

УДК 533. 915

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.А. Лисовский^{1,2}, В.В. Малиновский¹, В.А. Деревянко¹

¹ Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна
61022, Харків, пл. Свободи 4, Україна

² Научний фізико-технологічний центр, 61022, Харків, пл. Свободи 6, Україна

E-mail: lisovskiy@yahoo.com

Received April 4, 2013 accepted May 14, 2013

В данной работе было исследовано влияние диаметра электродов (55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм) на зажигание разряда в азоте и его режимы горения при расстоянии между электродами 25 мм. Получено, что уменьшение диаметра электродов привело при больших давлениях газа к зажиганию разряда при меньших напряжениях, чем для больших электродов, а в диапазоне низких давлений - к смещению кривых зажигания в область более высоких пробойных напряжений. Обнаружено, что все измеренные нами кривые зажигания пересекаются при давлении азота $p \approx 0,9$ Торр, близком к точке перегиба на кривых зажигания для больших электродов. Слева от точки перегиба искажение однородного распределения электрического поля между электродами небольшого диаметра затрудняет процесс ионизационного размножения в разрядном промежутке, и пробойное напряжение возрастает, а справа от точки перегиба в результате перераспределения электрического поля облегчаются условия для пробоя газа. Показано, что расширяющееся разрядное пятно быстро покрывает всю поверхность небольших электродов, поэтому нормальный режим может наблюдаться во всё более узком диапазоне разрядных токов, а уменьшение диаметра электродов снижает скорость роста разрядного тока с повышением напряжения. Отношение нормальной плотности тока к квадрату давления газа при различных диаметрах электродов и разрядных токах было определено из изломов на вольт-амперных характеристиках разряда и примерно равно $(J/p^2)_n \approx 0,233 \text{ mA}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})^2$, что хорошо согласуется с результатами других авторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тлеющий разряд постоянного тока, диаметр электродов, зажигание разряда, нормальный режим, аномальный режим, нормальная плотность тока

EFFECT OF THE FLAT ELECTRODE DIAMETER ON THE IGNITION AND BURNING OF DC DISCHARGE

V.A. Lisovskiy^{1,2}, V.V. Malinovskiy¹, V.A. Derevyanko¹

¹ Kharkov National University, Svobody Sq.4, Kharkov 61022, Ukraine

² Scientific Center of Physical Technologies, Svobody Sq.6, Kharkov 61022, Ukraine

This paper studied the effect of electrode diameter (55 mm, 25 mm, 12 mm, 5 mm, 2.4 mm and 0.8mm) on the ignition of the discharge in nitrogen and its modes of burning at a distance between electrodes 25 mm. The decrease in the electrode diameter was found at large gas pressures to discharge ignition at lesser voltages than for large size electrodes and at low gas pressures to the shift of breakdown curves to higher breakdown voltages. We revealed that all breakdown curves we had registered intersected at the nitrogen gas pressure value of $p \approx 0.9$ Torr close to the inflection point of the breakdown curves for large electrodes. To the left of the inflection point the distortion of the uniform distribution of the electric field between the electrodes of moderate diameter impedes the ionization multiplication within the discharge gap and the breakdown voltage grows, and to the right of the inflection point the conditions for gas breakdown became easier to meet due to the redistribution of the electric field. We found that the expanding discharge spot quickly covered all surface of moderate size electrodes, therefore the normal mode might be observed within a narrowing range of discharge current, whereas the decrease in the electrode diameter lowered the growth rate of the discharge current with the voltage increasing. We employed the dogleg feature of the current-voltage characteristics to determine the ratio of the normal current density to the gas pressure squared for different electrode diameter and gas pressure values to be about $(J/p^2)_n \approx 0.233 \text{ mA}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})^2$ what was in good agreement with the results of other authors.

KEY WORDS: DC glow discharge, the diameter of the electrode, the ignition of the discharge, normal mode, abnormal mode, the normal current density.

ВПЛИВ ДІАМЕТРУ ПЛАСКИХ ЕЛЕКТРОДІВ НА ЗАПАЛЮВАННЯ ТА ГОРІННЯ РОЗРЯДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В.О. Лісовський^{1,2}, В.В. Малиновський¹, В.О. Дерев'яноко¹

¹ Харківський національний університет, 61022, Харків, пл. Свободи 4, Україна

² Науковий фізико-технологічний центр, 61022, Харків, пл. Свободи 6, Україна

В цій роботі було досліджено вплив діаметра електродів (55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм і 0,8 мм) на запалювання розряду в азоті і його режими горіння при відстані між електродами 25 мм. Отримано, що зменшення діаметра електродів призвело при великих тисках газу до запалювання розряду при менших напругах, ніж для великих електродів, а в діапазоні низьких тисків - до зміщення кривих запалювання в область більш високих пробійних напруг. Виявлено, що всі виміряні нами криві запалювання перетинаються при тиску азоту $p \approx 0,9$ Торр, близькому до точки перегину на кривих запалювання для великих електродів. Зліва від точки перегину викривлення однорідного розподілу електричного поля між електродами невеликого діаметра ускладнює процес іонізаційного розмноження в розрядному проміжку, і пробійна напруга зростає, а праворуч від точки перегину в результаті перерозподілу електричного поля полегшуються умови для пробоя газу. Показано, що розрядна пляма, що розширюється, швидко вкриває всю поверхню невеликих електродів, тому нормальний

режим може спостерігатися у все більш вузькому діапазоні розрядних струмів, а зменшення діаметра електродів знижує швидкість зростання розрядного струму з підвищенням напруги. Відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу при різних діаметрах електродів і розрядних струмах було визначено зі зламів на вольт-амперних характеристиках розряду і приблизно дорівнює $(j/p^2)_n \approx 0,233 \text{ mA}/(\text{cm-Torr})^2$, що добре узгоджується із результатами інших авторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: тліючий розряд постійного струму, діаметр електродів, запалювання розряду, нормальний режим, аномальний режим, нормальна щільність струму.

Тлеющий разряд постоянного тока широко используется в таких приборах тлеющего разряда, как газоразрядные стабилизаторы напряжения (стабилитроны), а также выпрямители с тлеющим разрядом и др. [1]. Для того чтобы корректно применять тлеющий разряд, необходимо знать условия его существования и количественные характеристики в различных газах, при различных размерах электродов, поэтому этот вопрос уже давно исследуется рядом научных групп [2, 3].

Как известно [2, 3], тлеющий разряд постоянного тока может гореть в нормальном и аномальном режимах. Нормальный режим наблюдается в диапазоне токов $10^{-4} - 10^{-1} \text{ A}$, его вольт-амперная характеристика представляет собой прямую, параллельную оси тока. В нормальном режиме только часть поверхности катода покрыта разрядом, с увеличением силы тока часть поверхности, занимаемая разрядом, возрастает, при этом плотность тока остается постоянной. Поверхность катода, покрытая свечением, пропорциональна силе тока в трубке, так что при увеличении или уменьшении силы тока плотность тока заметно не изменяется. Вместе с тем остаётся постоянным и катодное падение потенциала, это катодное падение называется нормальным катодным падением. Когда вся поверхность катода покрывается свечением, разряд переходит в аномальный режим с возрастающей вольт-амперной характеристикой.

В работах [3, 4] утверждается, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от минимума кривой зажигания тлеющего разряда (т.е. при $pL \geq (pL)_{\min}$, где L – расстояние между электродами, p – давление газа), а при меньших давлениях тлеющий разряд горит только в аномальном режиме. В то же время характеристики катодного слоя (катодное падение напряжения U_c , толщину катодного слоя d_c , отношение плотности тока к квадрату давления газа j/p^2) тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте были измерены в работе [5] и получено, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда. Авторы [5] заметили, что пороговое давление p_n для появления нормального режима горения находится справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда. Этот вывод они подтвердили измерениями вольт-амперных характеристик разряда, а также визуальными наблюдениями свечения разряда вблизи катода. Полученный в [5] результат объясняется тем, что переход из таунсендовского разряда в тлеющий происходит таким образом, что слева от точки перегиба перераспределение потенциала (вызванное возмущением вакуумного поля E_{dc} возникающим пространственным зарядом) приводит к затруднению размножения электронов, в то время как справа от точки перегиба размножение электронов облегчается благодаря перераспределению потенциала, и разряд может гореть при меньших напряжениях. Следовательно, нормальный режим горения может наблюдаться только вблизи и справа от точки перегиба. Однако теоретическими выкладками этот вывод не был подтвержден.

Для параметров нормального тлеющего разряда (катодного падения потенциала U_n и плотности тока j_n) в случае геометрически подобных трубок, заполненных одним и тем же газом, при одном и том же материале электродов должны выполняться следующие законы подобия: а) $U_n = \text{const}$ не зависит от силы тока нормального тлеющего разряда и давления газа, б) $j_n/p^2 = \text{const}$ (нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате, является независимым параметром от величины разрядного тока), в) произведение давления газа и длины прикатодного слоя также не зависит от величины разрядного тока ($pl_n = \text{const}$) [6, 7]. После того, как вся поверхность катода оказывается покрытой разрядом, наблюдается переход к аномальному режиму горения, в котором соблюдаются иные законы подобия: $U = f_1(j/p^2)$, $pl = f_2(j/p^2)$ [3, 7]. В работе [8] приведена модель, которая описывает поведение величины j/p^2 (плотность тока, деленная на квадрат давления газа) в зависимости от величины катодного падения потенциала. Ward [9] с помощью численного моделирования показал, что существует постоянное значение плотности тока в нормальном тлеющем разряде, которое обеспечивает оптимальный уровень ионизации в катодном слое, что могло бы объяснить постоянство значения нормального напряжения, благодаря которому разрядное пятно с увеличением тока расширяется на катоде. Однако в нормальном тлеющем разряде могут наблюдаться отклонения от законов подобия [6, 10, 11].

В ряде работ экспериментально и с помощью численного моделирования изучалось поведение такого параметра в тлеющем разряде, как нормальное катодное падение напряжения U_n [12-17].

Имеется ряд работ, посвященных изучению радиальной структуры нормального режима разряда постоянного тока [17-25]. Авторами [21] было показано, что стабильность разряда, горящего в нормальном режиме, может быть объяснена наличием радиального электрического поля на границе плазма-слой, благодаря которому электроны удерживаются в плазменном столбе. Для исследования самостоятельных разрядов Voeuf [22] разработал двумерную модель, которая хорошо отображает характерные черты нормального режима и переход от нормального к аномальному режиму горения тлеющего разряда постоянного тока, учитывая влияние радиального электрического поля. Радиальное электрическое поле, которое образуется на границе плазма – слой, выталкивает электроны по направлению к центру отрицательного свечения тлеющего разряда, а

ионы - от центра.

Несколько работ посвящено изучению условий появления нормального режима разряда постоянного тока [5, 26-30]. В работе [26] аналитически показано, что на правой ветви кривой Пашена справа от точки перегиба относительно малое возмущение однородности поля, обусловленное пространственным зарядом, приводит к падающей вольт-амперной характеристике таунсендовского разряда и, как следствие, к его неустойчивости. Следствием этого является шнурование разряда и установление нормальной плотности тока, при которой разряд занимает только часть поверхности катода. В работе [27] построена математическая модель, при помощи которой получены вольт - амперные характеристики, описывающие различные формы горения тлеющего разряда постоянного тока. Обзорная работа [29] посвящена обобщению результатов моделирования газовых разрядов низкого давления и, в частности, изучению нормального режима постоянного тока.

В большинстве работ тлеющий разряд зажигался между плоскими параллельными электродами равной площади, занимающими всё поперечное сечение разрядной трубки. Однако практически в литературе нет данных, которые показывают влияние размеров плоских электродов на параметры плазмы разряда постоянного тока в коротких разрядных трубках. В связи с этим целью данной работы было изучить влияние размеров плоских катода и анода на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для изучения влияния размеров плоских электродов на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока использовалась разрядная камера, схема которой показана на рис.1. Внутренний диаметр камеры был равен 56 мм. Эксперименты проводились с плоскими электродами из нержавеющей стали, диаметр которых был равен 55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм. Расстояние между электродами было 25 мм. Это расстояние немного меньше радиуса разрядной трубки, поэтому для наибольшего диаметра электродов 55 мм распределение электрического поля в камере можно считать однородным. В этом случае справедлив закон Пашена [31-33] для зажигания разряда, что облегчает анализ полученных результатов и сравнение с данными других авторов.

Азот подавался в камеру с помощью системы напуска газа СНА-1. Для регистрации давления газа в диапазоне от 10^{-3} Торр до атмосферного был использован вакуумный термо-электрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного насоса, что обеспечивало предельный вакуум порядка 10^{-3} Торр. Источник постоянного напряжения подключался к катоду, а анод был заземлен. В разрядную цепь подключалось внешнее сопротивление величиной 50 кОм, которое ограничивало ток и препятствовало возникновению катодных пятен. Эксперименты проводились при давлениях азота $p = 0,1 - 10$ Торр в диапазоне постоянного напряжения $U_{dc} \leq 3000$ В.

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОДОВ НА ЗАЖИГАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для зажигания тлеющего разряда необходимо, чтобы скорость рождения заряженных частиц вследствие ионизации молекул газа электронным ударом и вторичной ион-электронной эмиссии из поверхности катода была равна скорости потерь на стенках трубки вследствие диффузии и дрейфового ухода на электроды. Этот баланс должен выполняться в разрядных камерах любой геометрии.

На рис. 2 приведены кривые зажигания тлеющего разряда в азоте в камере, показанной на рис. 1, измеренные для различных диаметров электродов. Из рисунка видно, что кривые зажигания для диаметров 25 мм и 55 мм практически совпадают. Кривая зажигания, измеренная для диаметра электродов $D = 12$ мм, в диапазоне давлений азота менее 2 Торр близка к кривым зажигания для больших диаметров, но при высоких давлениях газа при $D = 12$ мм для зажигания разряда необходимы меньшие напряжения. Уменьшение диаметра электродов до $D = 5$ мм привело в диапазоне низких давлений к смещению кривой зажигания в область более высоких пробойных напряжений и увеличению давления газа в её минимуме. При давлениях азота выше 1 Торр эта кривая зажигания проходит заметно ниже, чем перечисленные выше кривые для больших диаметров электродов. При дальнейшем уменьшении диаметра электродов при низких давлениях газа для зажигания разряда нужно приложить гораздо большие напряжения, а минимум кривых зажигания становится более пологим и смещается в диапазон высоких давлений. В то же время при больших давлениях газа зажигание разряда между электродами малого диаметра происходит при напряжениях, меньших, чем для больших электродов.

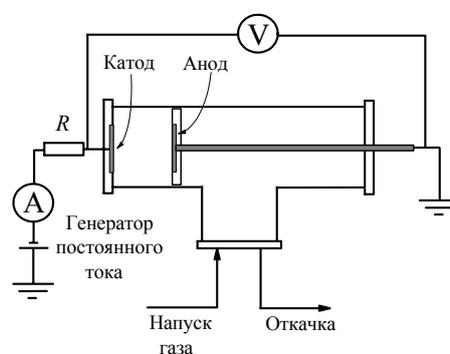


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

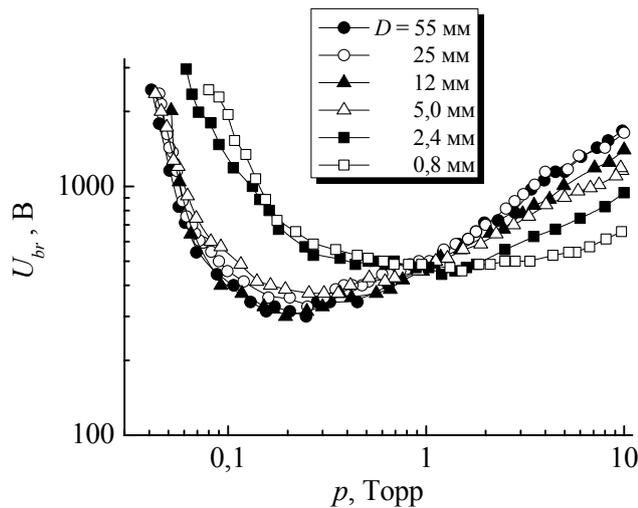


Рис.2. Кривые зажигания разряда постоянного тока в азоте при диаметрах электродов 55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм.

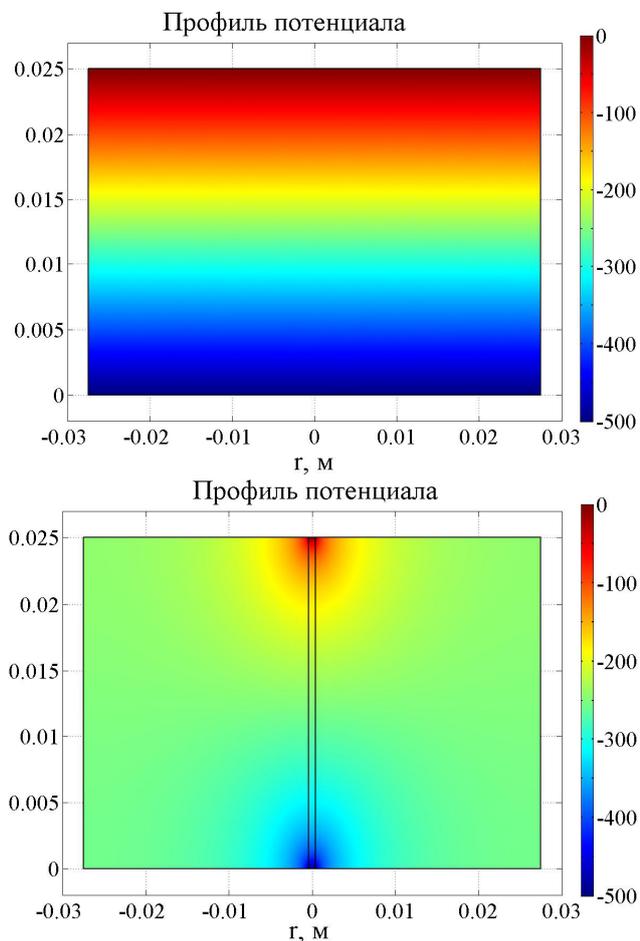


Рис. 3. Профили потенциала для диаметров электродов 55 мм и 0,8 мм.

процессы, принимающие участие в пробое газа.

На рис. 3 показаны профили потенциала, рассчитанные с помощью программы FemLab для электродов диаметром 55 мм и 0,8 мм. Соответственно, на рис.4 представлены осевые распределения потенциала и напряжённости электрического поля между этими же электродами. Из рисунков видно, что потенциал линейно изменяется между электродами большого диаметра, а поле сохраняется постоянным. Однако в случае маленьких электродов наблюдается сильная нелинейность потенциала.

Из рис. 2 видно, что все измеренные кривые зажигания пересекаются при давлении азота $p \approx 0,9$ Торр. Примерно при этом давлении кривые зажигания для больших электродов имеют точку перегиба. В случае однородного электрического поля E , которое наблюдается между плоскими электродами большого диаметра с небольшим расстоянием между ними, критерий пробоя газа в постоянном электрическом поле имеет вид

$$\gamma \cdot [e^{\alpha \cdot L} - 1] = 1, \quad (1)$$

где γ - коэффициент ион-электронной эмиссии материала катода, L - расстояние между электродами, α - первый коэффициент Таунсенда

$$\alpha = p \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right), \quad (2)$$

A и B - константы, зависящие от сорта газа (в книге Райзера [2] приведены для азота следующие значения констант $A = 12 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Торр}^{-1}$ и $B = 342 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Торр})$). Подставив (2) в (1), получим выражение для пробойного напряжения

$$U = \frac{B \cdot p \cdot L}{\ln(A \cdot p \cdot L/\Gamma)}, \quad (3)$$

где $\Gamma = \ln((1+\gamma)/\gamma)$. Дважды про дифференцируем (3) по p и найдём давление газа в точке перегиба

$$p_{\text{inf}} = \frac{\Gamma \cdot e^2}{A \cdot L}, \quad (4)$$

e - основание натуральных логарифмов. Неизвестный коэффициент ион-электронной эмиссии материала катода γ определим из измеренных координат минимума кривой зажигания для диаметра электродов 55 мм ($U_{\text{min}} \approx 300 \text{ В}$, $p_{\text{min}} \approx 0,2 \text{ Торр}$) с помощью формулы (3)

$$\Gamma = A \cdot p_{\text{min}} \cdot L \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot p_{\text{min}} \cdot L}{U_{\text{min}}}\right), \quad (5)$$

откуда имеем $\Gamma = 3,39$, $\gamma = 0,035$. Тогда из формулы (4) для расстояния между электродами $L = 25 \text{ мм}$ получим давление в точке перегиба $p_{\text{inf}} = 0,835 \text{ Торр}$, которое хорошо согласуется с давлением пересечения всех измеренных кривых зажигания.

На кривых зажигания, как измеренных, так и теоретически определенных, точка перегиба обычно не видна. Она появляется при анализе уравнения (3) вследствие сложной зависимости пробойного напряжения U от произведения давления газа и зазора между электродами pL . Но, как будет показано ниже, положение точки перегиба оказывает значительное влияние на

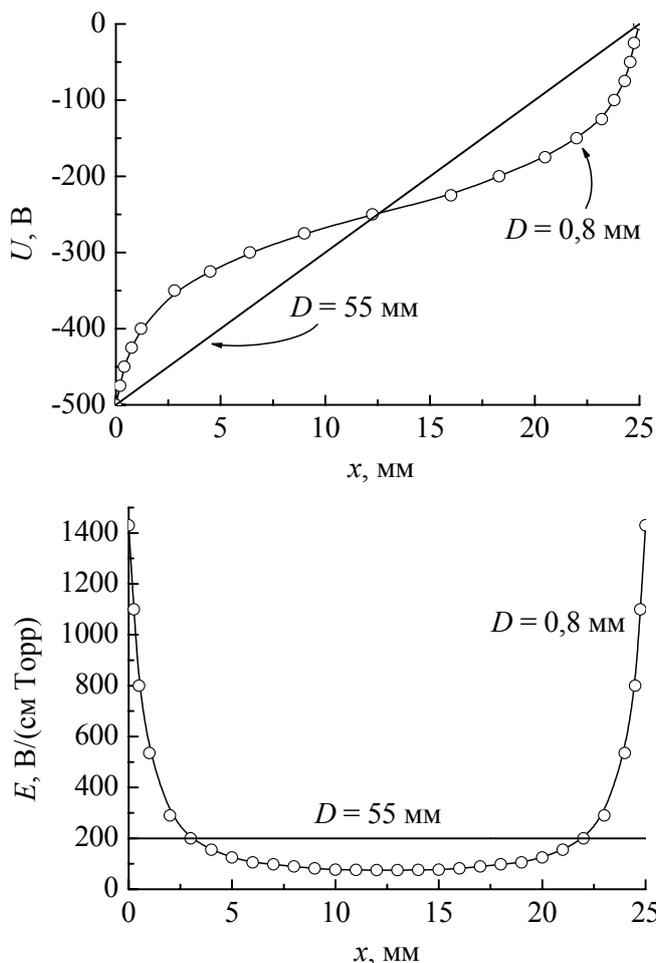


Рис. 4. Осевые распределения напряженности электрического поля и потенциала для диаметров электродов 55 мм и 0,8 мм.

потенциала между электродами, если напряжение между электродами $U = \left| \int_0^L E dx \right|$ одинаково для случаев

однородного и неоднородного распределений электрического поля, облегчает условия для пробоя газа, так как усиленное поле добавляет в интеграл (6) больше, чем ослабленное отнимает. Слева от точки перегиба ($E > Bp/2$) в результате перераспределения электрического поля процесс ионизационного размножения в разрядном промежутке затрудняется и пробойное напряжение возрастает, что и видно на рис. 2.

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОДОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Теперь рассмотрим вольт-амперные характеристики разряда, измеренные при различных диаметрах электродов в широком диапазоне давлений газа и представленные на рис.5. При диаметре электродов 55 мм и давлениях азота менее 0,4 Торр разряд горел только в аномальном режиме, покрывая полностью поверхность электродов, при этом рост тока сопровождался ростом напряжения. Начиная с давления 0,4 Торр, при малых токах наблюдался также нормальный режим, в котором катод был покрыт только частично разрядом, а рост тока был вызван расширением разрядного пятна по поверхности катода при слабо изменяющемся напряжении между электродами. С ростом давления газа нормальный режим существует в более широком диапазоне разрядных токов. И при максимальном исследованном давлении азота 5 Торр разряд во всём исследованном диапазоне токов горел только в нормальном режиме.

Анализ приведенных на рис.5 результатов показывает, что уменьшение диаметра электродов снижает скорость роста разрядного тока с повышением напряжения. Расширяющееся разрядное пятно быстрее покрывает всю поверхность небольших электродов, поэтому нормальный режим может наблюдаться во всё более узком диапазоне разрядных токов. Так как при низких давлениях газа зажигание и поддержание разряда между малыми электродами было затруднено, то на рис.5д и е вольт-амперные характеристики представлены только для достаточно больших давлений азота.

Напряжённость электрического поля максимальна вблизи электродов, но при удалении от их поверхности быстро уменьшается. Так, если при напряжении между электродами 500 В и зазоре 2,5 см поле однородно и равно 200 В/см для больших электродов, то для диаметра электродов 0,8 мм напряжённость поля минимальна в центре разрядного промежутка и достигает 75 В/см.

Условием пробоя газа в плоском промежутке в случае неоднородного поля является [2]

$$\int_0^L \alpha [E(z)] dz = \ln(1 + 1/\gamma) \quad (6)$$

В электронной лавине, которая распространяется от катода к аноду, должно рождаться определённое число ион-электронных пар. Это число определяется только коэффициентом вторичной ион-электронной эмиссии и не зависит от того, происходит пробой в однородном или сильно неоднородном поле. Интеграл в формуле (6) в точности равен значению произведения $\alpha \cdot L$, соответствующему пробойному напряжению данного промежутка в однородном поле между большими плоскими электродами. В слабых электрических полях при росте E первый коэффициент Таунсенда α (2) увеличивается с нарастающей скоростью, а в очень сильных – скорость роста α уменьшается. Точка перегиба $\alpha(E)$ находится при напряжённости электрического поля $E = Bp/2$. Справа от точки перегиба неискажённое пробивающее поле $E < Bp/2$, а перераспределение

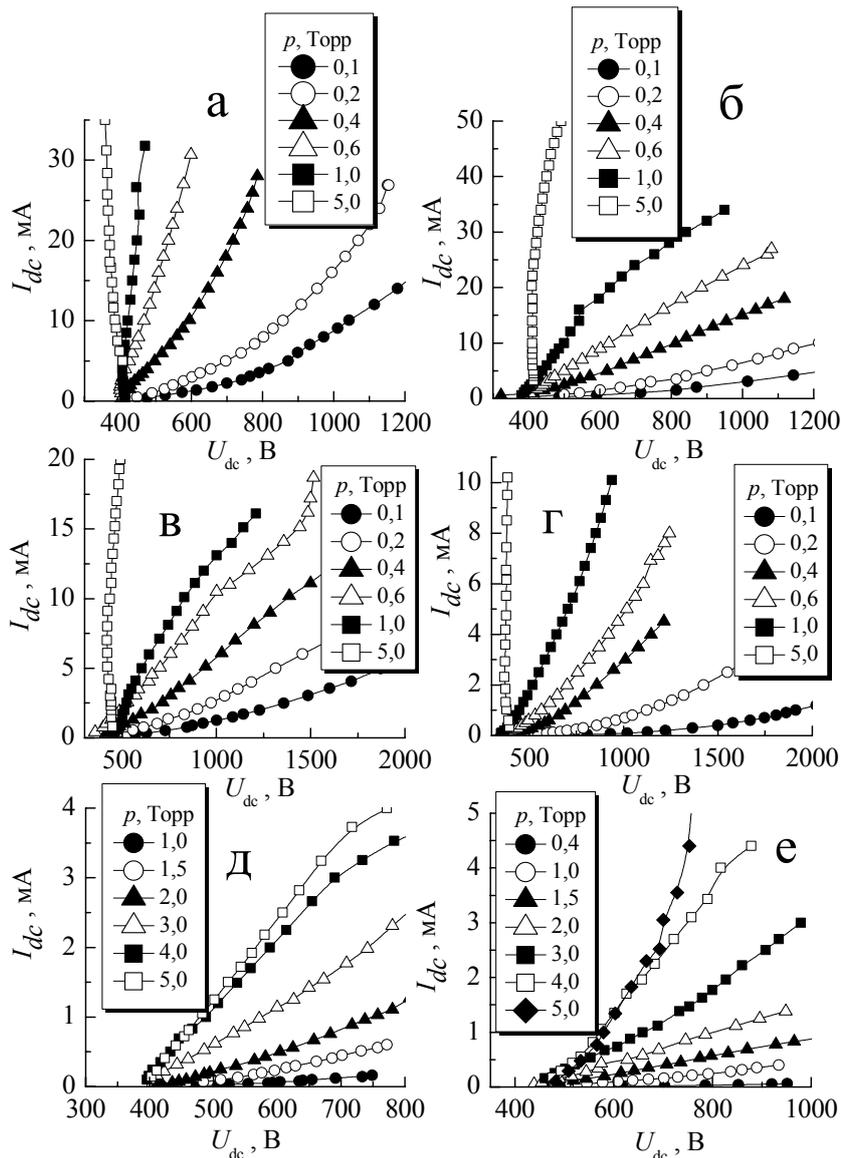


Рис.5. Вольт-амперные характеристики разряда при диаметрах электродов: а - 55 мм, б - 25 мм, в - 12 мм, г - 5 мм, д - 2,4 мм, е - 0,8 мм.

Теперь рассмотрим вольт-амперные характеристики разряда для нескольких фиксированных давлений газа и различных диаметров электродов.

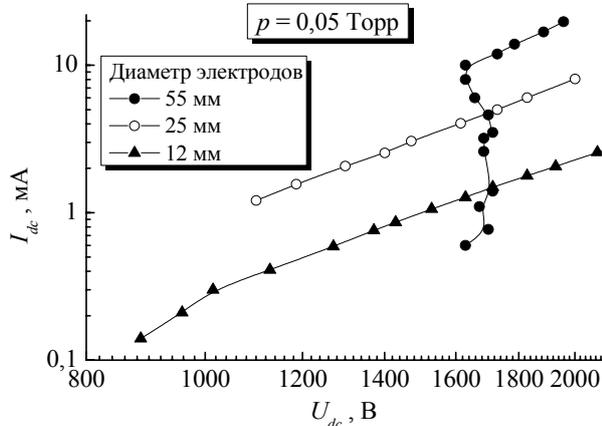


Рис.6. Вольт-амперные характеристики разряда при давлении азота 0,05 Торр и диаметрах электродов 55 мм, 25 мм и 12 мм.

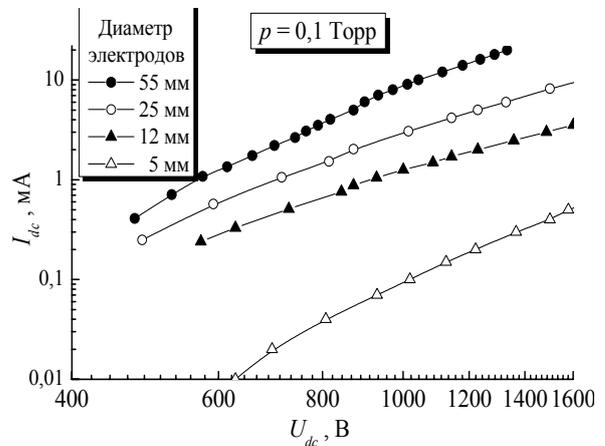


Рис.7. Вольт-амперные характеристики разряда при давлении азота 0,1 Торр и диаметрах электродов 55 мм, 25 мм, 12 мм и 5 мм.

На рис.6 показаны результаты для давления азота 0,05 Торр. Из рисунка видно, что для диаметра

электродов 55 мм при токах менее 10 мА разряд горит в затруднённом режиме. Особенностью такого режима является то, что разряд состоит только из катодного слоя, который полностью не помещается в зазоре между электродами, и для его поддержания нужны высокие напряжения [30, 34-40]. При достаточно большом разрядном токе вблизи анода формируется отрицательное свечение, и разряд переходит из затруднённого в аномальный режим. Если электроды не перекрывают всё поперечное сечение разрядной трубки, то затруднённый разряд не наблюдается и возможно горение аномального режима при более низких напряжениях между электродами. Это происходит потому, что на краях малых электродов силовые линии электрического поля более длинные, чем вблизи их оси, что облегчает процесс ионизации. Отметим также, что скорость роста разрядного тока одинакова для различных значений диаметров электродов.

На рис. 7 представлены вольт-амперные характеристики тлеющего разряда при давлении азота 0,1 Торр. В этом случае разряд горел не в затруднённом, а только в аномальном режиме. При этом давлении газа скорость роста разрядного тока также была примерно одинакова для различных значений диаметров электродов.

При давлении газа 1 Торр нормальный режим горения виден только на вольт-амперной характеристике для диаметра электродов 55 мм (рис. 8). Электроды меньших диаметров были полностью покрыты разрядом уже при самых низких токах, поэтому нормального режима для них не наблюдалось. Уменьшение диаметра электродов приводит к быстрому снижению разрядного тока.

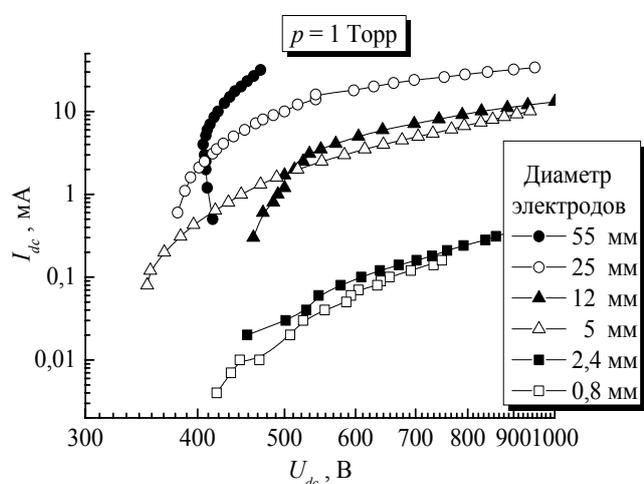


Рис.8. Вольт-амперные характеристики разряда при давлении азота 1 Торр и диаметрах электродов 55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм.

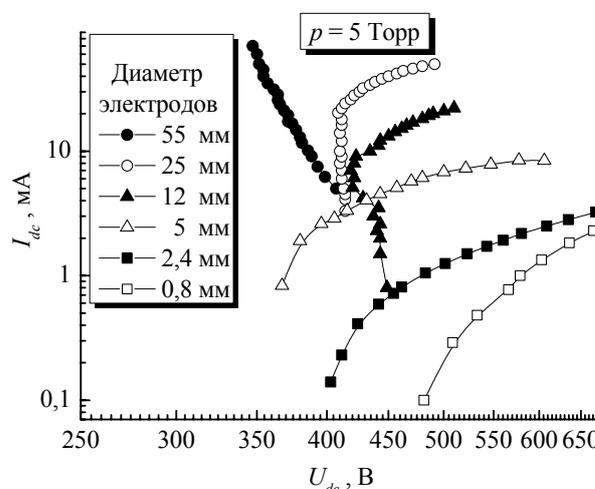


Рис.9. Вольт-амперные характеристики разряда при давлении азота 5 Торр и диаметрах электродов 55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм.

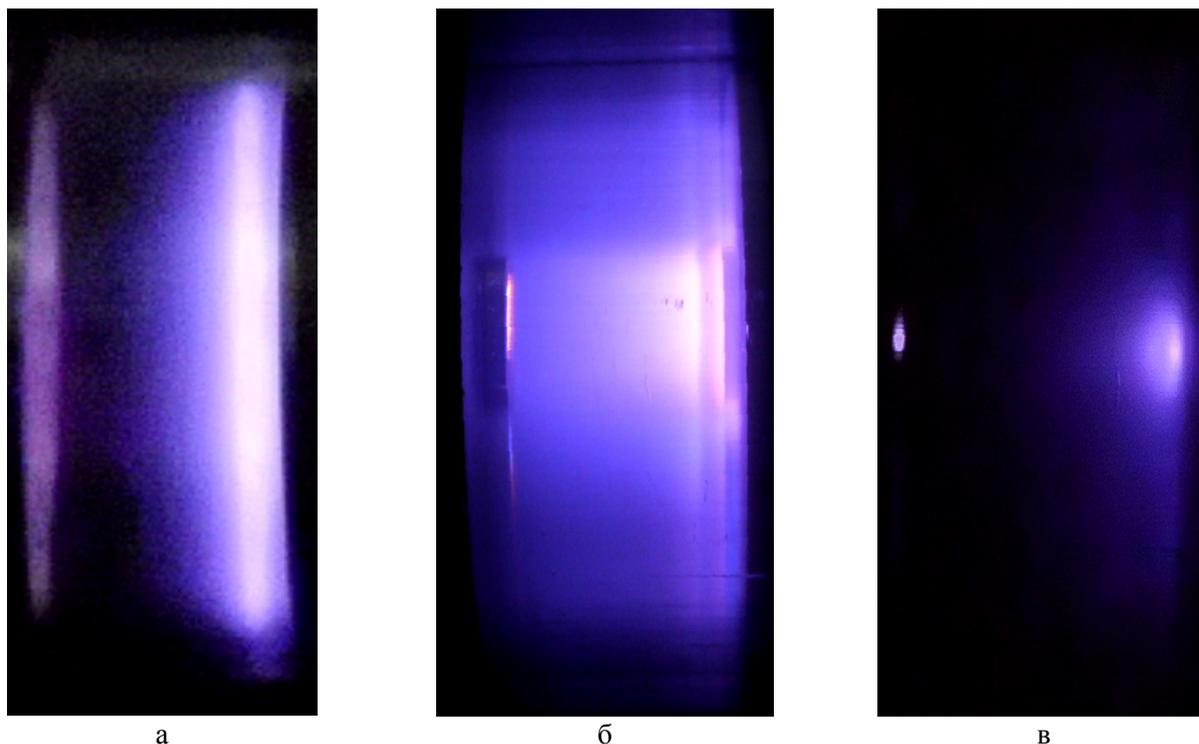


Рис. 10. Фотографии разряда при давлении азота 1 Торр и диаметрах электродов 55 мм, 12 мм и 0,8 мм.

При давлении газа 5 Торр разрядный шнур был узким и во всём исследованном диапазоне токов покрывал только часть поверхности электродов диаметром 55 мм, поэтому разряд горел в ярко выраженном нормальном режиме (рис. 9). Для электродов диаметром 25 и 12 мм вольт-амперные характеристики состоят из двух частей, соответствующих нормальному и аномальному режимам с резко выраженным переходом между ними. Для электродов диаметром 5 мм и менее нормальный режим не наблюдался, а монотонный рост тока с напряжением указывает на существование только аномального режима горения тлеющего разряда.

Фотографии разряда для диаметров электродов 55 мм, 12 мм и 0,8 мм и фиксированном давлении газа 1 Торр показаны на рис.10, при этом катод располагался справа, а анод слева. Во всех случаях, показанных на фотографиях, разряд горел в аномальном режиме, покрывая полностью поверхность электродов. Вблизи катодов видны тонкие катодные слои, которые затем переходят в протяжённое отрицательное свечение. Ближе к анодам наблюдаются тёмные фарадеевы пространства, а к самим анодам прижимаются анодные свечения.

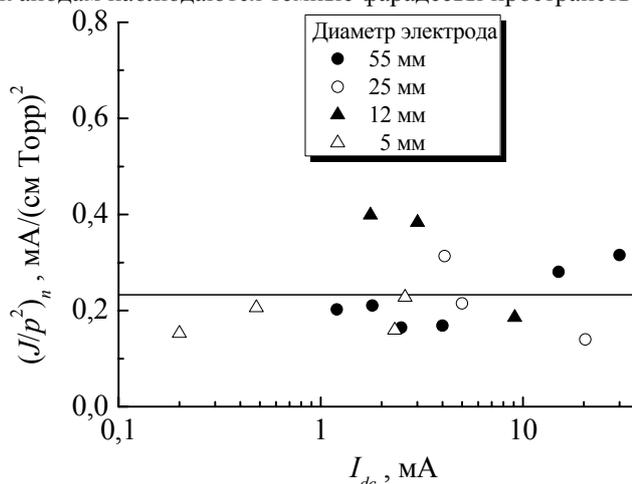


Рис.11. Зависимость отношения нормальной плотности тока к квадрату давления газа от разрядного тока для различных диаметров электродов.

Отношение нормальной плотности тока к квадрату давления газа при различных диаметрах электродов и разрядных токах было определено из вольт-амперных характеристик, приведенных на рисунках 5, 8 и 9. В нормальном режиме рост тока происходит при постоянном или даже уменьшающемся напряжении на электродах, а после полного покрытия поверхности катода дальнейший рост разрядного тока может происходить только при повышении напряжения. Этому переходу из нормального в аномальный режим на вольт-амперной характеристике соответствует хорошо выраженный излом. Разделив величины разрядного тока в этом изломе на площадь электрода и квадрат давления газа, можно получить значения параметра подобия $(J/p^2)_n$, приведенные на рис. 11. Показанные на рисунке результаты хорошо описываются постоянным значением $(J/p^2)_n \approx 0,233 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$. Авторы работы [40]

для азота и катода из нержавеющей стали получили значение $(J/p^2)_n \approx 0,32 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$, при этом они находили нормальную плотность тока, фотографируя разрядное пятно на катоде и определяя его площадь при известных величинах тока и давлениях газа. Измеряя ток в момент полного покрытия катода нормальным разрядом при различных давлениях азота в широком диапазоне расстояний между электродами, авторы [41] определили величину отношения нормальной плотности тока к квадрату давления газа $(J/p^2)_n \approx 0,22 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$. Следовательно, можно сделать вывод, что наши экспериментальные результаты близки к данным, полученным другими авторами.

ВЫВОДЫ

В данной работе было исследовано влияние диаметра электродов на пробой газа и режимы горения разряда в азоте при расстоянии между электродами 25 мм. Эксперименты проводились с плоскими электродами диаметром 55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм и 0,8 мм.

Были измерены кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока. Показано, что уменьшение диаметра электродов привело в диапазоне низких давлений к смещению кривых зажигания в область более высоких пробойных напряжений, а при больших давлениях газа зажигание разряда между электродами малого диаметра происходит при напряжениях, гораздо меньших, чем для больших электродов.

Получено, что все измеренные кривые зажигания пересекаются при давлении азота $p \approx 0,9$ Торр, которое хорошо соответствует положению точки перегиба на кривых зажигания для больших электродов. Справа от точки перегиба искажение однородного распределения электрического поля между электродами небольшого диаметра облегчает условия для пробоя газа, а слева от точки перегиба в результате перераспределения электрического поля процесс ионизационного размножения в разрядном промежутке затрудняется и пробойное напряжение возрастает.

Показано, что уменьшение диаметра электродов снижает скорость роста разрядного тока с повышением напряжения. Расширяющееся разрядное пятно быстрее покрывает всю поверхность небольших электродов, поэтому нормальный режим может наблюдаться во всё более узком диапазоне разрядных токов.

Из изломов на вольт-амперных характеристиках разряда определены значения параметра подобия $(J/p^2)_n$ для нормального режима разряда, которые хорошо описываются постоянным значением $(J/p^2)_n \approx 0,233 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$ и удовлетворительно согласуются с результатами других авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Katsnelson B.V., Kalugin A.M., Larionov A.S. Electric vacuum electron and ion devices. - Moscow: Energy, 1976. - 920p.
2. Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics. - Berlin: Springer, 1991. - 449 p.
3. Granovskiy V.L. Electric Current in a Gas. Steady-State Current. - Moscow: Nauka, 1971. - 490 p.
4. Vlasov V.V., Gyseva L.G., Klarfeld B.N. Transition of one type glow discharge into another // Oxford Contrib. Papers, 10th ICPiG. - 1971. - P. 98.
5. Lisovsky V.A., Yakovin S.D. Scaling Law for a Low-Pressure Gas Breakdown in a Homogeneous DC Electric Field // JETP Letters. - 2000. - Vol. 72, № 2. - P. 34-37.
6. Chistyakov P.N. Scaling laws in the normal glow discharge in neon and argon // Zhurn. Tekhn. Fiz. - 1971. - Vol. 41, № 8. - P. 1672-1674.
7. Korolev Yu.D. Interpretation of the phenomenon of constancy of the current density in the normal glow discharge// Sov. Phys. Tech. Phys. - 1987. - Vol.32, №2. - P. 231-233.
8. Fujii K. Transition mechanism from Townsend discharge to normal glow discharge // J. Appl. Phys. - 1973. - Vol. 13, № 3. - P. 573-574.
9. Ward A. Calculations of Cathode-Fall Characteristics // J. Appl. Phys. - 1962. - Vol. 33, № 9. - P. 2789-2796.
10. Cicala G., Tommaso E., Raino A.S., Lebedev Yu. A., Shakhmatov V.A. Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission spectroscopy and numerical simulation // Plasma Sources Sci. Technol. - 2009. - Vol. 18, №2. - P. 025032.
11. Nemchinsky V. A. Method to decrease the normal current density at the cathode of a glow discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1993. - Vol. 26, № 4. - P. 643-646.
12. Chistyakov P.N. Some dependencies of the normal cathode fall in inert gases // Zhurn. Tekhn. Fiz. - 1970. - Vol. 40, № 2. - P. 303-304.
13. Tran N., Marode E. Monte Carlo simulation of electrons within the cathode fall of a glow discharge in helium // Journal of Physics D: Applied Physics. - 1977. - Vol. 10, №16. - P. 2317-2328.
14. Kulikovskiy A.A. Hydrodynamic description of electron multiplication in the cathode region: elementary beams model // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1991. - Vol. 24, № 11. - P. 1954-1963.
15. Ward A. Effect of space charge in cold-cathode gas discharges // Phys. Rev. - 1958. - Vol. 112, № 6. - P. 1852-1857.
16. Guntherschulze A. Zusammenhang zwischen stromdichte und kathodenfall der Glimmentladung bei verwendung einer schutzringkathode und korrektion der temperaturerhöhung des gases // Mitteilung aus der Physikalisch - Technischen Reichsanstalt. - 1928. - Vol.26. - P. 358-379.
17. Melekhin V.N., Naumov N.Yu. On the nature of the cathode spot of a normal glow discharge// Sov. Tech. Phys. Lett. 1986. - Vol. 12, № 2. - P. 41-44.
18. Raizer Yu.P., Surzhikov S.T. More on the nature of the normal current density at the cathode of a glow discharge // Sov. Tech. Phys. Lett. 1987. - Vol.13, №3. - P. 186-188.
19. Petrovic Z.Lj., Phelps A.V. Constrictions in cathode-dominated, low-pressure argon discharges // IEEE Trans. Plasma Science - 1996. - Vol. 24, №1. - P. 107-108.
20. Petrovic Z.Lj., Donko Z., Maric D., Malovic G., Živanov S. CCD images of low-pressure low-current dc discharges // IEEE Trans. Plasma Science - 2002. - Vol. 30, № 1. - P. 136-137.
21. Engel A., Emeleus K.G., Kennedy M. Radial coherence of the normal glow discharge // Physics Letters A. - 1972. - Vol.42, №3. - P. 191-192.
22. Boeuf J.-P. A two-dimensional model of dc glow discharges // J. Appl. Phys. - 1988. - Vol. 63, № 5. - P. 1342-1349.
23. Ohuchi M., Kubota T. Monte Carlo simulation of electrons in the cathode region of the glow discharge in helium // Journal of Physics D: Applied Physics. - 1983. - Vol. 16, № 9. - P. 1705-1714.
24. Hartog E.A., Dought D.A. Laser optogalvanic and fluorescence studies of the cathode region of a glow discharge // Phys. Rev. - 1988. - Vol.38, № 9. - P. 2471-2474.
25. Goto M., Kondon Y. Monte Carlo simulation of normal and abnormal glow discharge plasmas using the limited weight probability method // Jpn. J. Appl. Phys. - 1998. - Vol. 37, № 1. - P. 308-312.
26. Kudryavtsev A.A., Tsandin L.D. Townsend Discharge Instability on the Right-Hand Branch of the Paschen Curve // Tech. Phys. Lett. - 2002. - Vol.28, №12. - P. 1036-1039.
27. Kudryavtsev A.A., Morin A.V., Tsandin L.D. Role of nonlocal ionization in formation of the short glow discharge // Technical Physics. - 2008. - Vol.53, № 8. - P. 1029-1040.
28. Moizhes B.Ya., Nemchinskii V.A. On the theory of the cathode layer glow // Zhurn. Tekhn. Fiz. - 1989. - Vol. 59, № 4. - P. 22-29.
29. Lister G. Low - pressure gas discharge modeling // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1992. - Vol. 25, №12. - P.1649-1680.
30. Guntherschulze A. Die behinderte Glimmentladung. II. // Z. Physik. - 1930. - Vol.61. - P.581-586.
31. Lisovskiy V.A., Koval V.A., Yegorenkov V.D. Dc breakdown of low pressure gas in long tubes // Physics Letters A. - 2011. - Vol. 375. - №19. - P.1986-1989.
32. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2000. - Vol. 33, № 21. - P. 2722-2730.
33. Lisovsky V.A., Yakovin S.D. Scaling Law for a Low-Pressure Gas Breakdown in a Homogeneous DC Electric Field // JETP Letters. - 2000. -Vol. 72, № 2. - P.34-37.
34. Penning F.M. Zweierlei negative Charakteristiken bei selbständigen Gasentladungen // Physik. Zeitschr. - 1932. - Vol.33. - P. 816-822.
35. Francis G. The glow discharge at low pressure // Encyclopedia of physics. - 1956. - Vol.22. - P. 53-208.
36. Doughty D.K., Lawler J.E. Optogalvanic effects in the obstructed glow discharge // Appl. Phys. Lett. - 1983. - Vol.43, № 3. - P.234-236.
37. Ganguly B.N., Garscadden A. Electric field and Doppler emission profile measurements in an obstructed hydrogen discharge // J. Appl. Phys. - 1991. - Vol.70, № 2. - P.621-627.

38. Donko Z., Rozsa K., Tobin R.C., Peard K.A. Modeling and measurements on an obstructed glow discharge in helium // *Phys. Rev. E.* – 1994. - Vol.49, № 4. - P.3283-3289.
39. Fukao M., Ishida M., Ohtsuka Y., Matsuo H. A simple electron gun by obstructed discharge and its discharge - sustaining mechanism // *Vacuum.* – 2000. - Vol.59, №1. - P.358-372.
40. Lisovskiy V.A., Kharchenko N.D. Normal mode of the longitudinal combined discharge in low pressure nitrogen // *The Journal of Kharkiv National University, physical series: Nuclei, Particles, Fields.* – 2010. – Vol. 889, №2/46/. - P. 74-82.
41. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D. Cathode Layer Characteristics of a Low-Pressure Glow Discharge in Argon and Nitrogen // *Technical Physics Letters.* - 2000. - Vol. 26, № 10. - P. 891–893.