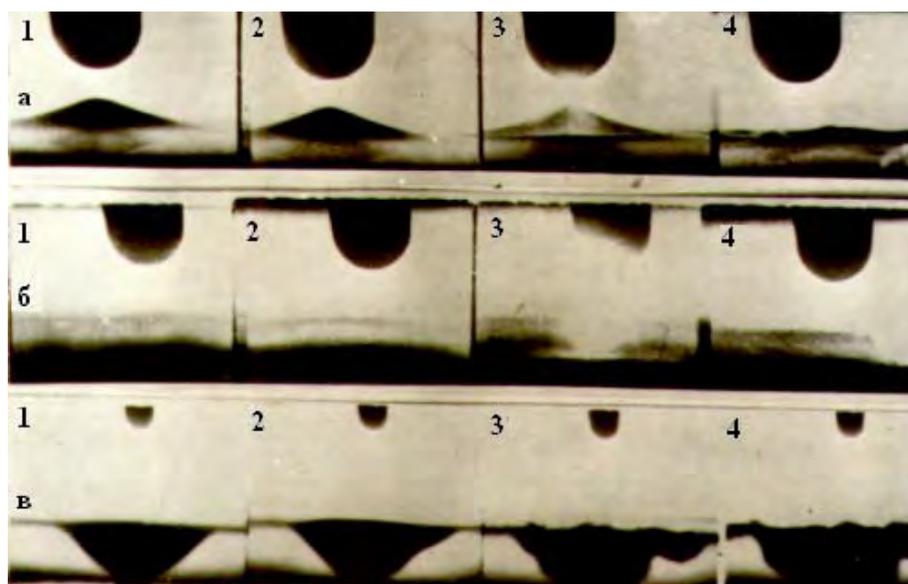


Рис. 1. Пробой межэлектродного промежутка при напряжении: а – 4,8; б – 7,9; в – 19 кВ. Скорость съемки 4000 кадр/с.

Так как пробивные характеристики электрических разрядов изучались при атмосферном давлении, а металлический электрод имел малый радиус кривизны, то дальнейшее увеличение межэлектродного расстояния, а вместе с ним и пробивного напряжения вызывает развитие коронного разряда с металла. Вокруг металлического электрода при обеих его полярностях образуется коронирующий слой, в котором происходит ионизация и свечение газа. Дальнейшее увеличение разности потенциалов между электродами приводит к расширению коронирующего слоя, вплоть до поверхности электролита. Электрический ветер с металлического электрода, возникающий в результате передачи частицам газа импульса ионами, которые двигаясь через внешнюю область коронного разряда от коронирующего электрода к некоронирующему, приводит к турбулентному движению газа в разрядном промежутке.

Показано [1–3], что в случае коронного разряда между острием и плоскостью для системы, состоящей из двух металлических электродов, существует механическая сила, величина которой зависит от полярности острия. Поэтому возникающий коронный разряд с металлического электрода приводит к деформации поверхности электролита в виде впадины (рис 1,в) и пробой разрядного промежутка осуществляется между металлическим электродом и точкой на поверхности впадины, соответствующей максимальной напряженности электрического поля.

Исследованные зависимости высоты поднятия поверхности раствора от пробивного напряжения показали, что величина подъема жидкости обусловлена полярностью и электропроводностью водного раствора, причем при положительной полярности электролитного электрода она меньше, чем при отрицательной. Уменьшение электропроводности раствора приводит к снижению высоты подъема. Можно предположить, что указанные зависимости высоты поднятия жидкости обуславливаются избыточными электрическими зарядами на его поверхности при отсутствии внешнего электрического поля. Наличие поверхностного потенциала [4, 5] связано с ориентацией диполей молекул воды и предпочтительной адсорбцией определенных ионов на поверхности раздела электролит-воздух. В работах [4, 5] указывается, что на поверхности электролитов образуется избыточный заряд, в большинстве случаев отрицательный, из-за структуры двойного электрического слоя на поверхности раздела электролит-воздух. По этой причине исследовалась зависимость высоты подъема поверхности электролита от межэлектродного расстояния для водных растворов, обладающих отрицательными, положительными и нулевыми изменениями поверхностного потенциала относительно дистиллированной воды. В качестве таких электролитов использовались растворы сернокислого натрия плотностью  $1,14 \text{ г/см}^3$  и поверхностным потенциалом 40 мВ, раствор хлористого аммония плотностью  $1,015 \text{ г/см}^2$ , у которого изменения поверхностного потенциала для данной плотности не обнаружено. В качестве электролита с отрицательным потенциалом использовался водный раствор хлористого натрия плотностью  $1,194 \text{ г/см}^3$  и поверхностным потенциалом – 25 мВ.

Исследования характера зависимости величины подъема поверхности электролита от его полярности в момент пробоя разрядного промежутка показали, что в растворах хлористого натрия максимальная величина подъема жидкости при отрицательной полярности свободной поверхности электролита больше, чем при положительной (рис. 2). Для раствора сернокислого натрия влияние полярности электролитного электрода носит обратный характер (рис. 3). При использовании водного раствора хлористого аммония в качестве электролитного электрода зависимость величины подъема жидкости от его полярности нами не обнаружена.

Отмеченные закономерности деформации поверхности электролита под действием внешнего электрического поля от полярности электролитного электрода находятся в соответствии с приведенными данными об изменении величины поверхностного потенциала водных растворов относительно дистиллированной воды. При этом следует принимать во внимание то, что указанное изменение поверхностного потенциала в зависимости от рода и концентрации электролита исследовалось при отсутствии внешнего электрического поля. В нашем же случае в межэлектродном промежутке накладывается внешнее электрическое поле напряженностью не менее  $10^6 \text{ В/м}$ , которое, очевидно, вызывает перераспределение электрических зарядов на поверхности электролита, чем и вызывается подъем поверхности при любой его полярности.

Кроме строения двойного электрического слоя на поверхности раздела электролит-воздух на подъем электролита под действием электрического поля влияют плотность и вязкость жидкости, а также сила поверхностного натяжения, которая, в свою очередь, зависит от поверхностной концентрации зарядов.

Таким образом, в разрядном промежутке, состоящем из металлического и электролитного

электродов, невозможно получить однородное электрическое поле. Поэтому оценим напряженности электрического поля, при которых осуществляется электрический пробой, в случае, когда под действием кулоновских сил на свободную поверхность электролита происходит ее возмущение и разряд протекает между металлической полусферой и электролитным “острием”. Возмущенную поверхность электролита в момент пробоя можно представить в виде конуса. Напряженность электрического поля у электролитного “острия” можно определить из равенства

$$\alpha\Delta S + \rho ghV = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot V, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения раствора, Н/м;  $\Delta S$  – изменение площади поверхности в результате подъема электролита, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность водного раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – расстояние от центра тяжести конуса до первоначального уровня электролитной поверхности, м;  $V$  – объем возмущенной части электролита, м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E$  – напряженность электрического поля вблизи электролитного “острия”, кВ/м.

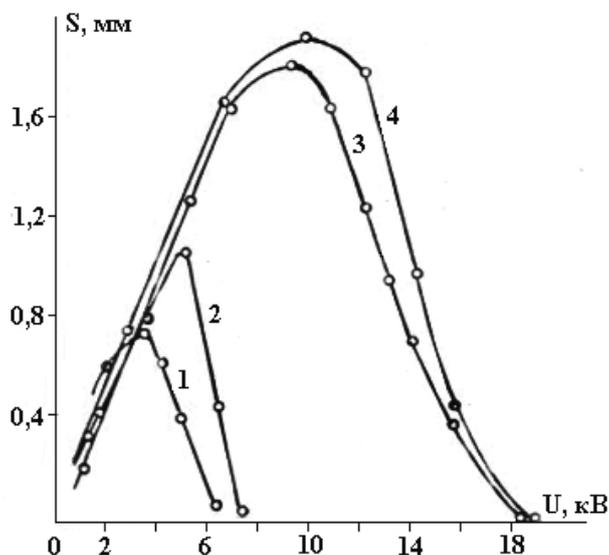


Рис. 2. Зависимость высоты поднятия поверхности хлористого натрия от пробивного напряжения при положительной (1 и 3) и отрицательной (2 и 4) полярности электролита. Диаметр металлического электрода 2,7 мм (кривые 1 и 2), 9,8 мм (кривые 3 и 4).

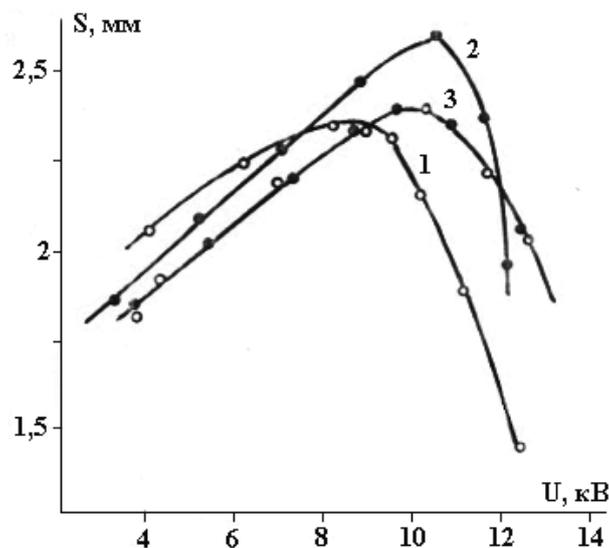


Рис. 3. Зависимость высоты поднятия поверхности раствора сернокислого натрия – катода (1) и анода (2), а также хлористого аммония (3) от пробивного напряжения. Диаметр металлического электрода 9,8 мм.

Изменение площади поверхности электролита в результате его подъема

$$\Delta S = \pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол между высотой и образующей конуса, град. С учетом того, что

$$V = \frac{1}{3} \pi S^3 \operatorname{tg}^2 \varphi, \quad h = \frac{1}{4} S, \quad (3)$$

где  $S$  – максимальная высота подъема поверхности электролита, м; напряженность электрического поля у электролитного “острия” в момент пробоя межэлектродного промежутка

$$E = \left[ \frac{2}{\varepsilon \varepsilon_0} \left( \frac{3\alpha(1 - \sin \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\rho g S}{4} \right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Измерив высоту подъема поверхности электролитного электрода в момент электрического пробоя и угол между высотой и образующей конуса, оценим напряженность электрического поля для некоторых пробивных напряжений при обеих полярностях электролитного электрода (см. таблицу). По полученному выражению для напряженности электрического поля вблизи электролитного “острия” можем оценить некоторую эффективную напряженность электрического поля вблизи поверхности электролитного электрода, при которой осуществляется электрический пробой разрядного промежутка. При этом влияние полярности электролитного электрода на величину напряженности электрического поля не учитывается, ибо отсутствуют сведения о характере изменения коэффициента поверхностного натяжения электролитов и поведение двойного электрического слоя на границе воздух–электролит в электрическом поле.

*Значение эффективной напряженности электрического поля в зависимости от полярности электролитного электрода*

Полярность электролита	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр электрода, мм	$U_{пр}$ , кВ	$s \cdot 10^{-3}$ , м	$\varphi$ , град	$E$ , кВ/см
NaCl						
Положительная	1,15	2,7	6,8	1,15	64	23
Положительная	1,15	2,7	3,1	0,92	64	25
Отрицательная	1,15	2,7	4,1	0,95	65	24,2
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						
Отрицательная	1,2	9,8	9,6	1,94	64	20,3
Положительная	1,2	9,8	9,1	1,82	64	20,3
Положительная	1,2	9,8	3,15	0,72	64	23,4

В работе [6] для небольших межэлектродных промежутков минимальное напряжение пробоя оценивается выражением

$$(U)_{min} = (4\pi\rho g)^{1/2} \cdot h^{3/2}, \quad (5)$$

где  $h$  – межэлектродное расстояние, м.

Определенные из этого выражения значения минимальной величины напряжения, при котором осуществляется пробой разрядного промежутка, близки к экспериментальным значениям, полученными нами.

В области напряжений, в которой подъем свободной поверхности жидкости отсутствует или наблюдается образование впадины на поверхности электролитного электрода, средняя напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке для электродов диаметром 2,7 и 9,8 мм соответственно равна 1500 и 1800 кВ/м. Для металлического острия при положительной и отрицательной его полярности средняя напряженность электрического поля соответственно равна 820 и 950 кВ/м.

Сравнивая полученные пробивные характеристики для системы, состоящей из металлического и электролитного электродов, с пробивными характеристиками для металлических электродов той же конфигурации в воздухе при атмосферном давлении [7], можно отметить, что они одинаковы. Когда на поверхности электролитного электрода образуется впадина, провести такое

сравнение невозможно, так как для такой конфигурации в литературе пробивные характеристики отсутствуют. Таким образом, наличие электролитного электрода не оказывает влияния на величину пробивного напряжения. По-видимому, на пробой газового промежутка с электролитным электродом воздействуют лишь процессы ионизации в нем, а эмиссионные свойства электролитов не имеют существенного значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопович Л.И. Механические эффекты при коронном разряде между острием и плоскостью // ЖТФ. 1996. Т. 36. Вып. 4. С. 643–645.
2. Ратников Э.А. Механическая сила, возбужденная на коронирующем электроде // Известия вузов. Физика. 1968. № 2. С. 128–132.
3. Ратников Э.А. Влияние температуры коронирующего электрода на электрические и механические параметры коронного разряда. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Минск, 1969.
4. Paluch M. Elektryczny potencjal powierzchniowy i napiecie powierzchniowy roztworow wodnych niektorych alifatycznych okeymow // Roczn. chem. 1968. Vol. 42. N 10. P. 1697–1703.
5. Jarvis N., Scheiman M. Surface Potentiale of Aqueous Electrolyte solutions // J. Phys. Chem. 1968. Vol. 72. N 1. P. 74–78.
6. Брискман В.А., Шайдуров Г.Ф. Параметрическое возбуждение неустойчивости жидкости в магнитном и электрическом полях // Магнитная гидродинамика. 1969. № 3. С. 15–19.
7. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М., 1960.

*Поступила 14.02.2001*

#### Summary

The disruptive discharge of air gap between metallic and electrolytic electrodes have been studied. The dependence of sparking voltage and height of solution lifting from electroconductivity and polarity at changing of voltage from 3 to 20 kV.

---

И.М. Панченко, М.С. Панченко

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ВО ВЛАЖНОМ МАКРОПОРИСТОМ ТЕЛЕ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,  
ул. Остафова, 39, г. Ровно, 33028, Украина*

Научно-технический прогресс в разных областях техники неразрывно связан с ростом удельных мощностей и предъявляет все более высокие требования к работе самой разнообразной аппаратуры и оборудования. Это способствует внедрению более современных методов интенсификации теплообмена и создания надежно управляемых потоков теплоносителей. Наличие в аппаратуре и оборудовании электрических полей (ЭП) высокой напряженности  $E$  предполагает расширение и углубление исследования тепло- и массообмена в ЭП [1]. В настоящее время управление взаимосвязанными и взаимообусловленными потоками тепла и массы во влажных телах в условиях действия внешних ЭП – актуальная, но вместе с тем сложная задача, решение которой носит характер, далеко не удовлетворяющий требованиям технологии и современной организации производственных процессов.

Во влажном капиллярно-пористом теле вместе с кондуктивным переносом энергии в виде тепла через скелет пористого тела и внутривещное вещество происходит перенос теплосодержания