

# Исследование механизмов развития барьерного разряда в системе «игла-плоскость»

О. А. Емельянов, М. В. Шемет

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия, e-mail: [oaemel@gmail.com](mailto:oaemel@gmail.com)*

Экспериментально исследовано развитие барьерного разряда (БР) на трех моделях: «игла – полимерный барьер – плоскость», «игла – субмиллиметровый воздушный зазор – полимерный барьер – плоскость» и «игла – субмиллиметровый воздушный зазор – металлический диск – полимерный барьер – плоскость». Первая модель характеризовалась наличием поверхностной фазы БР, вторая – поверхностной и объемной, а третья – только объемной. В качестве барьера использовалась пленка полиэтилентерефталата толщиной 100 мкм. Экспериментальная установка позволяла надежно измерять основные характеристики разрядного явления: напряжение возникновения разряда; разрядный импульс тока; заряд, перенесенный в цепи в процессе разряда; пространственное распределение поверхностной плотности заряда на барьере. Экспериментально показано, что основную роль в процессе развития БР играет поверхностная фаза разряда. Полученные данные указывают на тот факт, что расположение металлического диска с плавающим потенциалом на поверхности барьера обеспечивает условия для возникновения тлеющего разряда атмосферного давления.

*Ключевые слова: барьерный разряд, тлеющий разряд атмосферного давления, полимер, стример.*

УДК 533.9

## ВВЕДЕНИЕ

Барьерный разряд (БР) развивается в условиях, когда хотя бы один из электродов покрыт диэлектриком. За последние 10–15 лет наблюдается рост числа исследований БР вследствие его широкого использования в практических целях, например для получения озона, модификации поверхности материалов, накачки CO<sub>2</sub> лазеров и УФ-эксимерных ламп, создания плазменных дисплеев, очистки, разрушения летучих органических соединений [1, 2]. Последние исследования направлены на развитие биомедицинских приложений и систем управления воздушными потоками [3, 4]. В зависимости от практического приложения размер разрядного промежутка варьируется в диапазоне ~ 0,1–100 мм. В качестве материала барьера обычно используются стекло, кварц, керамика, эмаль или полимеры [5]. В зависимости от рабочего газа, поверхностных свойств диэлектрика и условий работы барьерный разряд может существовать в двух различных режимах: диффузном и филаментарном. Диффузный режим разряда можно получить только при соблюдении специальных условий [6, 7]. В данном случае разряд может развиваться как в форме тлеющего разряда, характеризующегося высоким катодным падением потенциала, так и в форме таунсендовского разряда, когда пространственный заряд практически не оказывает влияния на внешнее поле [8]. Филаментарный режим наблюдается при атмосферном дав-

лении в виде множества случайно распределенных по поверхности диэлектрика одиночных микрозарядов (так называемых токовых филаментов) с радиусом канала порядка 0,1 мм и длительностью 1–100 нс [9]. Следует отметить, что микрозаряд характеризуется двумя фазами развития. Первая (объемная фаза) характеризуется стримерным пробоем газового промежутка, а вторая (поверхностная фаза) связана с дальнейшим развитием стримерных разрядов по поверхности барьера. Известно, что одним из условий возникновения лавинно-стримерного перехода является достижение критического числа электронов в головке лавины порядка 10<sup>8</sup> [см., напр., 10]. При дальнейшем развитии стримера число носителей в головке слабо меняется, поэтому на поверхности барьера должно накопиться несколько десятков пико-кулонов ( $=10^8 \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ ). Однако ранее выполненные исследования [11, 12] показали, что значение величины поверхностного заряда может достигать единиц нано-кулонов, при этом его характерный пространственный масштаб лежит в миллиметровом диапазоне и значительно превышает диаметр стримерного канала (~ 0,1 мм). Таким образом, можно предположить, что основной вклад в разрядный ток и процесс накопления заряда в БР дает именно поверхностный разряд (поверхностная фаза), а не пробой воздушного промежутка (объемная фаза). Для подтверждения этой гипотезы и выяснения количественных характеристик развития объем-

ной и поверхностной фаз БР были проведены специальные экспериментальные исследования, результаты которых и обсуждаются в настоящей статье.

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования были проведены для трех экспериментальных моделей (рис. 1), конфигурация электродов которых представляла собой систему «игла – плоскость»:

1) система «игла – полимерный барьер – плоскость» – игольчатый электрод располагался вертикально непосредственно на поверхности барьера, тем самым обеспечивая условия для развития только поверхностного разряда. Эту ситуацию можно рассматривать как физическое моделирование касания барьера головкой стримера;

2) система «игла – воздушный зазор – полимерный барьер – плоскость» – исследовался традиционный филамент БР в условиях неоднородного поля при несимметричной конфигурации электродов;

3) система «игла – воздушный зазор – металл – полимерный барьер – плоскость» – на поверхность барьера напылялся алюминиевый электрод дисковой формы. Диаметр электрода ( $D$ ) составлял 2–11 мм, а толщина – 20 нм. Игла располагалась непосредственно над центром диска, при этом между иглой и барьером устанавливался требуемый воздушный зазор. В данных условиях развитие поверхностного разряда затруднено, поэтому описываемая модель характеризовалась только развитием разряда в воздушном промежутке.



**Рис. 1.** Экспериментальные модели: модель 1 – поверхностный разряд (ПР); модель 2 – барьерный разряд; модель 3 – пробой воздушного промежутка (ПВ).

В качестве барьера, располагаемого непосредственно на поверхности плоского электрода, для всех моделей использовался полиэтилентерефталат толщиной 100 мкм.

Радиус закругления иглы составлял 40 мкм. Размер воздушного зазора ( $h$ ) во второй и третьей моделях составлял 100 или 300 мкм. Измерения основных электрических характеристик разряда (напряжения возникновения разряда ( $U_{BR}$ ); разрядного импульса тока; заряда, про-

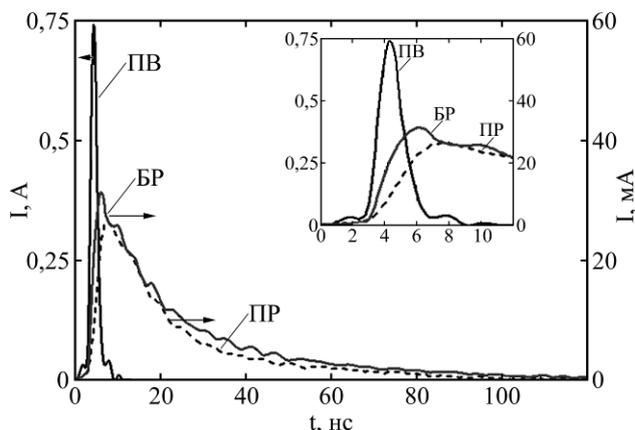
текшего в цепи во время разряда; пространственного распределения поверхностной плотности заряда, накапливающегося на поверхности диэлектрического барьера), проводились в лабораторных условиях с помощью экспериментальной установки, подробно описанной в [13]. Параллельно электродным системам включалась емкость связи (95 пФ), обеспечивающая необходимую подпитку энергии для развития разряда.

К электродам прикладывалось линейно нарастающее напряжение (скорость подъема  $\sim 100$  В/с) до момента возникновения разряда. После завершения разрядного процесса оно отключалось. Импульс тока разряда определялся по изменению напряжения на малоиндуктивном низкоомном шунте (50 Ом), подключенном к плоскому электроду. Значение напряжения регистрировалось с помощью осциллографа LeCroy WaveJet-322 (2 Гвыб/с). Максимальная чувствительность метода регистрации тока – 0,2 мА. При этом значение постоянной времени измерения импульсного тока составило порядка 700 пс, что позволило надежно измерять процессы в наносекундном масштабе времени.

Измерение накопленного поверхностного заряда осуществлялось посредством сконструированного емкостного вращающегося зонда с диаметром сканирующего электрода 0,7 мм. Для повышения разрешающей способности зондовой методики было разработано программное обеспечение, основанное на методе регуляризации Тихонова.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 совместно представлены осциллограммы разрядного тока для трех исследуемых моделей.



**Рис. 2.** Осциллограммы разрядного тока для трех исследуемых моделей: ПР (поверхностный разряд) –  $h = 0$  мм,  $U_{BR} = 1280$  В; БР –  $h = 100$  мкм,  $U_{BR} = 1440$  В; ПВ (пробой воздушного зазора при наличии дискового электрода) –  $h = 100$  мкм,  $U_{BR} = 1140$  В,  $D = 2,7$  мм.

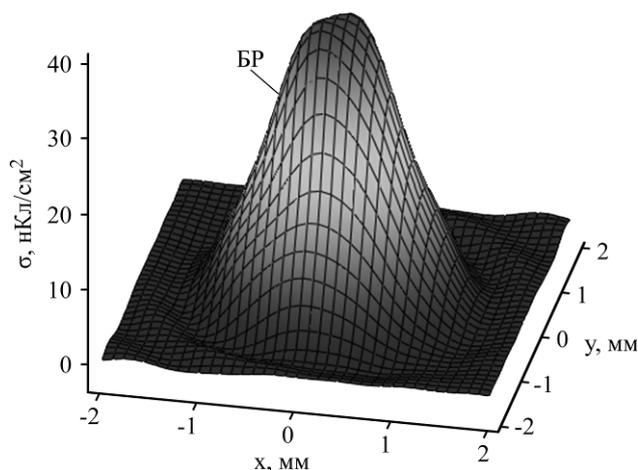
Видно, что в случае барьерного (БР) и поверхностного (ПР) разрядов импульсы тока

близки друг другу. Амплитуда составила около 30 мА, а длительность – порядка 100 нс. Это предсказуемый результат. Прорастание стримера по направлению к барьеру можно рассматривать как перемещение иглы. После достижения стримером диэлектрика инициируется развитие поверхностного разряда, что и будет наблюдаться в случае расположения иглы на барьере, то есть в первой модели. Дальнейшее развитие процесса и его последующее затухание в обоих случаях определяются поверхностными свойствами барьера и величиной приложенного напряжения. Таким образом, основным отличием для двух моделей является отсутствие фазы пробоя воздушного промежутка, то есть пересечения промежутка стримером. Действительно, разница величин перенесенного в цепи заряда на начальном этапе от 3 до 7 нс составила  $\sim 80$  пКл, что близко к объему заряда, переносимого головкой стримера.

В третьем случае, то есть при наличии дискового электрода на барьере, полуширина разрядного импульса тока составила 2–3 нс, амплитуда – 0,75 А. Столь существенные изменения объясняются сменой механизма разряда вследствие наличия электрода с плавающим потенциалом, обеспечивающего практически мгновенный «отток» оседающего заряда от оси разряда. Это способствовало сдерживанию нарастания осевого запирающего поля, которое, в свою очередь, оказывает основное влияние на затухание разряда.

Отметим, что данный эффект наблюдался и при отрицательной полярности иглы.

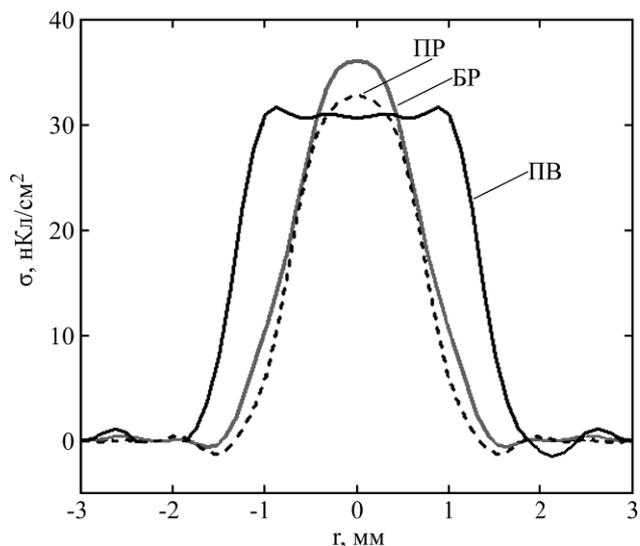
В качестве примера на рис. 3 представлено пространственное распределение поверхностной плотности заряда, накопленного при развитии БР в воздушном зазоре 100 мкм.



**Рис. 3.** Пространственное распределение поверхностной плотности заряда, накопленного в результате развития БР ( $h = 100$  мкм,  $U_{БР} = 1440$  В).

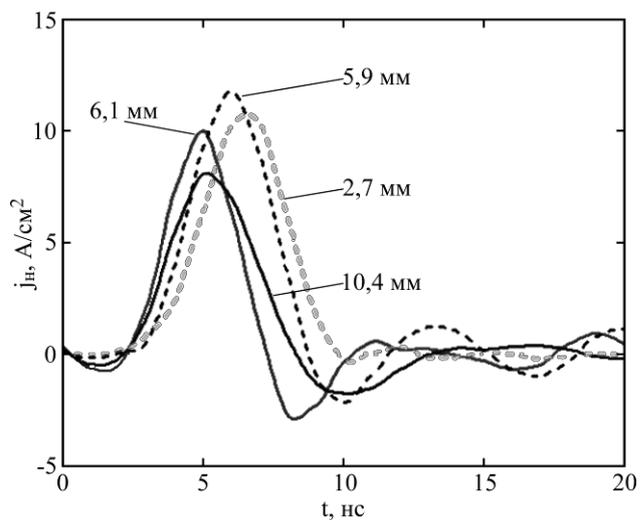
На следующем графике (рис. 4) совместно изображены максимальные радиальные профили сечения накопленного поверхностного заряда на

полимере и металлическом дисковом электроде в результате развития разряда в трех исследуемых моделях (случай БР соответствует рис. 3).



**Рис. 4.** Радиальные профили сечения накопленного поверхностного заряда для трех исследуемых моделей: БР –  $h = 100$  мкм,  $U_{БР} = 1440$  В; ПР (поверхностный разряд) –  $h = 0$  мм,  $U_{БР} = 1280$  В; ПВ (пробой воздушного зазора при наличии дискового электрода) –  $h = 100$  мкм,  $U_{БР} = 1140$  В,  $D = 2,7$  мм.

Распределения в случае барьерного и поверхностного разрядов могут быть удовлетворительно аппроксимированы функцией Гаусса, при этом они очень близки, как и импульсы тока. Таким образом, можно заключить, что основная часть токового импульса БР определяется поверхностной стадией развития разряда.



**Рис. 5.** Изменение со временем нормальной плотности разрядного тока  $j_H$  (модель 3 – ПВ): сплошная линия –  $h = 100$  мкм, пунктир –  $h = 300$  мкм. Цифры на графиках соответствуют диаметру металлического диска ( $D$ ).

Эксперименты, проведенные с третьей моделью (ПВ) при разных диаметрах дискового электрода, показали, что амплитуда тока разряда изменялась прямо пропорционально площади диска. На рис. 5 для зазоров 100 и 300 мкм пред-

Значения основных параметров разряда для случаев, изображенных на рис. 5

$h$ , мкм	$U_{BP}$ , В	$D$ , мм	$I_M$ , А	$t_H$ , нс	$Q$ , нКл	$\sigma_M$ , нКл/см <sup>2</sup>
100	1100	6,1	2,8	5,5	6,6	24,7
100	1130	10,4	6,9	8	20	23,4
300	1640	2,7	0,7	9	2,3	36,5
300	1510	5,9	3,2	9	10,3	36,6

ставлены расчетные значения нормальной плотности тока  $j_H$ , определяемой как отношение мгновенного значения тока к площади диска. При этом, независимо от диаметра дискового электрода и размера воздушного зазора, максимальное значение  $j_H$  приблизительно сохранялось на уровне  $\sim 10$  А/см<sup>2</sup>. В таблице представлены значения основных параметров разряда для рассматриваемых случаев ( $I_M$  – амплитуда тока разряда;  $t_H$  – длительность импульса тока;  $Q$  – накопленный на металлическом диске заряд;  $\sigma_M$  – поверхностная плотность заряда, накопленного на диске). Известно, что сохранение величины нормальной плотности тока характерно для катодного слоя тлеющего разряда в различных условиях [14–16]. Так, в воздухе атмосферного давления нормальная плотность тока составляет  $\sim 10^{1-2}$  А/см<sup>2</sup> [14], что согласуется с представленными экспериментальными данными. Кроме того, расчеты авторов [17] показывают, что при достижении катодно-направленным стримером поверхности электрода происходит образование катодного слоя с близкими к тлеющему разряду параметрами. Таким образом, можно предположить, что в нашем случае после стримерного пробоя воздушного промежутка возникает тлеющий разряд атмосферного давления (APGD – atmospheric pressure glow discharge) [18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведены исследования барьерного разряда в трех экспериментальных моделях, основанных на системе электродов «игла – плоскость», в коротких воздушных промежутках при атмосферном давлении. Основные результаты экспериментов можно сформулировать следующим образом.

1. В системе «игла – воздушный зазор – полимерный барьер – плоскость» при возникновении стримерного пробоя воздушного промежутка основную роль в процессе развития разряда играет поверхностная фаза БР.

2. В системе «игла – воздушный зазор – металл – полимерный барьер – плоскость» после стримерного пробоя воздушного промежутка возникает наносекундный тлеющий разряд атмосферного давления (APGD – atmospheric pressure glow discharge).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chem Plasma Process.* 2003, **23**(1), 1–46.
2. Bruggeman P., Czarnetzki U., Tachibana K. Special Issue: Diagnostics of Atmospheric Pressure Microplasmas. *J Phys. D: Appl Phys.* 2013, **46**(46), 460301(1–3).
3. Hanson R.E. Dielectric Material Degradation Monitoring of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *J Appl Phys.* 2014, **115**(4), 043301(1–9).
4. Park G.Y., Park S.J., Choi M.Y., Koo I.G., Byun J.H., Hong J.W., Sim J.Y., Collins G.J., Lee J.K. Atmospheric-pressure Plasma Sources for Biomedical Applications. *Plasma Sources Sci Technol.* 2012, **21**(4), 043001(1–21).
5. Kogelschatz U. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier Discharges. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002, **30**(4), 1400–1408.
6. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А., Ямщиков В.А. О возможности получения объемного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении. *Письма в ЖТФ.* 2013, **39**(5), 48–53.
7. Gherardi N., Massines F. Mechanisms Controlling the Transition from Glow Silent Discharge to Streamer Discharge in Nitrogen. *IEEE Trans Plasma Sci.* 2001, **29**(3), 536–544.
8. Brandenburg R., Maiorov V.A., Golubovskii Yu.B., Wagner H.-E., Behnke J., Behnke J.F. Diffuse Barrier Discharges in Nitrogen with Small Admixtures of Oxygen: Discharge Mechanism and Transition to the Filamentary Regime. *J Phys D: Appl Phys.* 2005, **38**(13), 2187–2197.
9. Kogelschatz U. Applications of Microplasmas and Microreactor Technology. *Contrib Plasma Phys.* 2007, **47**(1–2), 80–88.
10. Бортник И.М., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н. и др. *Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов.* М.: Энергоатомиздат, 1993. 543 с.
11. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле. *ЖТФ.* 2014, **84**(8), 21–29.
12. Emelyanov O.A., Shemet M.V. Single Dielectric Barrier Discharge Characteristics in Needle-to-plane Configuration. *J Phys D: Appl Phys.* 2014, **47**(31), 315201(1–8).
13. Емельянов О.А., Шемет М.В. Методика и аппаратно-программный комплекс для измерений

электрофизических параметров барьерного разряда. *Измерительная техника*. 2014, (6), 46–50.

14. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
15. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. *Физика тлеющего разряда: учеб. пособие*. СПб.: Лань, 2010. 512 с.
16. Энгель А. *Ионизованные газы*. М.: Физматлит, 1959. 332 с.
17. Gibalov V.I., Pietsch G.J. Dynamics of Dielectric Barrier Discharges in Different Arrangements. *Plasma Sources Sci Technol*. 2012, **21**(2), 024010(1–35).
18. Астафьев А.М., Кудрявцев А.А. Стабильный однородный микроразряд атмосферного давления между плоским катодом и игольчатым анодом. *Письма в ЖТФ*. 2014, **40**(18), 84–89.

*Поступила 28.08.15*

*После доработки 28.09.15*

### Summary

The study of the dielectric barrier discharge (DBD) was conducted in three experimental configurations: “needle – polymer barrier – plane”; “needle – sub-millimeter air gap – polymer barrier – plane”, and “needle – sub-millimeter air gap – metal disk – polymer barrier – plane”. In the first case, only the DBD surface phase occurred (i.e. surface discharge), in the second one both surface and volume phases took place (i.e. typical DBD), and in the third case only volume phase occurred (i.e. air gap breakdown). A polyethylene terephthalate film with a thickness of 100  $\mu\text{m}$  was used as a barrier. During the experiments the breakdown voltage, the discharge current, the transferred charge, and the spatial distribution of accumulated charge were measured. It was experimentally shown that the surface phase of the DBD has a substantial impact on the whole discharge process. The obtained data indicate that the placement of a metal disk with a floating potential on the barrier surface caused the atmospheric pressure glow discharge initiation.

*Keyword: dielectric barrier discharge, atmospheric pressure glow discharge, polymer, streamer.*