

03;04

## Поверхностный разряд при повышенных температурах воздуха

© М.В. Соколова, С.А. Кривов, М.В. Скуратов

Московский энергетический институт (ТУ)

E-mail: sokolova@fee.mpei.ac.ru

Поступило в Редакцию 9 ноября 2009 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования электрических характеристик поверхностного разряда и интенсивности образования в нем заряженных частиц при повышенных температурах воздуха. Анализ кривых импульсов тока микрозарядов с краев полос многополосного электрода, расположенного на поверхности керамической пластины (диэлектрического барьера), при воздействии на электродную систему переменного напряжения частотой 14 кГц с амплитудой до 3 кВ показывает, что при увеличении температуры газа в разрядной ячейке до 500°C и дополнительном нагреве барьера изменяются параметры и форма импульсов тока микрозарядов и существенно повышается интенсивность выхода заряженных частиц.

Интерес к изучению поверхностного разряда связан с расширением направлений его использования. Об этом, например, свидетельствует целый ряд докладов, представленных на международном симпозиуме по химии плазмы 2009 г. [1], и публикаций [2].

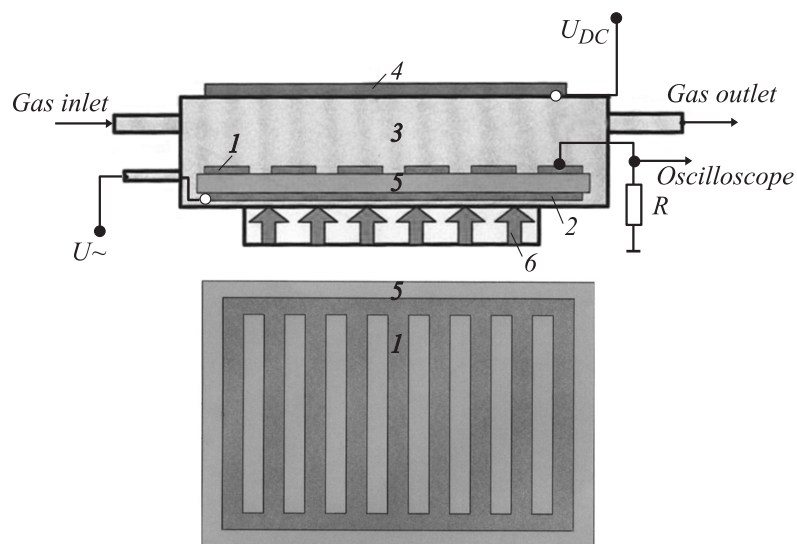
Экспериментально установлено [3,4], что структура поверхностного разряда и его электрические характеристики существенно зависят от свойств диэлектрического барьера, однако характер влияния барьера на разряд до сих пор полностью не изучен. Практически нет данных о возможности целенаправленного воздействия на разряд изменением условий работы барьера. Такие сведения позволяют не только оптимизировать характер разряда для использования его в технологических устройствах, но и установить физические процессы разряда, на которые влияет барьер. Одним из возможных путей воздействия на разряд может быть нагрев барьера, что применимо к работе реакторов заряженных частиц, в которых повышенная температура обусловлена как самим разрядом, так и дополнительным подогревом рабочего газа.

Публикации по исследованию поверхностного разряда при высоких температурах газа немногочисленны. Установлено [3], что увеличение температуры ведет к росту интенсивности выхода заряженных частиц, однако нет данных о роли нагрева барьера в этом процессе. Целью данной работы является выявление тех характеристик поверхностного разряда, которые в наибольшей степени изменяются при нагреве. Для этого анализируются как разрядные характеристики, что позволяет установить физические процессы, ответственные за интенсивность разряда, так и плазмохимические характеристики, определяющие выход заряженных частиц.

Экспериментально установлено [5–7], что поверхностный разряд на начальных этапах своего развития представляет собой совокупность микроударов, которые возникают у края тонкого электрода, расположенного на поверхности диэлектрической пластины (барьера), и в каждый полупериод воздействующего переменного напряжения имеют форму отдельных каналов, длина и число которых зависят от конфигурации электродов и от значения приложенного напряжения.

Использованная в работе электродная система (рис. 1) включает электрод в виде ряда тонких полос (металлизация толщиной  $30\ \mu\text{m}$ ) шириной  $1\ \text{mm}$ , расположенных на поверхности керамической пластины (керамика 22 ГС) с размерами  $40 \times 60\ \text{mm}$ , имеющей диэлектрическую постоянную  $\epsilon = 9$  и толщину  $1.1\ \text{mm}$ . Электрод заземлен через измерительный шунт с сопротивлением  $R = 10\ \Omega$ . Второй электрод, на который подается всокий потенциал частотой  $14\ \text{kHz}$  от источника переменного напряжения, расположен на обратной стороне пластины. Края высоковольтного электрода залиты эпоксидным компаундом. Над поверхностью коронирующего электрода на высоте  $1\ \text{cm}$  располагается третий плоский электрод, на который подается постоянный высокий потенциал до  $10\ \text{kV}$ .

Вся электродная система помещена в разрядную ячейку с корпусом из нержавеющей стали и верхней крышкой из тугоплавкого стекла с металлизированной поверхностью, которая служит третьим электродом, подсоединенным к источнику постоянного напряжения. Изоляционные элементы ячейки изготовлены из асбеста и выдерживают температуру до  $600^\circ\text{C}$  и постоянное напряжение до  $10\ \text{kV}$  без перекрытия по поверхности. Для дополнительной теплоизоляции ячейка помещена в контейнер с изоляцией из асбеста.



**Рис. 1.** Система электродов в экспериментальной ячейке и электрическая схема. 1 — многополосный коронирующий электрод; 2 — сплошной высоковольтный электрод; 3 — газовый промежуток; 4 — третий электрод высокого постоянного потенциала; 5 — диэлектрический барьер; 6 — нагрев нижнего электрода и барьера.  $R$  — измерительный шунт.

Высокая температура внутри ячейки создается за счет подогрева дна ячейки до температуры не менее  $450^{\circ}\text{C}$  и подвода к ячейке потока горячего воздуха с температурой  $500^{\circ}\text{C}$ . Расход горячего воздуха через разрядный промежуток составляет  $1\text{ l/min}$ . Температура внутри ячейки, измеренная термопарой ТМ 902 в отсутствие разряда в потоке горячего воздуха, может достигать  $440^{\circ}\text{C}$ . При горении разряда барьер дополнительно разогревается, и температура слоя газа у его поверхности повышается в среднем на  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$ , что было подтверждено измерениями, проведенными сразу после выключения высокого напряжения. Действующее значение высокого переменного напряжения, подводимого к электродам, составляет  $2.1\text{ kV}$ . Постоянный ток, созданный потоком заряженных частиц, образованных в поверхностном разряде, измеряется микроамперметром М 265М.

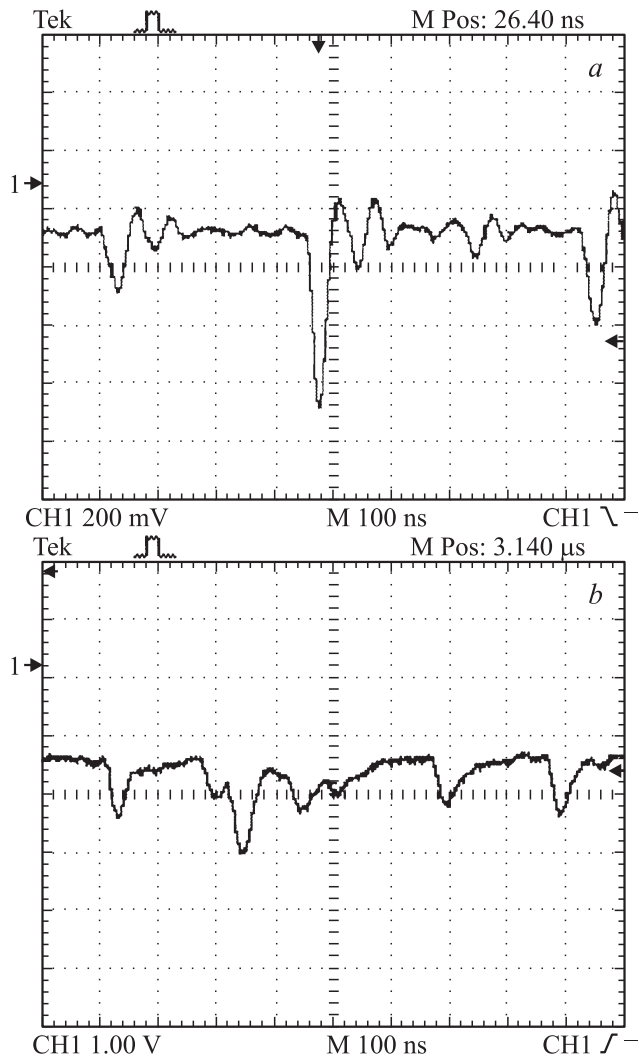
При исследовании поверхностных разрядов одной из основных характеристик, используемой при анализе, является ток отдельных микрозарядов, регистрируемый в виде импульсов, хорошо разрешимых во времени. В работе измерения импульсов тока микрозарядов проводились с помощью омического шунта с малой индуктивностью и осциллографа TDS 3014 с полосой пропускания 100 MHz.

Так как при разряде имеет место разброс параметров импульсов тока отдельных микрозарядов (длительности импульса, длительности фронта импульса, амплитуды первого выброса кривой), то для анализа брались импульсы с наиболее вероятными параметрами, характерными для каждой температуры. На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения на измерительном шунте, соответствующие импульсам тока. Необходимо отметить, что кривые на осциллограммах соответствуют полярности заземленного электрода.

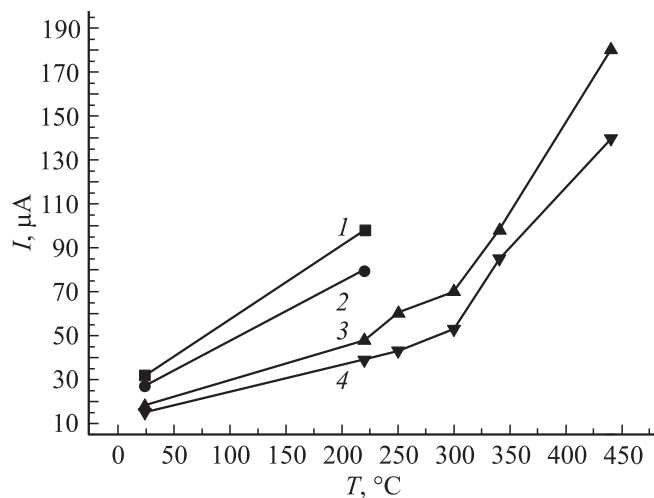
Каждый импульс на осциллограммах, соответствующий отдельному микрозаряду, отражает как ток самого микрозаряда (первый выброс импульса), так и колебания, обусловленные элементами измерительной цепи, включая емкость электродной системы и индуктивность проводов, соединяющих шунт с коронирующим электродом. Из-за высокой температуры уменьшение длины соединительных проводов невозможно, что не позволяет напрямую по регистрируемым осциллограммам определять точно заряд, создаваемый отдельными микрозарядами, однако осциллограммы дают возможность оценивать влияние температуры на разряд.

При нормальной температуре амплитуда импульсов тока при положительном потенциале на электрод составляет до  $50 \mu\text{A}$ , а длительность всего импульса до полуспада составляет не более 40–45 ns. При этом импульсы тока появляются с интервалом 100–1500 ns (кривая *a* на рис. 2). При  $T > 300^\circ\text{C}$  увеличивается число меньших импульсов, а на их фоне возникают мощные импульсы с большой амплитудой первого выброса. При  $T > 400^\circ\text{C}$  мощные импульсы пропадают, а осциллограмма включает большое число следующих друг за другом почти одинаковых импульсов (рис. 2, *b*), амплитуда которых, однако, заметно выше, чем при слабом нагреве, а длительность каждого импульса возрастает до 80–100 ns. Внешне разряд с ростом температуры все более напоминает диффузное свечение у поверхности барьера.

С ростом температуры в ячейке растет ток в цепи постоянного напряжения. Уже при  $T = 180^\circ\text{C}$  измеряемый ток увеличивается вдвое.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока микроразрядов: *a* — разряд при температуре газа в ячейке  $23^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\sim} = 2\text{ kV}$ ; *b* — разряд при температуре  $440^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\sim} = 1.5\text{ kV}$ .



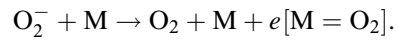
**Рис. 3.** Зависимость постоянного тока от температуры в разрядной ячейке.  $U_{DC} = 7.5$  kV. 1, 2 —  $U_{\sim} = 1.65$  kV, 3, 4 —  $U_{\sim} = 1.5$  kV; 1, 3 — положительный потенциал на третьем электроде, 2, 4 — отрицательный потенциал на третьем электроде.

При  $T > 300^{\circ}\text{C}$  рост тока с температурой усиливается (рис. 3), при этом ток при положительном потенциале на третьем электроде возрастает сильнее с ростом температуры, чем при отрицательном.

Измерения показали, что характеристики разряда и значения постоянного тока зависят не только от температуры газа в ячейке, но и от нагрева барьера, что ведет к дополнительному повышению температуры в прилегающем газовом слое и снижению начального напряжения зажигания разряда. Интенсивность разряда при напряжении 1.5 kV при нагреве выше  $300^{\circ}\text{C}$  такая же, как при напряжении 2.1 kV без нагрева. По мнению авторов, изменения характера разряда при нагреве являются результатом ряда причин.

При высокой температуре из-за снижения плотности газа  $N$  в области нагрева увеличивается приведенная напряженность электрического поля  $E/N$ , что ведет к резкому росту коэффициента ионизации  $\alpha/N$  и увеличению числа свободных электронов. С ростом температуры

усиливается развал отрицательных ионов, характеризуемый реакцией



Константа  $\rho$  указанной реакции при температуре газа  $T \geq 300$  К по [8]

$$\rho = 2.7 \cdot 10^{-10} (T/300)^{0.5} \exp(-5590/T).$$

Расчет показывает, что наиболее интенсивно развал ионов проявляется при  $T > 600$  К, что соответствует температурам, использованным в работе. Развал отрицательных ионов увеличивает число свободных электронов с большей, чем у ионов подвижностью, что ведет к росту тока в цепи постоянного напряжения, наблюдаемому в эксперименте.

Другим важным фактором, который может обусловить рост постоянного тока при нагреве, является усиление фотоэмиссии электронов с поверхности барьера при его нагреве, что ведет к увеличению импульса тока микрозаряда, наблюдаемому по регистрируемым осциллограммам. В итоге во внешнем постоянном электрическом поле ток возрастает, причем этот рост более интенсивен при положительном потенциале на третьем электроде, когда в промежутке идет движение отрицательно заряженных частиц.

Полученные данные показывают сильное влияние барьера на процессы в поверхностном разряде, усиливающееся с ростом температуры, что может быть использовано для повышения эффективности работы реактора заряженных частиц, использующего поверхностный разряд. С другой стороны, полученные данные о повышении интенсивности поверхностного разряда с температурой могут быть полезны при анализе условий работы комбинированной изоляции в высоковольтной аппаратуре, где усиление поверхностного разряда опасно для изоляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00274).

## Список литературы

- [1] *Proceedings of 19th International Symposium on Plasma Chemistry*. Eds. by A. von Keudell, J. Winter, M. Böke, V. Shulz-von der Gathen. Bochum (Germany), July 26 to 31, 2009.
- [2] Allegraud K., Guaitella O., Rousseau A. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 7698–7706.

- [3] *Marina V. Sokolova, Sergey A. Krivov* // J. of Advanced Oxidation Technologies. 2006. V. 9. N 2. P. 164–169.
- [4] *Valentin I. Gibalov, Gerhard J. Pietsch* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 2618–2636.
- [5] *Kozlov M.V., Sokolova M.V., Temnikov A.G., Timatkov V.V., Vereschagin I.P.* // Plasma and Polymers. 2003. V. 8. N 3. P. 179–206.
- [6] *Saveliev A.B., Pietsch G.J.* // Contributed Papers of 8th Int Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry. Hakone VIII, Puhajarve, Estonia, 2002. V. 2. P. 229–233.
- [7] *Sokolova M., Hulka L., Pietsch G.* // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 162–169.
- [8] *Verhaart H.F.A.* Avalanches in insulating gases // Ph. D. Thesis. Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 1982.