

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В ВОЗДУХЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

О.В. Болотов, В.И. Голота, Б.Б. Кадолин, В.Н. Остроушко, Л.М. Завада, А.Ю. Шулика
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-временных и электродинамических характеристик катодонаправленного стримера в воздухе при различных давлениях. Сформулированы соотношения подобия, которые позволили сравнить токовые характеристики разряда и динамику распространения стримера при различных давлениях. Показано, что существует диапазон давлений, в котором развитие разрядов происходит подобным образом при сохранении неизменными произведения $P \cdot d$, и напряжения на разрядном промежутке. Важно отметить, что в этих условиях средняя скорость распространения стримера остается постоянной при различных давлениях.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется изучению газовых разрядов атмосферного давления, так как они находят широкое применение во многих плазмохимических технологиях: для синтеза озона, очистки дымовых газов от NO_x и SO_x , для накачки мощных технологических газовых лазеров, дезинфекции и плазмохимических синтезов. Такое широкое распространение разрядов обусловлено уникальными свойствами низкотемпературной неравновесной плазмы, которая формируется в разрядном промежутке, и является эффективным источником возбужденных частиц и активных радикалов.

Особое распространение в последнее время получили разряды в коротких разрядных промежутках с резконеоднородным распределением электрического поля, характерным для электродных систем типа «игла-плоскость». При прикладывании к острейшему электроду постоянного потенциала положительной полярности можно реализовать стримерный разряд. Ток стримерного разряда представляет собой установившуюся последовательность токовых импульсов, формирование которых обусловлено распространением в разрядном промежутке катодонаправленных стримеров, накоплением и последующей релаксацией объемного заряда. Стримерный разряд может существовать в двух режимах [1], определяемых величиной напряжения, приложенного к разрядному промежутку: режим замыкающего разрядный промежуток стримера и режим не замыкающего разрядный промежуток стримера.

Пространственно-временные характеристики стримерного разряда в коротких разрядных промежутках при атмосферном давлении являются предметом исследования во многих экспериментальных работах (см. обзоры [2,3]), так как позволяют изучить особенности формирования и развития разряда на различных стадиях. Вместе с тем удовлетворительная теория разряда так и не разработана, и многие процессы формирования и развития разряда остаются слабо изученными.

Для сравнения экспериментальных результатов при различных давлениях рабочего газа необходимо

сформулировать критерии подобия для разрядов. Поиск критериев подобия является задачей по определению параметров, которые оказывают основное влияние на динамику разряда и распространение стримера.

В работе [4] были проведены экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения стримерного разряда при повышенных давлениях в воздухе. Были получены зависимости скорости распространения стримера по разрядному промежутку при различных давлениях, при этом во всех экспериментах сохранялось распределение приведенной напряженности электрического поля E/P в разрядном промежутке в отсутствие объемных зарядов. Сохранение $E/P = \text{Const}$ служило критерием для проведения сравнительного анализа результатов экспериментов для различных давлений. Однако в работе не сформулированы соотношения подобия для разрядов, которые бы позволили сравнивать динамику развития стримеров при различных давлениях рабочего газа.

А.А. Рухадзе и др. в [5] проанализировали соотношения подобия для разномасштабных низкотемпературных и неравновесных газовых разрядов. И, основываясь на размерных преобразованиях, определили условия для сохранения полного подобия разрядов, т.е. полный набор инвариантных величин.

В работе [6], основываясь на экспериментальном исследовании развития стримерного разряда при повышенных давлениях в воздухе, также были сформулированы соотношения подобия, которые позволили сравнить токовые характеристики разряда и динамику распространения стримера при различных давлениях.

Основной задачей настоящей работы является определение экспериментальных условий, при которых возможно реализовать подобие в развитии разрядов при различных давлениях.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Исследования пространственно-временных и электродинамических характеристик разряда положительной полярности при различных давлениях в воздухе проводились на установке, блок-схема которой приведена на Рис. 1.

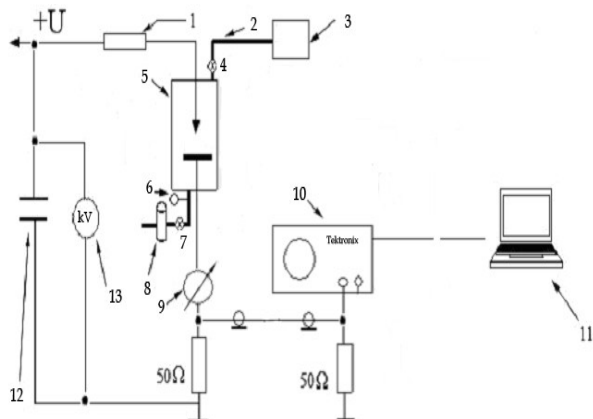


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 – балластный резистор 130 кΩ; 2 – газопровод; 3 – газовый компрессор; 4, 7 – натекатели; 5 – разрядная камера; 6 – манометр; 8 – ротаметр; 9 – микроамперметр М906; 10 – осциллограф Tektronix TDS-210; 11 – компьютер IBM PC; 12 – емкостной фильтр напряжения 1000 нФ; 13 – киловольтметр С196

Разрядная камера имела объем 350 см³ и позволяла работать при повышенных давлениях воздуха до 5 атм. Электродная система типа «игла-плоскость» с острым анодом $r_a \sim 30$ мкм и плоским катодом $r_c \sim 3$ м позволяла регулировать меж-электродное расстояние в пределах от 5 до 15 мм. Повышенное давление в разрядной камере создавалось газовым компрессором фирмы Fias F 205. Величина давления контролировалась манометром и регулировалась двумя натекателями, которые были установлены на входе и выходе камеры. Расход газа через разрядную камеру во всех экспериментах составлял 1 л/мин и контролировался ротаметром типа РМ-А на выходе камеры. Напряжение к разрядному промежутку прикладывалось от стабилизированного источника постоянного напряжения 0,5...20 кВ и измерялось киловольтметром С196. Средний ток разряда измерялся микроамперметром М906. Для регистрации импульсов разрядного тока в разрядную цепь устанавливались токовые шунты, сигнал с которых подавался на первый канал двухканального цифрового осциллографа Tektronix TDS210, с частотой дискретизации 1 ГГц. Осциллограммы токовых импульсов обрабатывались на компьютере IBM PC с помощью пакета прикладных программ. Эксперименты проводились при напряжениях на разрядном промежутке 8, 10, 12, 14 кВ для диапазона давлений от 1 до 3 атм с шагом 0,5 атм. Это позволяло поддерживать во всех экспериментах постоянным произведение $P \cdot d = 15$ мм·атм.

Перед проведением экспериментов проводилась специальная обработка игольчатого и плоского электродов для реализации устойчивого режима стримерного горения разряда. Показателем устойчи-

вого горения разряда является стабильный квазипериодический режим токовых импульсов, осциллографируемых с токового шунта разрядной камеры.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для нахождения соотношений подобия для разрядов при разных давлениях проанализируем влияние давления на основные характеристики разряда.

Энергия, набираемая электроном в электрическом поле между столкновениями, прямо пропорциональна произведению $E \cdot \lambda$, где E – напряженность электрического поля, λ – длина свободного пробега электрона. При фиксированной температуре длина свободного пробега λ изменяется, как P^{-1} с изменением давления P , поэтому одинаковую энергию (а с ней и характерные скорости) электроны имеют при одинаковых значениях E/P . Перед фронтом стримера, в области интенсивной ионизации, энергия, приобретаемая электроном на длине свободного пробега, должна соответствовать потенциалу ионизации I^* , $E^* \cdot \lambda \sim I^*$. Поле E^* является пороговым, так как в более слабом поле ионизация идет очень слабо, а в более сильном – со скоростью, не намного большей, чем для порогового.

Исходя из того, что в рамках рассматриваемой модели плазменный канал стримера считается сильно проводящим, то потенциал головки стримера слабо отличается от потенциала анода U , т.е. на плазменном канале не происходит существенного падения напряжения. Размер области интенсивной ионизации по порядку величины соответствует радиусу стримера r_s , а напряженность электрического поля в данной области оценивается величиной порядка U/r_s . При увеличении U радиус стримера увеличивается так, чтобы поле перед стримером оставалось близким к пороговому E^* . Если напряжение U на разрядном промежутке соответствует величине, минимально необходимой для существования стримера, то радиус стримера оценивается из соотношения $r_s \sim (20 \dots 30) \lambda$. Числовой множитель в оценке радиуса стримера определяется количеством последовательных актов ионизации, необходимых для увеличения плотности электронов от начальной, перед фронтом стримера, до конечной, характерной для плазменного канала стримера. Можно показать, что множитель логарифмически зависит от отношения указанных плотностей. При атмосферном давлении начальная плотность электронов составляет $10^3 \dots 10^6$ см⁻³, где меньшее значение определяется ионизацией космическим излучением, а большее – фотоионизацией кислорода излучением возбужденных молекул азота. Плотность электронов в канале оценивается величиной $10^{14} \dots 10^{15}$ см⁻³. Эту оценку на плотность электронов в канале стримера легко получить исходя из того, что процесс ионизации прекращается, когда время релаксации сравнивается со временем ионизации, и следующий акт ионизации не происходит из-за ослабления поля. Сравним характерное время релаксации поля в среде с проводимостью σ , $\tau_r = \epsilon_0 / \sigma$, с характерным временем между

последовательными актами ионизации, осуществляемыми одним электроном, $\tau_i = (\alpha v_d)^{-1}$ (где α – ионизационный коэффициент; v_d – дрейфовая скорость; ϵ_0 – электрическая постоянная). Проводимость определяется концентрацией электронов n_e и подвижностью μ_e , $\sigma = q n_e \mu_e$, где q – элементарный заряд. С учетом равенства $v_d = \mu_e E$, где напряженность поля следует брать для области интенсивной ионизации, получаем оценку для концентрации электронов, $n_e \sim q^{-1} \epsilon_0 \alpha E$. Исходя из того, что в предлагаемой модели предполагается зависимость $\alpha/P = f(E/P)$, то при сохранении E/P и изменении давления величины α/P и λP сохраняются, и концентрация электронов зависит от давления, как P^2 .

В связи с тем, что минимально возможный поперечный размер стримера по порядку величины определяется размером лавины, а напряжённость поля на фронте стримера определяется величиной порядка U/r_s , то при различных давлениях и фиксированном U величина приведенной напряжённости поля перед фронтом стримера $E/P \sim U/(r_s P)$ остаётся постоянной. В этом случае процессы могут развиваться подобным образом при одинаковых значениях $r_s P$ и v_s . Чтобы сохранить подобие в динамике развития стримера в целом при разных давлениях, необходимо все размеры изменить, как P^{-1} . Таким образом, в рамках предлагаемой модели для сохранения подобия в развитии стримера при различных давлениях достаточно сохранить постоянным произведение $P \cdot d$, давления с межэлектродным расстоянием, при одинаковых значениях напряжения на разрядном промежутке.

В рамках изложенной модели при каждом значении напряжения исследуемого диапазона и фиксированном произведении $P \cdot d$, снимались осциллограммы токовых импульсов разряда, измерялась частота следования импульсов тока. При этом особое внимание уделялось исследованию изменения формы токовых импульсов разряда при увеличении давления. Осциллограммы токовых импульсов дают информацию о характере процесса распространения стримеров. Форма токового импульса, формирование которого обусловлено распространением стримера, отображает тенденцию изменения скорости распространения стримера в разрядном промежутке.

Форма токового импульса незамыкающегося стримера свидетельствует о том, что движение стримера до некоторого момента времени, соответствующего максимальной амплитуде тока, происходит с постепенным увеличением скорости, а после скорость стримера уменьшается, вплоть до момента его полной остановки. Замыкающий разрядный промежуток стример формирует импульс тока, на котором можно выделить характерный пик, соответствующий моменту замыкания стримером разрядного промежутка. Анализ токовых импульсов замыкающих стримеров позволяет определить характерное время распространения стримера в разрядном промежутке до момента замыкания, что, в свою очередь, позволяет оценить среднюю скорость стримера.

Для установления соотношений подобия важным является, чтобы разряд находился в одинаковых ре-

жимах, поэтому экспериментально подбирались условия, при которых разряд находился в одном режиме при разных давлениях. Проведенные исследования развития стримеров при различных напряжениях на разрядном промежутке показали существование условий, при которых во всём исследуемом диапазоне давлений наблюдается устойчивое развитие замыкающихся стримеров. Отмечено, что в данных экспериментальных условиях можно выделить диапазон напряжений, в котором развитие стримера в разрядном промежутке происходит подобным образом, и разряд находится в одном режиме независимо от величины давления. Проведенный анализ формы токовых импульсов для всего диапазона исследуемых напряжений на разрядном промежутке позволил сделать вывод о том, что только при напряжении 14 кВ происходит устойчивое распространение стримера, и разряд существует в режиме замыкающих стримеров. При напряжениях 8, 10 и 12 кВ развитие стримера с увеличением давления не происходит подобным образом. В частности, при напряжении 8 кВ только при атмосферном давлении стример замыкает разрядный промежуток, а увеличение давления до 1,5 атм и выше приводит к переходу разряда в режим незамыкающихся стримеров.

Основной целью экспериментов было изучение влияния давления на скорость распространения по разрядному промежутку замыкающегося стримера.

На Рис.2. приведены осциллограммы токовых импульсов разряда при различных давлениях. Напряжение на разрядном промежутке $U=14$ кВ, $P \cdot d=15$ мм·атм.

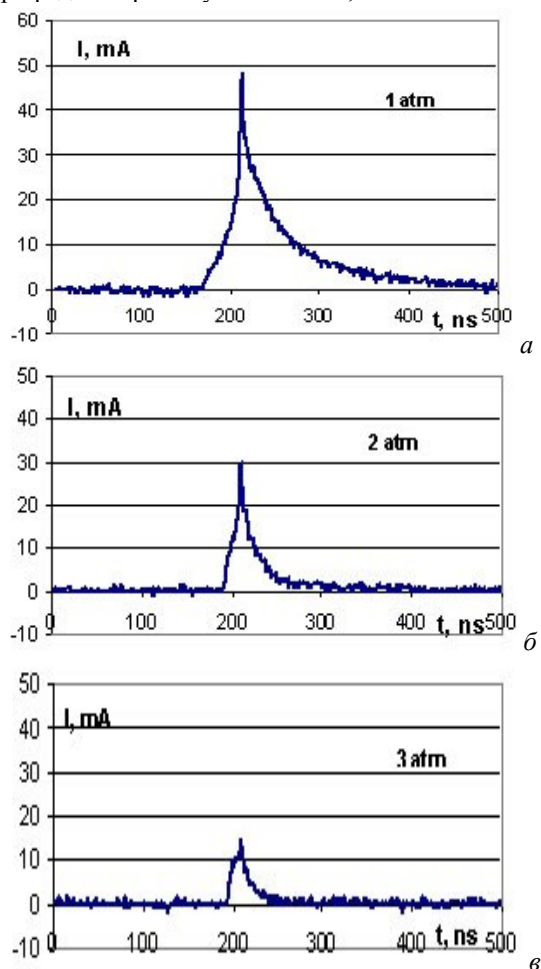


Рис.2. Осциллограммы токовых импульсов разряда при различных давлениях; $U=14$ кВ, $P \cdot d=15$ мм·атм. $P=1$ атм, $d=15$ мм, $T=108$ мкс, средний ток разряда $I_{cp}=60$ мкА (а); $P=2$ атм, $d=7.5$ мм, $T=52$ мкс, средний ток разряда $I_{cp}=54$ мкА (б); $P=3$ атм, $d=5$ мм, $T=32$ мкс, средний ток разряда $I_{cp}=55$ мкА (в)

Из приведенных осциллограмм видно, что во всём рассматриваемом диапазоне давлений в разрядном промежутке распространяются только замыкающиеся стримеры. Максимальная амплитуда импульсов тока при увеличении давления уменьшается. Необходимо отметить, что изменение тока с увеличением давления не соответствует приведенным оценкам зависимостей параметров процесса от давления, как и в работе [6], что свидетельствует о более сложной зависимости процесса от давления. В результате анализа токовых импульсов отмечено, что при напряжении $U=14$ кВ средняя скорость стримера остаётся постоянной независимо от величины давления. Также отмечено, что произведение $P \cdot T$, где T – период следования токовых импульсов, также остаётся постоянным.

Для того чтобы проверить насколько существенно влияние радиуса кривизны игольчатого анода на развитие стримера при различных давлениях, был проведен эксперимент с использованием двух игл с различными радиусами кривизны. На Рис.3. приведены зависимости средней скорости распространения стримера от давления, полученные при использовании игольчатых анодов с различной кривизной. Напряжение на разрядном промежутке 14 кВ.

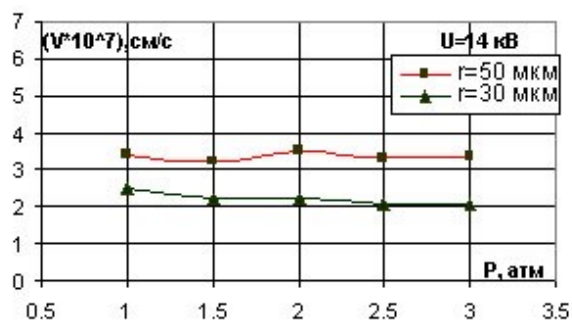


Рис.3. Зависимость средней скорости распространения стримера от величины давления для игольчатых анодов с различной кривизной. Напряжение на разрядном промежутке $U=14$ кВ, $P \cdot d=15$ мм·атм

Из приведенного графика видно, что независимо от радиуса кривизны игольчатого анода средняя скорость стримера сохраняется постоянной во всём рассматриваемом диапазоне давлений. При этом средняя скорость возрастает с увеличением радиуса кривизны игольчатого анода от 30 до 50 мкм. Важно отметить, что сохранение средней скорости стримера происходит только в режиме, при котором во всём исследуемом диапазоне давлений наблюдается устойчивое развитие замыкающихся стримеров.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что сформулированный критерий является достаточно полным для сохранения подобия в развитии разрядов при различных давлениях.

В заключение следует отметить, что динамика развития стримера в разрядном промежутке после его формирования определяется совокупностью процессов, приводящих к продвижению фронта стримера. При этом скорость распространения стримера определяется в основном значением величины максимального поля на фронте стримера. По мере движения стримера процессы, протекающие в плазменном канале стримера, приводят к уменьшению проводимости плазменного канала и, как следствие, к уменьшению величины потенциала головки стримера и максимального поля перед ней. Поэтому скорость распространения стримера не постоянна по промежутку. Чтобы определить, как меняется скорость стримера по мере его распространения в разрядном промежутке, необходимо провести дополнительные эксперименты по исследованию пространственно-временных характеристик излучения разряда. При этом актуальным остаётся вопрос о влиянии давления на характер изменения скорости распространения стримера в разрядном промежутке.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ и сформулированы условия подобия для стримерных разрядов, которые позволили сравнить токовые характеристики разряда и динамику распространения стримера при различных давлениях.

Экспериментально показано, что в диапазоне давлений 1...3 атм в воздухе при выполнении соотношений подобия для стримерного разряда динамика развития стримеров является также подобной. В частности, при приложении к разрядному промежутку напряжения равного 14 кВ и сохранении $P \cdot d=15$ мм·атм наблюдалось устойчивое развитие стримеров во всем диапазоне исследуемых давлений, при этом измеренные средняя скорость распространения стримера и произведение $P \cdot T$ оставались постоянными.

Показано, что средняя скорость стримера возрастает при увеличении радиуса кривизны острейшего электрода с 30 до 50 мкм, при этом для заданного радиуса кривизны анода средняя скорость стримера остаётся постоянной в рассматриваемом диапазоне давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Бруев, В.И. Голота, Л.М.Завада и др. Нестационарная стадия тлеющего разряда при положительной полярности атмосферного давления // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2000, №1, с.50.
2. F. Grange, N. Soulem, J.F. Loiseau, N. Spyrou. Numerical and experimental determination of ionizing front velocity in a DC point-to plane corona discharge // *J. Phys. D: Applied Physics*. 1995, v.28, №8, p.1619-1629.
3. Y.L.M. Creyghton, E.M. van Veldhuizen, W.R. Rutgers. Electrical and optical study of pulsed positive corona // *Non-thermal plasma techniques*

- for pollution control*. Berlin: Springer, 1993, p.205-230.
4. В.И. Голота, Б.Б. Кадолин, О.В. Болотов, В.Н. Остроушко, С.Н. Маньковский. Исследования разряда в системе электродов игла-плоскость при повышенных давлениях воздуха (катодонаправленный стример) // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. 2007, в.2(14), с.52-57.
 5. А.А. Рухадзе, Н.Н. Соболев, В.В. Соковиков. Подобие низкотемпературных неизотермических разрядов // *УФН*. 1991, т.161, №9.
 6. S. Achat, Y. Teisseyre, E. Marode. The scaling of the streamer-to-arc transition in a positive point-to-plane gap with pressure // *J. Phys. D: Applied Physics*. 1992, v.25, p.661-668.

Статья поступила в редакцию 09.05.2008 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CATHODE-DIRECTED STREAMER PROPOGATION IN AIR AT HIGH PRESSURE

O.V. Bolotov, V.I. Golota, B.B. Kadolin, V.N. Ostroushko, L.M. Zavada, A.Ju. Shulika

The experimental results of spatio-temporal and electrodynamic characteristics of cathode-directed streamer in air under different pressures are presented. The similarity laws, which allowed to compare the characteristics of discharge current and streamer dynamics under different pressures, were obtained. It was found that interval of pressures exists in which discharge develops similarly when the product P-d, and applied voltage are kept constant. It is important to note, that under these conditions average streamer velocity remains constant at different pressures.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ КАТОДОСПРЯМОВАНОГО СТРИМЕРУ ПРИ ПІДВИЩЕНОМУ ТИСКУ У ПОВІТРІ

О.В. Болотов, В.І. Голота, Б.Б. Кадолин, В.М. Остроушко, Л.М. Завада, О.Ю. Шуліка

Подано результати експериментальних досліджень просторово-часових та електродинамічних характеристик катодоспрямованого стримеру у повітрі при різному тиску. Сформульовані співвідношення подібності, які дозволили порівняти струмові характеристики розряду та динаміку розвитку стримера при різному тиску. Встановлено, що існує діапазон тисків, у якому розвиток розрядів відбувається подібним чином при збереженні незмінними добутку P-d, та прикладеної напруги. Важливо відмітити, що в цих умовах середня швидкість розповсюдження стримера залишається незмінною при різних тисках.