

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА РАЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В N_2-O_2

*В.И. Голота, Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, С.Н. Маньковский,
И.А. Пащенко, С.Г. Пугач*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
Харьков, Украина*

E-mail: pugach@kipt.kharkov.ua

Представлены результаты экспериментальных исследований различных режимов горения разряда в системе электродов игла-плоскость. Разряд осуществлялся в N_2-O_2 газовых смесях при положительной и отрицательной полярности. Показано сильное влияние примесей озона, кислорода и паров воды на электрические характеристики разряда при отрицательной полярности и в нестационарном режиме положительной полярности. Электрические характеристики в стационарном режиме при положительной полярности слабо изменяются с увеличением концентрации электроотрицательных примесей.

PACS: 81.20.Ka

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям газоразрядных процессов в кислородсодержащих газах. Это обусловлено интенсивным развитием технологий, основанных на разрядах атмосферного давления, например, газоразрядные лазеры, плазмохимия, синтез озона, очистка дымовых и загрязненных газов, высоковольтные переключатели и т.д. Среди большого разнообразия разрядов, одним из наиболее перспективных разрядов при атмосферном давлении является безбарьерный разряд с резко неоднородным распределением электрического поля (электродная геометрия типа игла-металлическая плоскость, диэлектрический барьер отсутствует).

В зависимости от приложенного потенциала и геометрических параметров электродной системы безбарьерный разряд атмосферного давления с резко неоднородным распределением электрического поля может характеризоваться либо стационарным, либо нестационарным режимом протекания разрядного тока. Такое поведение разряда обусловлено формированием в разрядном промежутке объемного заряда, величина которого зависит от плотности, подвижности и скорости процессов образования для электронов, положительных и отрицательных ионов. Доминирующим фактором, приводящим к существенному изменению электрических характеристик разряда, является баланс заряженных частиц в разрядном промежутке и, в особенности, учет процессов с участием отрицательных ионов. Однако их влияние на электрические характеристики разряда изучены не достаточно.

В работе представлены результаты исследования влияния электроотрицательных компонент газа на электрические характеристики разряда атмосферного давления в системе электродов игла-плоскость в азотно-кислородной газовой смеси. В работе изучались следующие режимы горения разряда:

- отрицательная полярность (ОП): нестационарный (импульсы Тричела) и стационарный режимы протекания разрядного тока;
- стационарный режим протекания разрядного тока при положительной полярности (СПП);
- нестационарный режим протекания разрядного тока при положительной полярности (НСПП).

Группирование режимов горения разряда на режимы ОП, СПП и НСПП обусловлено отличиями в динамике рождения электронов в области с высокой напряженностью электрического поля (ионизационная область) и прилипания электронов в области с низкой напряженностью электрического поля (дрейфовая область). Таким образом, экспериментальные исследования электрических характеристик разряда в газовых смесях с различным содержанием электроотрицательных компонент и особенности в динамике заряженных частиц для данных режимов разряда позволяют прояснить возможные причины влияния электроотрицательных газов на режимы горения разряда.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляла собой герметичную разрядную камеру (объем 0.4 дм^3) с электродной системой типа игла-плоскость. Расстояние между электродами d составляло $6 \dots 14 \text{ мм}$. Острийный электрод изготавливался из меди или нержавеющей стали. Радиус кривизны острия составлял $0,1 \dots 0,5 \text{ мм}$. Для получения газовых смесей использовались баллоны с техническим азотом ($5\% O_2 + 95\% N_2$), техническим кислородом ($95\% O_2 + 5\% N_2$) и осушенным воздухом (точка росы – 50°C). Увлажнение газовой смеси производилось путем барботирования определенной части газовой смеси через воду. Контроль влагосодержания газовой смеси осуществлялся с помощью измерителя влажности ИВТМ-7. Для добавления озона применялась озонаторная установка, а контроль содержания озона проводился оптическим методом по поглощению озоном излучения на длине волны $\lambda = 253.7 \text{ нм}$. Таким образом, через разрядную камеру

прокачивались либо чистые азотно-кислородные газовые смеси, либо с примесями озона или паров воды. Расход газа во всех экспериментах поддерживался постоянным на уровне 0.6 л/мин и контролировался газовым расходомером типа РМ-064Г. В состав экспериментального стенда входил стабилизированный источник высоковольтного напряжения постоянного тока с диапазоном регулировки напряжения от 1 до 30 кВ. К острейшему электроду прикладывалось постоянное высоковольтное напряжение положительной или отрицательной полярности. Временная динамика разрядных процессов изучалась с помощью калиброванных шунтов 50 Ом и 10 кОм и высоковольтного делителя напряжения РМ-12 (коэффициент деления 1:1000 и полоса пропускания 75 МГц), сигналы с которых подавались на вход осциллографа Tektronix TDS-210.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе исследований были сняты вольт-амперные характеристики для трех режимов горения разряда (ОП, СПП, НСПП) в азотно-кислородной газовой смеси при различных межэлектродных расстояниях и с различным содержанием кислорода, озона и паров воды.

Режим СПП. Данный режим горения разряда характеризуется ионизационными процессами в узкой области вблизи игольчатого анода. Объемный заряд, возникающий в результате лавинных процессов в этой области, искажает внешнее электрическое поле, но величина его не достаточна для экранирования электрического поля анода и возникновения лавинно-стримерного перехода. Т.е. в разрядном промежутке не происходит накопления объемного заряда, и режим горения разряда является стационарным.

На Рис.1 представлены характерные вольт-амперные характеристики (ВАХ) для режима СПП в азотно-кислородных смесях различного состава: а) содержание кислорода 20% и 40%; б) воздух с содержанием паров воды от 0,5 до 9 г/м³; в) осушенный воздух с содержанием озона от фоновой концентрации до концентрации 5 г/м³.

ВАХ в азотно-кислородной газовой смеси не изменяется при увеличении концентрации кислорода (Рис.1,а). Аналогичное поведение ВАХ следует из графиков на Рис.1,б,в, где увеличение содержания паров воды и озона в воздухе не приводит к изменению ВАХ разряда.

Режим ОП. При отрицательной полярности режим горения разряда может быть как стационарным, так и нестационарным, что обусловлено величиной объемного заряда, и определяется ионизационными процессами в узкой области вблизи игольчатого катода. Так как движение электронов происходит по направлению уменьшающегося электрического поля, то максимальная плотность объемного заряда формируется вблизи границы ионизационной области, а затем спадает по направлению к аноду.

На Рис.2 представлены характерные ВАХ для режима ОП в азотно-кислородной смеси различного состава: а) содержание кислорода 20% и 40%; б) воздух с содержанием паров воды от 0,5 до 7 г/м³; в) осушенный воздух с содержанием озона от фоновой концентрации до концентрации 7 г/м³.

Из Рис.2,а видно, что изменение концентрации кислорода от 20 до 40% в азотно-кислородной газовой смеси приводит к повышению разрядного

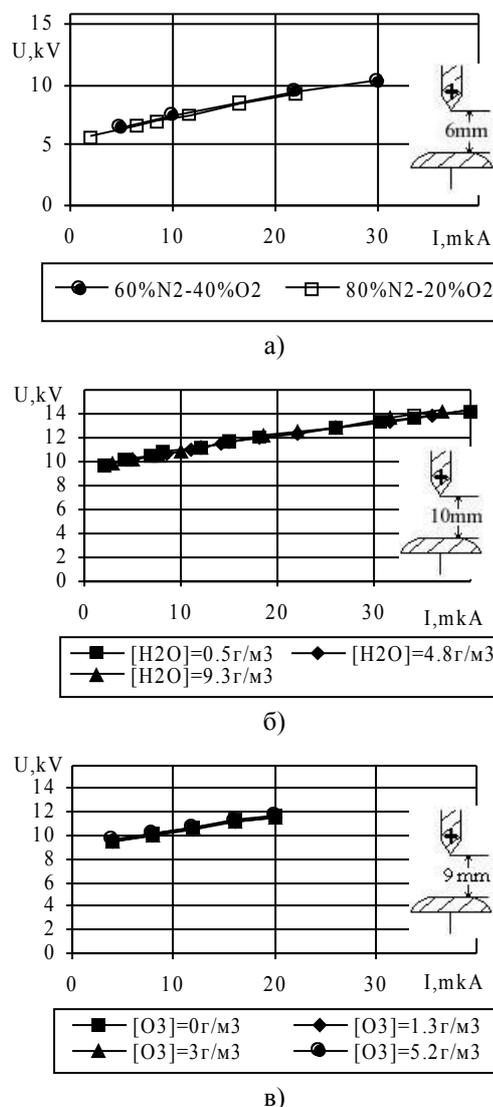


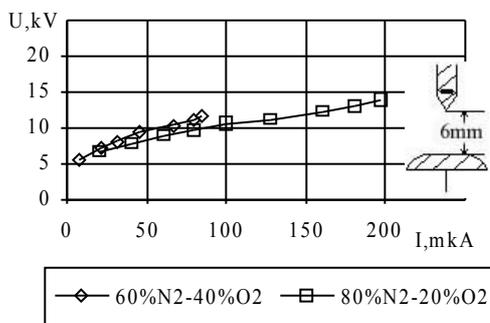
Рис.1. ВАХ в режиме СПП в различных газовых смесях: а) смесь азота и кислорода (газовые смеси 20%O₂+80%N₂, 40%O₂+60%N₂, d = 6 мм); б) воздух с парами воды (d = 9 мм); в) смесь осушенного воздуха с озоном (d = 10 мм)

напряжения на 15%. Более существенное изменение ВАХ разряда в режиме ОП наблюдается при увеличении содержания озона в воздухе, что показано на Рис.2,в.

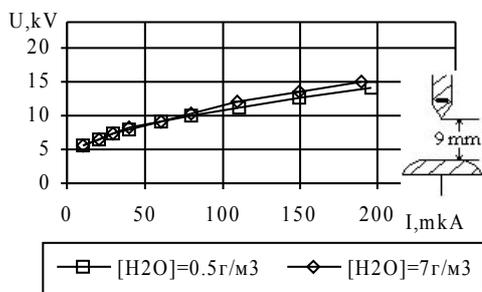
Режим НСПП. Этот режим возникает при положительной полярности на острейшем электроде в случае, когда объемный заряд, формирующийся в сильном электрическом поле игольчатого электрода,

экранирует электрическое поле электрода и приводит к возникновению лавинно-стримерного перехода. В этом режиме через разрядный промежуток распространяются стримеры и разрядный ток носит квазипериодический характер. ВАХ разряда представлена на Рис.3.

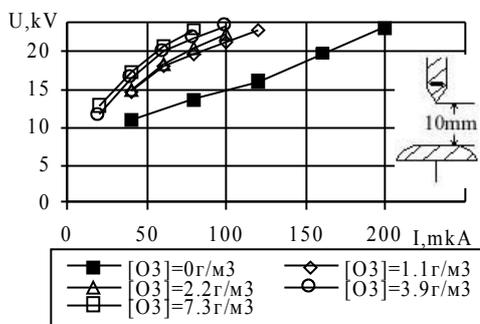
При этом рассматривались два состава газа: а) содержание кислорода 20 и 40%; б) осушенный воздух с различным содержанием озона от фоновой концентрации до 5 г/м³.



а)



б)



в)

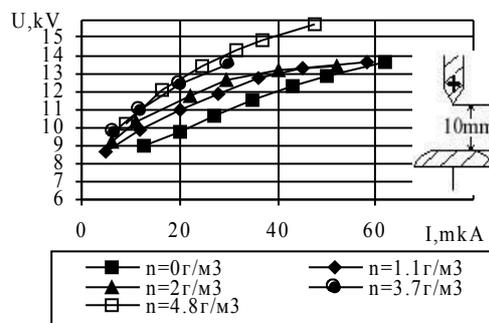
Рис.2. ВАХ в режимах ОП в различных газовых смесях: а) смесь азота и кислорода (газовые смеси 20%O₂+80%N₂, 40%O₂+60%N₂, d = 6 мм); б) воздух с парами воды (d = 9 мм); в) смесь осушенного воздуха с озоном (d = 10 мм)

Как видно из Рис.3,а, увеличение концентрации озона в осушенном воздухе приводит к существенному росту напряжения, приложенного к разрядному промежутку.

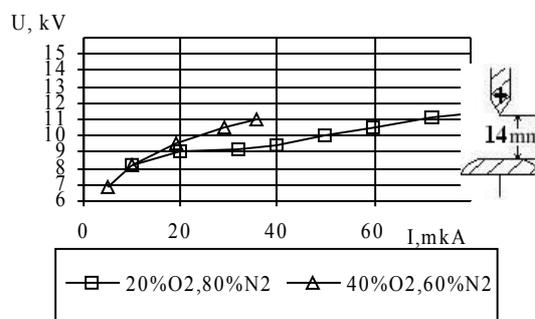
Аналогичное поведение разряда отмечалось в работе [1], в которой исследовалось влияние содержания кислорода в азотно-кислородной газовой смеси на нестационарный режим протекания тока при положительной полярности.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Вносимые в азотно-кислородную газовую смесь электроотрицательные компоненты газа (кислород, пары воды, озон) могут приводить к дополнительным каналам образования отрицательных ионов в разряде, и, как следствие, приводить к уменьшению проводимости разрядного промежутка, за счет прилипания электронов. При этом реакции диссоциативного прилипания (1-5) являются основным источником образования «первичных» отрицательных ионов в разряде атмосферного давления [2,3].

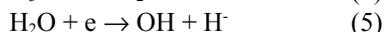
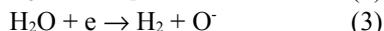
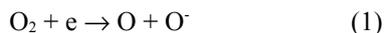


а)



б)

Рис.3. ВАХ в режиме НСПП: а) осушенный воздух с различным содержанием озона; б) азотно-кислородная газовая смесь с различным содержанием кислорода [2]



Оптимальным условием для образования отрицательных ионов в воздухе является наличие в разрядном промежутке области с приведенной напряженностью электрического поля < 120 Td и плотностью электронов, сравнимой с максимальной плотностью электронов в ионизационной области разряда. В этом случае процессы прилипания электронов превалируют над процессами ионизации, и образуется достаточное количество отрицательных ионов, которые существенно изменяют проводимость в разрядном промежутке.

Рассмотрим подробнее физические процессы с участием электронов и условия для образования отрицательных ионов в трех исследуемых режимах разряда.

Режим разряда СПП. Известно, что излучение разряда в режиме СПП является стационарным и сосредоточено в окрестности игольчатого электрода (ионизационная область), в то время как остальная часть промежутка остается темной и является областью дрейфа положительных ионов [4,5]. Действительно распределение электрического поля в разрядном промежутке характеризуется сильной неоднородностью в окрестности игольчатого электрода. Так что на расстоянии от острия порядка нескольких радиусов кривизны игольчатого электрода, электрическое поле резко падает и его величина становится ниже порога ионизации. Это приводит к преобладанию процессов прилипания электронов над процессами их рождения в дрейфовой области промежутка. При положительной полярности на игольчатом электроде из-за резко неоднородного распределения электрического поля плотность электронов уже на расстоянии нескольких длин свободного пробега электронов от острия является малой по сравнению с плотностью электронов непосредственно около острия. Вследствие этого, процессы прилипания электронов к электроотрицательным компонентам газа локализованы в узкой области разрядного промежутка, в которой плотность электронов на несколько порядков меньше, чем максимальная плотность электронов в разряде. Поэтому процессы прилипания не могут существенно влиять на проводимость разрядного промежутка.

Таким образом, добавление кислорода, водяных паров или озона в воздух не приводит к изменению ВАХ в режиме СПП (см. ВАХ Рис.1).

Режим разряда ОП. Процессы ионизации и прилипания электронов в режимах ОП так же, как и для режима СПП, являются локализованными возле игольчатого катода. Разряд, как и в случае СПП, имеет две характерные области – ионизационную и область дрейфа. Существенным отличием режима ОП является то, что движение электронных лавин происходит в направлении уменьшения напряженности электрического поля. Следовательно, максимальная плотность электронов достигается на границе ионизационной области, где сравниваются сечения ионизации и прилипания электронов. Дальнейшее продвижение электронов в дрейфовую область разряда с низкой напряженностью приведенного электрического поля приводит к прилипанию электронов, что существенно влияет на проводимость разрядного промежутка.

Существенное изменение ВАХ для режима ОП при увеличении содержания озона в воздухе обусловлено тем, что в отсутствие озона, основными отрицательными ионами являются ионы кислорода. Тогда как наличие озона в воздухе приводит к изменению ионного состава в разрядном канале. При этом, благодаря большому сечению прилипания электронов к молекуле озона, основными отрицательными ионами становятся отрицательные ионы озона [6]. Подвижность иона озона меньше по сравнению с подвижностью ионов кислорода, что также

уменьшает проводимость токового канала. Таким образом, сильное влияние озона на ВАХ разряда обусловлено тем, что основной токоперенос в разряде осуществляется ионами озона.

Сравнение физических процессов и экспериментальных данных для разряда в режимах СПП и ОП позволяет сделать следующие выводы:

- в режиме СПП не образуется достаточной для изменения электрических характеристик разряда плотности отрицательных ионов, что обусловлено локализацией процессов рождения и гибели электронов в узкой ионизационной области, где сечения процессов прилипания гораздо меньше по сравнению с сечениями ионизации;

- в режиме ОП с ростом концентрации электроотрицательных добавок наблюдается существенное изменение электрических характеристик разряда, что обусловлено изменением проводимости разрядного промежутка из-за прилипания электронов при движении из ионизационной области в окрестности острия, во внешнюю дрейфовую область, в которой преобладают процессы прилипания.

Режим разряда НСПП. Режим НСПП отличается наличием стримеров в разрядном промежутке. Характерной особенностью стримера является сильное электрическое поле, локализованное вблизи головки стримера и сравнимое по величине с внешним электрическим полем. Важным источником затравочных электронов на фронте распространяющегося стримера являются фотоионизационные процессы. Длина поглощения фотоионизационного кванта в воздухе составляет 80...100 мкм, что по порядку величины совпадает с размером ионизационной области, создаваемой объемным зарядом головки стримера. Следовательно, затравочная плотность электронов образуется в полях, где сечения ионизационных процессов преобладают над сечениями прилипательных процессов и прилипанием электронов можно пренебречь. В то же время, в канале стримера напряженность электрического поля мала, а это приводит к существенному росту плотности отрицательных ионов в канале за головкой стримера. Такое рассмотрение согласуется с экспериментами по исследованию излучения распространяющегося стримера. Излучение наблюдается только из области, локализованной вблизи головки стримера.

Таким образом, изменение электрических характеристик нестационарного режима разряда в воздухе с добавками электроотрицательных газов обусловлено процессами гибели (прилипания) электронов в электрическом поле стримерного канала и слабо зависит от прилипания электронов перед фронтом стримера.

ВЫВОДЫ

В результате анализа экспериментальных данных и изучения физических процессов, ответственных за прохождение разрядного тока в различных режимах горения разряда, показано:

- в режиме ОП наблюдается существенное изменение электрических характеристик разряда при уве-

личении концентрации электроотрицательных примесей, что обусловлено изменением проводимости разрядного промежутка из-за прилипания электронов при движении из ионизационной области, вблизи острия, во внешнюю дрейфовую область, в которой превалируют процессы прилипания;

- в режиме СПП, при аналогичных изменениях газового состава, электрические характеристики разряда оставались практически без изменений, так как процессы рождения-гибели электронов локализованы в узкой ионизационной области вблизи острейшего электрода;

- в режиме НСПП наблюдается существенное изменение электрических характеристик разряда с ростом концентрации электроотрицательных добавок, что обусловлено прилипанием электронов в канале стримера, где напряженность электрического поля типична для процессов прилипания;

- в режиме НСПП можно пренебречь процессами прилипания электронов к электроотрицательным компонентам газовой смеси в области перед фронтом распространяющегося стримера.

Работа частично поддержана проектом УНЦ №Р258.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Fujita, Т. Kouno. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1978, v.11, p.2233.
2. Ю.С. Акишев, А.А. Дерюгин, В.Б. Каральник и др. // *Физика плазмы.* 1994, т.20, №6, с.571.
3. И.Н. Косарев, А.Ю. Стариковский // *Физика плазмы.* 2000, т.26, №8, с.747.
4. Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. *Искровой разряд.* 1997, М.: «МФТИ», с.178.
5. V. Golota, B. Kadolin, V. Karas' et al. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Acceleration Methods.* 2004, №3(3), p.254.
6. V. Golota, B. Kadolin, V. Karas' et al. Proc. of the 16 International Symposium on Plasmachemistry, Taormina, Italy, 2003, p.653.

INFLUENCE OF ELECTRONEGATIVE ADMIXTURES ON ATMOSPHERIC PRESSURE DISCHARGE IN N₂-O₂

V.I. Golota, L.M. Zavada, B.B. Kadolin, V.I. Karas', S.N. Mankovsky, I.A. Paschenko, S.G. Pugach

The experimental results of the various modes of the point-to-plane gas discharge are presented in this paper. The discharge was realized in N₂-O₂ gas mixtures at atmospheric pressure. It was shown that ozone, oxygen and water vapour admixtures essentially effected on the electrical characteristics of the negative polarity discharge and the non-stationary positive polarity discharge. With increase of the electronegative admixtures concentration the electrical characteristics of the stationary mode of positive polarity discharge were changed weakly.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОНЕГАТИВНИХ ДОМІШОК НА РОЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ В N₂-O₂

В.І. Голота, Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, В.І. Карась, С.М. Маньковський, І.А. Пащенко, С.Г. Пугач

Представлені результати експериментального дослідження режимів горіння розряду в системі електродів голка-площина. Розряд здійснювався в N₂-O₂ газових сумішах при позитивній та негативній полярності. Показано сильний вплив домішок озона, кисню та пару води на електричні характеристики розряду при негативній полярності та у нестационарному режимі при позитивній полярності. Електричні характеристики у стаціонарному режимі при позитивній полярності слабо змінюються з зростання концентрації електроотрицательних домішок.