

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ НАНОСЕКУНДНОГО
ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
В ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ ИГЛА–ПЛОСКОСТЬ

© 2019 г. Z. W. Ding^a, Y. W. Li^{a,b,*}, L. Pang^c, Z. Zhuang^a, W. Ma^a, B. L. Zhang^a

^a Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

^b Science and Technology on Combustion, Thermal-Structure and Internal Flow Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

^c State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

*e-mail:lee_yiwen@163.com

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

После доработки 20.11.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Для изучения характеристик разряда в воздухозаборнике сверхзвукового летательного аппарата и поиска эффективного способа избежать таких нежелательных режимов как искровой, дуговой или коронный разряд проведено экспериментальное исследование характеристик наносекундного импульсного разряда в геометрии электродов игла–плоскость. Эксперименты проводились в диапазоне давлений от 500 до 5000 Па и диапазоне температур от 295 до 425 К. Исследования показали, что переход из режима тлеющего разряда в режим коронного разряда и обратно может быть осуществлен путем изменения давления газа. В частности, при температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм давление при коронном и тлеющем разрядах составило 4500 и 1000 Па для напряжения 4.56 и 8.25 кВ. Однако переход из режима тлеющего разряда в режим искрового разряда нельзя было осуществить только посредством изменения давления газа. Необходимо было дополнительно увеличить разрядное напряжение, которое в этом случае являлось определяющим фактором, до величины 12.4 кВ. Режим разряда определялся значениями межэлектродного расстояния и давления газа. Температура газа также могла оказывать серьезное влияние на разряд — чем выше была температура, тем легче осуществлялся пробой промежутка. В результате выполнения работы был создан задел для последующих исследований разрядных характеристик в сверхзвуковых потоках.

DOI: 10.1134/S0367292119070047

1. ВВЕДЕНИЕ

Технологии на основе магнитной гидродинамики (МГД), обладая широкими перспективами применения в аэрокосмической отрасли, являются одним из высокотехнологичных направлений, развиваемых во многих странах. Уже давно создание однородной стабильной проводящей среды является лишь технической задачей для МГД-приложений [1–3]. Газовый разряд оказался эффективным средством создания однородного ионизованного потока [4–9]; тем не менее, в этом направлении все еще существуют некоторые трудности. Например, возникновение такого нежелательного режима разряда как искровой или коронный может существенным образом сказаться на однородности и стабильности ионизации.

Решению данной проблемы уделяется достаточно много внимания во всем мире. Мюррей с

коллегами [10, 11] использовал высоковольтный генератор импульсов для ионизации неподвижного воздуха и воздуха в сверхзвуковом потоке. Стоит отметить, что разрядная плазма сжималась к центру канала при увеличении давления в случае неподвижного воздуха, сохраняя при этом относительную однородность и стабильность. В случае сверхзвукового потока разряд полностью сосредотачивался в пограничном слое, и однородность плазмы достигалась либо увеличением величины магнитного поля, либо уменьшением давления. Тардиву и др. [12, 13] исследовали разряд высокого давления в воздухе в геометрии электродов игла–плоскость. Диффузный, многоканальный и стримерный режимы сменялись один за другим при увеличении давления газа. При дальнейшем увеличении давления филаменты разряда уже не достигали поверхности противоположного электрода. Тарасенко с коллегами

[14] исследовал импульсно-периодический коронный разряд при атмосферном давлении. Было изучено влияние полярности импульса на коронный разряд при наносекундной и микросекундной длительности импульса напряжения. Результаты исследования показали, что для формирования цилиндрического стримера импульсом микросекундной длительности отрицательная полярность высоковольтного электрода требует более высокого напряжения, чем положительная. Пай и др. [15–18] проводили эксперименты с наносекундным разрядом в геометрии электродов игла–игла. В нагретом воздухе наблюдались режимы коронного, тлеющего и искрового разрядов. Стоит упомянуть, что увеличение частоты следования импульсов приводило к возникновению перехода от тлеющего разряда к искровому при более низких напряжениях. При слишком коротких или слишком длинных межэлектродных расстояниях тлеющий разряд возникал только при повышении температуры газа. Следует уточнить, что разряд в приведенном случае существовал при атмосферном давлении, т.е. при более жестких условиях смены режима разряда. Кроме того, авторами не ставилась задача получения однородного разряда в большом объеме. Шао с соавторами [19, 20] проводил экспериментальные исследования наносекундного разряда при атмосферном давлении в геометрии игла–плоскость. Режимы коронного, тлеющего и дугового разрядов достигались при различных параметрах импульса напряжения и величинах межэлектродного расстояния. При определенном межэлектродном расстоянии наблюдалось сосуществование искрового и диффузного разрядов. Более того, при изменении конфигурации генератора для катода с малым радиусом кривизны осуществлялся режим диффузного разряда большой площади. Эти исследования создали предпосылки для получения однородной плазмы в большом объеме. Однако стоит отметить, что в приведенной работе рассматривался воздух атмосферного давления, что значительно отличается от условий, возникающих в воздухозаборнике сверхзвукового летательного аппарата во время полета.

Основываясь на результатах перечисленных исследований, в данной работе использовался наносекундный импульсный разряд в геометрии электродов игла–плоскость при пониженном давлении и повышенной температуре. Сходные условия возникают в воздухозаборнике сверхзвукового летательного аппарата во время полета. В данной работе исследовались закономерности переходов между режимами разряда в неподвижном воздухе. Наблюдались коронный, тлеющий и искровой разряды при различных давлениях, температурах и межэлектродных расстояниях. Проведено сравнение характеристик разряда в одно- и двухострийной геометрии электродов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для поиска эффективных способов подавления таких неблагоприятных разрядных режимов как искровой или коронный использовался наносекундный разряд в воздухе с возможными примесями водяного пара в геометрии электродов игла–плоскость. Эксперименты проводились в диапазоне давлений от 500 до 5000 Па. Температура газа варьировалась от 295 до 425 К.

Экспериментальная установка состояла из электродов, наносекундного источника импульсов, диагностической системы, вакуумной камеры и т.д. Для вакуумирования разрядной камеры, объем которой составлял 0.005 м^3 , использовался двухступенчатый вакуумный насос. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

2.1. Вакуумная камера

Диапазон изменения давления внутри вакуумной камеры составлял от 0.1 до 98 кПа. Камера была снабжена нагревательным элементом, который позволял нагревать газ внутри камеры до температуры 650 К. Для защиты корпуса вакуумной камеры от перегрева использовалось водяное охлаждение.

2.2. Генератор наносекундных импульсов и система электродов

В экспериментах использовался наносекундный импульсный генератор фирмы FID, с двуполярным импульсом напряжения. Длительность высоковольтного импульса составляла 8–10 нс, время нарастания фронта – 2–3 нс. Генератор позволял изменять частоту повторения импульсов в диапазоне от 1 до 20 кГц.

Система электродов установки была выполнена в геометрии игла–плоскость. Межэлектродное расстояние могло изменяться с помощью винтового соединения. Анодом служила расположенная горизонтально вольфрамовая игла. В качестве катода использовалась квадратная медная пластина размерами $40 \times 40 \times 12 \text{ мм}$.

2.3. Диагностическая система

Диагностическая система включала в себя устройства для измерения давления, температуры и электрических характеристик системы. Особое внимание было уделено точному измерению давления. Для этого использовался датчик фирмы Yokogawa EJA с диапазоном измерения от 0 до 5 кПа. Напряжение питания датчика составляло 24 В, а выходной сигнал датчика линейно менялся от 2 до 10 В в зависимости от давления в камере. Линейность показаний соблюдалась для всего диапазона рабочих параметров (0–5 кПа). Таким

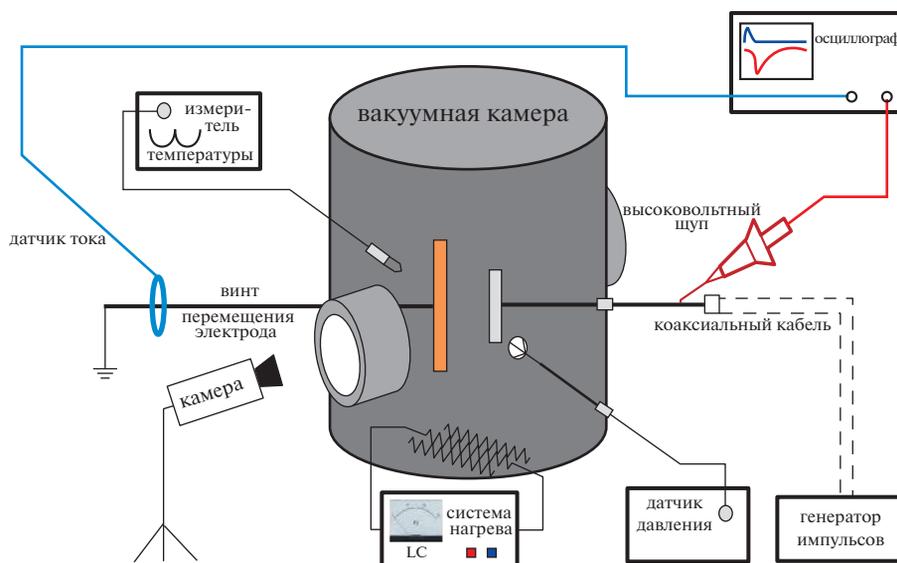


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

образом, измерение давления осуществлялось посредством измерения напряжения выходного сигнала датчика. Для защиты датчика от помех, создаваемых разрядом, он помещался в экранирующую оболочку.

Для более точного измерения температуры термопара помещалась в плоскости разряда. Нагревательный элемент размещался в нижней части разрядной камеры.

Измерение электрических характеристик производилось с помощью высоковольтного щупа P6015A, токового датчика ТСРА300 + ТСР312 и осциллографа DPO4104, который использовался для сбора и хранения информации с датчиков. Для получения изображений разряда использовалась фотокамера D7100 Nikon со следующими настройками: диафрагма $F = 5.6$, выдержка – $1/50$ с и чувствительность ISO – 6400.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводились при частоте следования импульсов 500 Гц. Было исследовано влияние давления, температуры и межэлектродного расстояния на наносекундный разряд. Проведен анализ изменения амплитуды разрядного напряжения при переходе от одноострийной к двухострийной геометрии разряда. При более высоких напряжениях наблюдался режим искрового разряда.

На рис. 2 изображены коронный, тлеющий и искровой разряды при температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм. Вольт-амперные характеристики, приведенные на рис. 2б, соот-

ветствуют изображениям разрядов на рис. 2а. Приложенные напряжения в случае коронного и тлеющего разрядов составляли 4.56 и 8.25 кВ, а разрядные токи – 1.46 и 4.14 А, соответственно. Было обнаружено, что переход от коронного к тлеющему разряду может быть осуществлен за счет изменения давления. Давление в коронном разряде составило 4500 Па, а в тлеющем – 1000 Па. Однако перейти в режим искрового разряда за счет изменения давления оказалось невозможно. Для этого необходимо было повысить напряжение на разрядном промежутке. Как показано на рис. 2, искровому разряду соответствовало давление 4000 Па, напряжение 12.4 кВ и ток 14.1 А. Таким образом, можно утверждать, что определяющим фактором возникновения искрового разряда при низком давлении являлось приложенное к разрядному промежутку напряжение.

На графиках характеристик коронного разряда можно увидеть сильные осцилляции разрядного тока. Причина этого заключается в том, что в режиме коронного разряда не происходит полного пробоя разрядного промежутка, и импеданс плазменного канала достаточно велик. Измеренный ток в основном представляет собой ток смещения, который изменяется под действием электрического поля. Однако отрицательная часть тока на рис. 2 не полностью совпадает с положительной частью, что указывает на наличие тока проводимости.

Интересно отметить, что канал искрового разряда во время эксперимента не являлся стационарным, а перемещался вверх и вниз вдоль катода. Поэтому изображения искрового разряда на рис. 2 имеют размытую форму – выдержки фотокамеры не хватило для разрешения отдельных

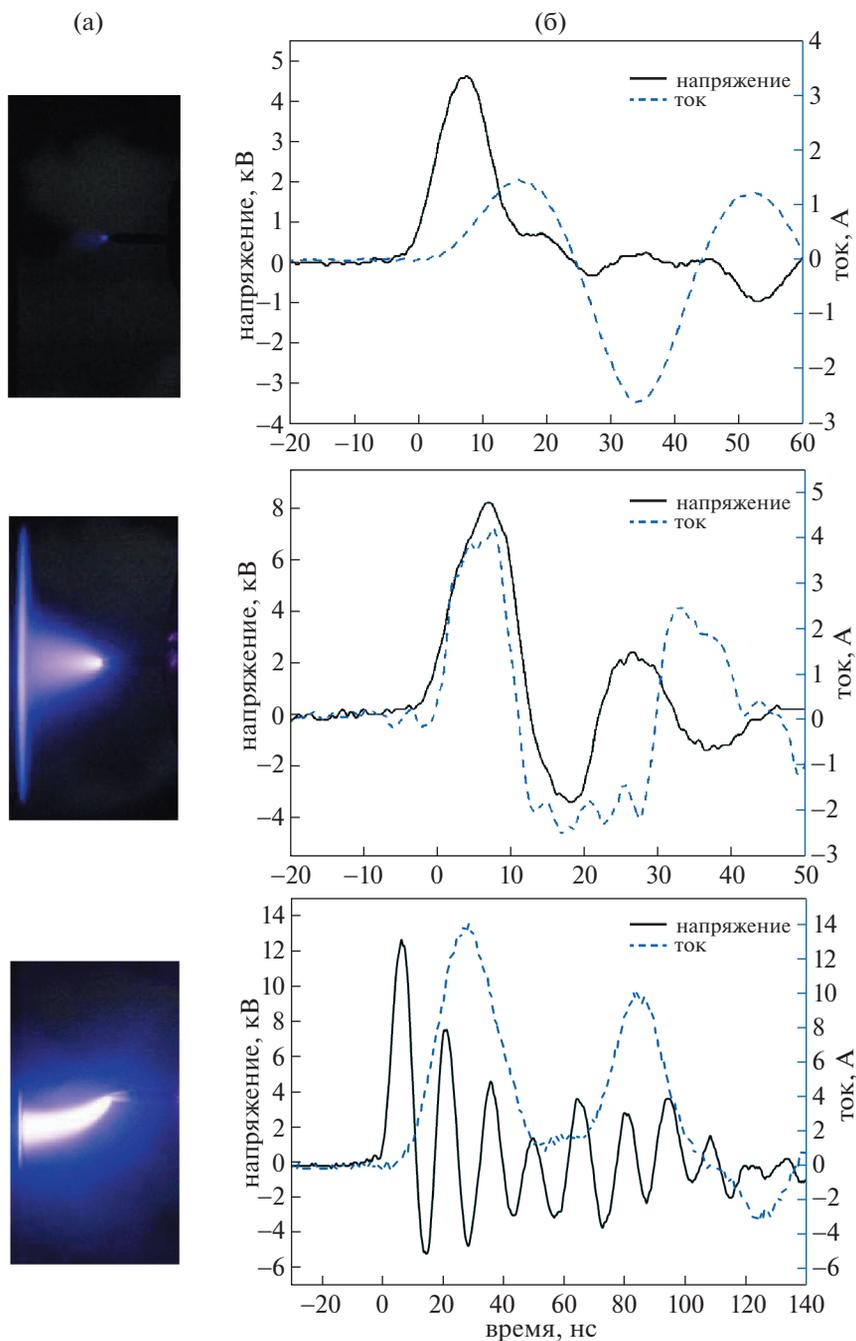


Рис. 2. Коронный, тлеющий и искровой разряды при типичных условиях эксперимента: фотографии коронного, тлеющего и искрового разрядов (а) и их вольт-амперные характеристики (б).

импульсов напряжения. На фотографии изображена интегральная картина от нескольких последовательных разрядных импульсов. Таким образом, на изображении искрового разряда невозможно наблюдать филаментаризованную форму разряда, однако данные вольт-амперной характеристики соответствуют особенностям искрового разряда.

3.1. Влияние на разряд давления воздуха и межэлектродного расстояния

На рис. 3 приведены изображения разряда при давлении 1500 Па и температуре 295 К с различными межэлектродными расстояниями. При расстоянии 5 мм реализовывался тлеющий разряд в диффузной форме, свечение которого практически полностью покрывало поверхность катода.

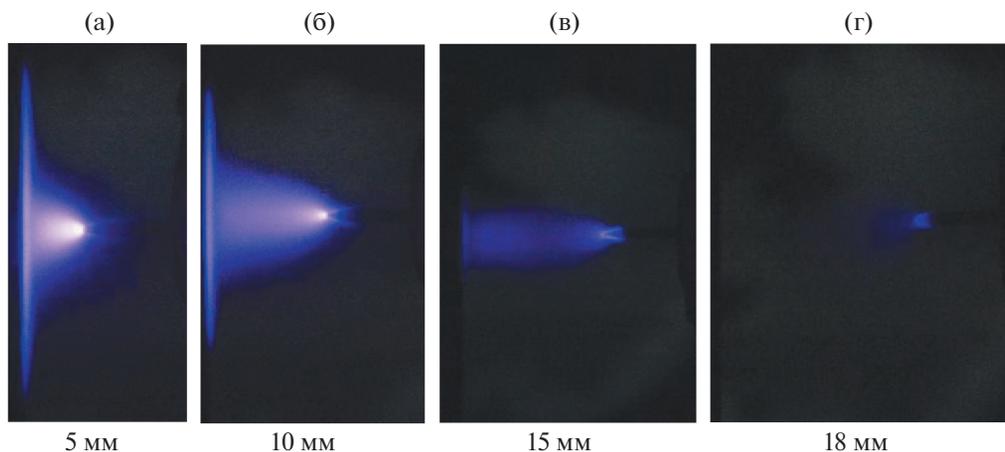


Рис. 3. Изображения разряда при давлении 1500 Па, температуре 295 К и межэлектродном расстоянии: 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в) и 18 мм (г).

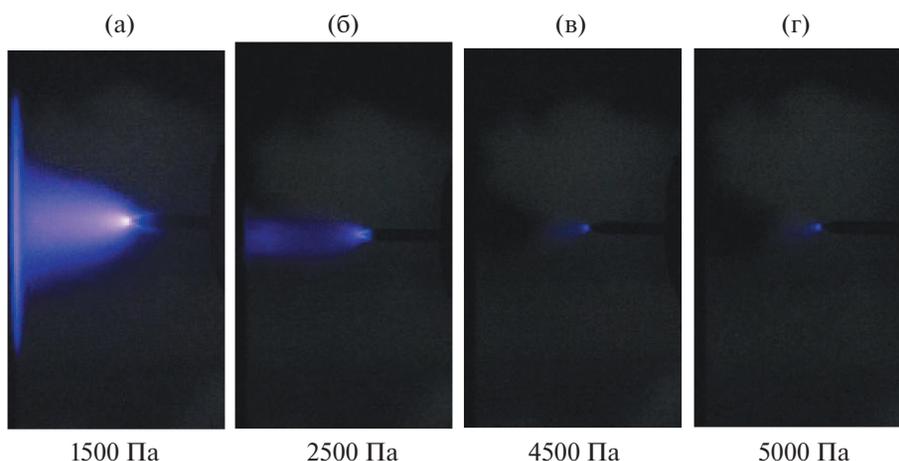


Рис. 4. Изображения разряда при температуре 295 К, межэлектродном расстоянии 10 мм и давлении: 1500 Па (а), 2500 Па (б), 4500 Па (в) и 5000 Па (г).

Увеличение межэлектродного расстояния до 10 мм приводило к сжатию области свечения в центре и последующему исчезновению диффузной формы разряда. При дальнейшем увеличении расстояния тлеющий разряд постепенно переходил в коронный. Изображение разряда для межэлектродного расстояния 18 мм соответствует коронному разряду.

В соответствии с результатами, приведенными на рис. 3, было исследовано влияние давления на разряд при различных межэлектродных расстояниях. На рис. 4 представлены изображения разряда при температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм для разных давлений воздуха. Для давления 1500 Па наблюдалось яркое свечение тлеющего разряда, которое уменьшалось и концентрировалось в центре при увеличении давления. При превышении до 2500 Па разряд посте-

пенно переходил в коронный режим. При давлении 4500 Па наблюдался коронный разряд со слабым свечением на аноде.

Исходя из вышеприведенных данных, межэлектродное расстояние было уменьшено до 5 мм. На рис. 5 приведены изображения разряда при температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 5 мм для различных давлений воздуха. При давлении 1500 Па тлеющий разряд существовал в диффузной форме, и его свечение практически полностью покрывало поверхность катода. При увеличении давления диффузная форма разряда постепенно исчезала, и становились видны разрядные каналы, концентрировавшиеся в центре разрядной области. Свечение разряда собиралось в центре катода, и возникал тлеющий разряд. Сравнивая разрядные изображения при межэлектродных расстояниях 10 и 5 мм, можно заклю-

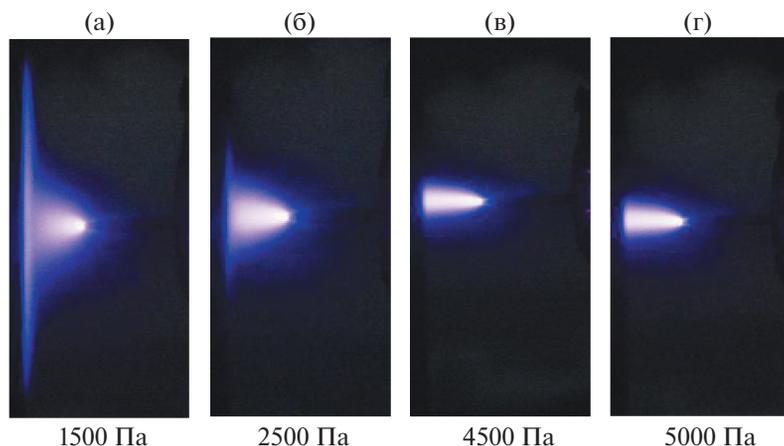


Рис. 5. Изображения разряда при температуре 295 К, межэлектродном расстоянии 5 мм и давлении: 1500 Па (а), 2500 Па (б), 4500 Па (в) и 5000 Па (г).

чить, что межэлектродное расстояние и давление совместно определяют режим разряда: чем больше межэлектродное расстояние и выше давление, тем проще осуществить переход в режим коронного разряда.

На рис. 6 приведены зависимости разрядного тока от давления при температуре 295 К для различных межэлектродных расстояний. Можно заметить, что величина тока уменьшалась с увеличением давления при межэлектродных расстояниях 10 и 5 мм. Из сопоставления этих наблюдений с изображениями разряда можно заключить, что при давлении 5000 Па и расстоянии между электродами 5 мм разряд все еще находился в форме тлеющего разряда. Увеличение межэлек-

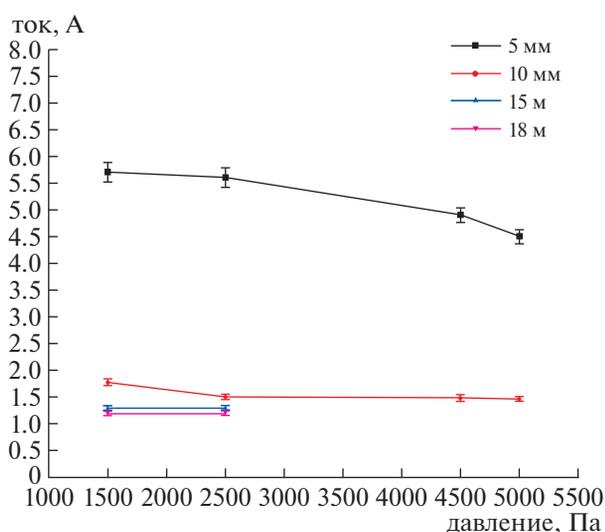


Рис. 6. Зависимость величины тока от давления при различных межэлектродных расстояниях и температуре 295 К.

тродного расстояния до 10 мм и превышение давления 3000 Па приводило к переходу в режим коронного разряда. При увеличении межэлектродного расстояния с 5 до 18 мм значительно уменьшалась амплитуда тока, что находится в согласии с результатами работы [19], где амплитуда тока при увеличении длины разрядного промежутка с 6 до 14 см уменьшилась со 135 до 15 А. Если межэлектродное расстояние превышало 15 мм, то величина тока слабо зависела от давления. Также можно отметить, что увеличение давления приводило к уменьшению интенсивности излучения. При превышении давления 2500 Па пробой разрядного промежутка не происходило.

Таким образом, были исследованы основные закономерности смены режимов разряда при различных давлениях и межэлектродных расстояниях. При межэлектродных расстояниях меньше 10 мм режим коронного разряда не наблюдался. Переход в этот режим происходил только для расстояний больше 10 мм. Как показано на рис. 7, голубая часть графика соответствует режиму тлеющего разряда, а розовая – режиму коронного разряда. Однако приведенная зависимость может лишь частично отражать особенности перехода между режимами разряда. Для более полного описания требуются дальнейшие исследования.

3.2. Влияние на разряд температуры воздуха

На рис. 8 показано влияние температуры на разряд при давлении 4000 Па и межэлектродном расстоянии 10 мм. Как видно из рисунка, при температуре 295 К разряд являлся коронным. При увеличении температуры постепенно формировался и расширялся разрядный канал, и разряд из коронного переходил в тлеющий. При 425 К можно было наблюдать очень слабый тлеющий разряд. Закономерности переходов между

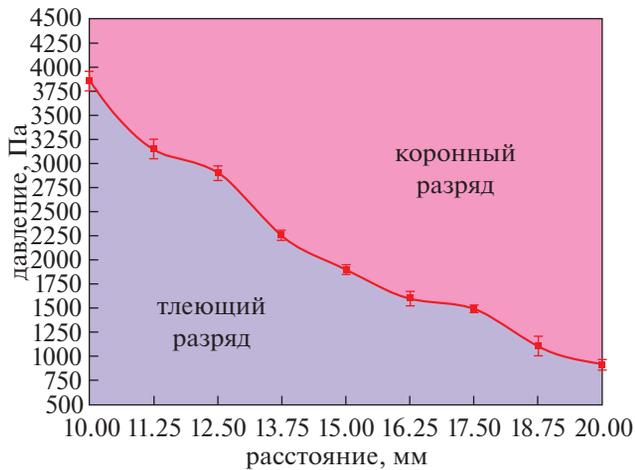


Рис. 7. Условия изменения режима разряда при температуре 295 К.

режимами разряда согласуются с работой [18], в которой одним из результатов является то, что режим тлеющего разряда наблюдался только начиная с температуры 750 К. Основная причина этого заключается в том, что в упомянутой работе эксперименты были выполнены при атмосферном давлении. При низких давлениях температура оказывает значительно большее влияние на режим разряда — переход от коронного разряда к тлеющему достигался уже при 420 К.

На рис. 9 представлены зависимости разрядного тока от температуры при различных давлениях и межэлектродном расстоянии 10 мм. Из приведенных зависимостей видно, что увеличение температуры благоприятствовало разряду — чем выше была температура, тем легче возникал разряд. В частности, величина тока увеличива-

лась одновременно с увеличением температуры и достигала значения 2 А при температуре 425 К для давления 4250 Па. Однако при давлении ниже 3500 Па величина тока слабо зависела от температуры. Причина этого заключается в слишком низком давлении, что означает низкую плотность молекул и слабое влияние на разряд температуры.

В соответствии с полученными данными можно сделать вывод о том, что все рассмотренные параметры — давление p , межэлектродное расстояние d и температура газа T — играли важную роль при формировании режима разряда. При неизменном межэлектродном расстоянии увеличение давления воздуха способствовало переходу из режима тлеющего разряда в режим коронного разряда. Аналогично, увеличение межэлектродного расстояния стимулировало переход между этими формами разряда. В противоположность этому, увеличение температуры способствовало обратной смене режимов. Также стоит отметить, что при пониженных напряжениях режима искрового разряда не наблюдалось.

3.3. Влияние количества острий на разряд

При температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм были проведены эксперименты в одноострийной и двухострийной геометрии электродов. На рис. 10 приведены изображения разряда при различном давлении газа и неизменных параметрах: межэлектродном расстоянии, температуре и приложенном напряжении. В этих экспериментах два острия располагались параллельно друг другу на расстоянии 15 мм. Как показано на фотографиях, разряд в двухострийной геометрии являлся однородным без взаимного влияния разрядов отдельных острий. Форма свечения от каждого острия была схожа со свечением, наблю-

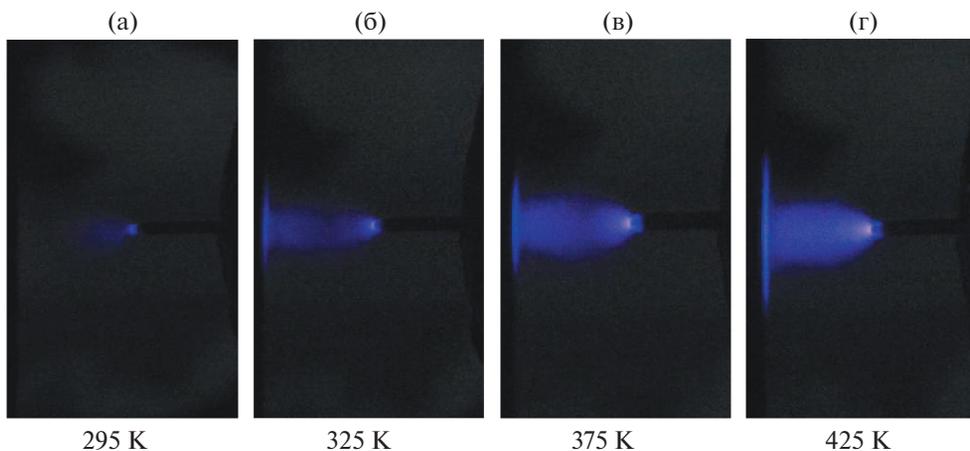


Рис. 8. Фотографии разряда при давлении 4000 Па, межэлектродном расстоянии 10 мм и температуре: 295 К (а), 325 К (б), 375 К (в) и 425 К (г).

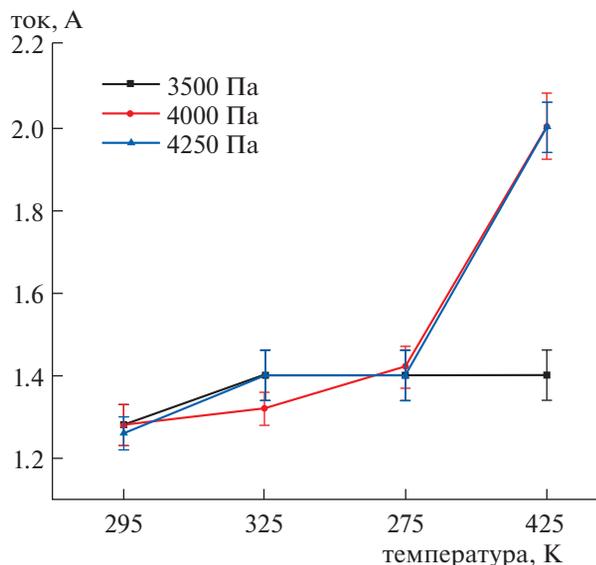


Рис. 9. Зависимость разрядного тока от температуры при различных давлениях для межэлектродного расстояния 10 мм.

даемым для одноострийной геометрии разряда. При давлении 1500 Па осуществлялся режим тлеющего разряда, при давлении 2500 Па излучение тлеющего разряда становилось очень слабым, и при давлении более 3000 Па происходил переход от тлеющего разряда к коронному. При давлении 4500 Па наблюдалось лишь слабое свечение в области острия. Исходя из зависимости амплитуды напряжения от давления газа, приведенной на рис. 11, можно утверждать, что амплитуда напряжения разряда при двухострийной геометрии была ниже, чем при одноострийной, что указывает на снижение порога пробоя при добавлении дополнительного острия.

3.4. Искровой разряд при повышенных напряжениях разряда

На рис. 12 приведены фотографии разряда при повышенном напряжении разряда для межэлектродного расстояния 10 мм и различных газовых температур. Напряжение разряда для условий рис. 12а составляло 11.6 кВ, а разрядный ток – 15.4 и 22 А для температур 325 и 425 К, соответственно. Для условий рис. 12б напряжение разряда составляло 13.6 кВ, а разрядные токи – 15.4 и 23.4 А для температур 295 и 425 К, соответственно. Можно заметить, что режим искрового разряда возникал при более низкой температуре. С увеличением температуры размер искрового канала и область свечения разряда увеличивались. Также при увеличении температуры росла величина разрядного тока.

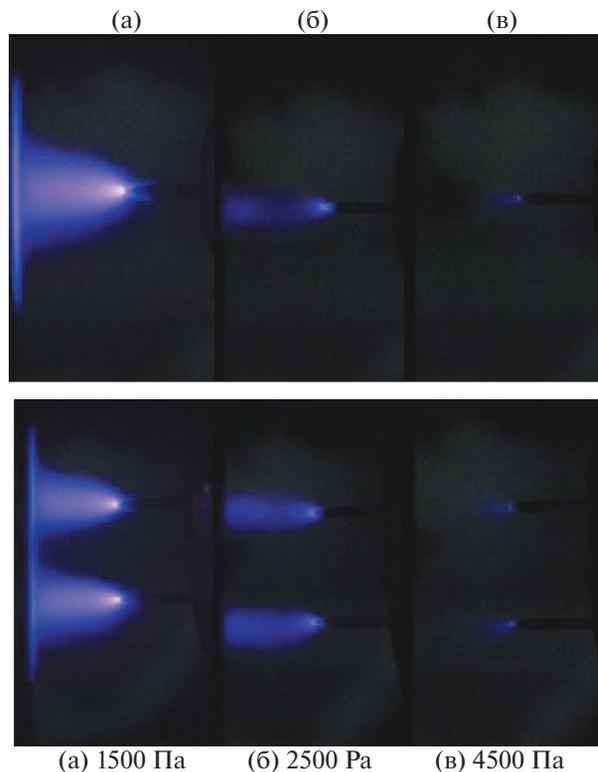


Рис. 10. Изображения разрядов в одно- и двухострийной геометрии при давлении 1500 Па (а), 2500 Па (б) и 4500 Па (в).

Объединяя наблюдения по влиянию температуры на разряд можно утверждать, что изменение температуры являлось эффективным фактором,

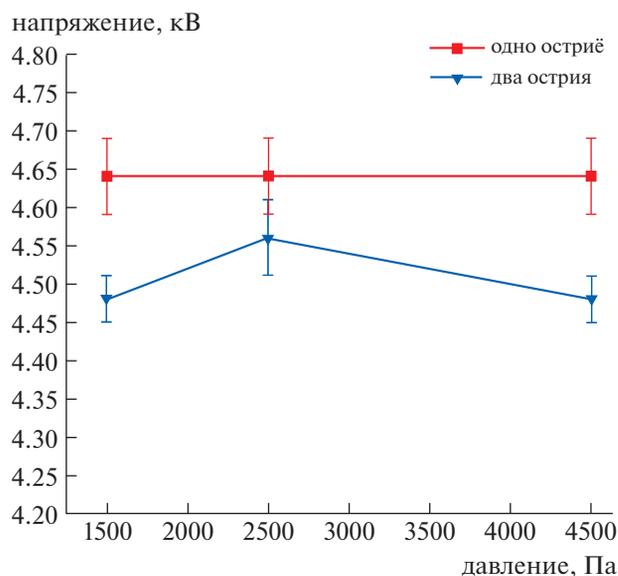


Рис. 11. Зависимость пикового напряжения разряда от давления.

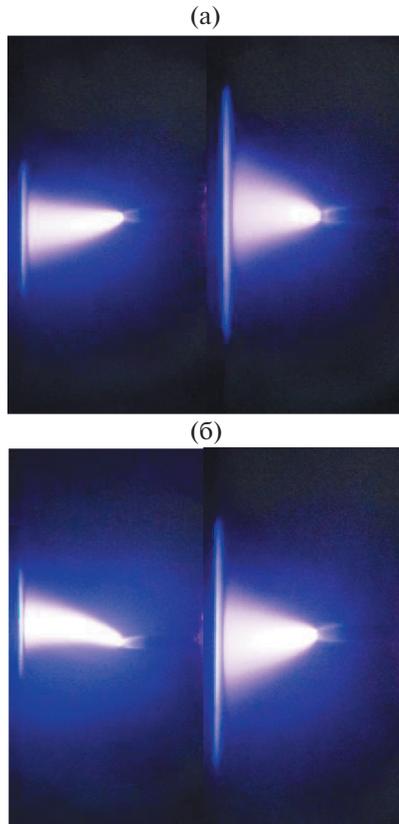


Рис. 12. Фотографии разряда при высоком приложенном напряжении со следующими величинами давления и температуры: 3500 Па, 325 К и 3500 Па, 425 К (а), 4250 Па, 295 К и 4250 Па, 425 К (б).

определявшим параметры разряда. Одновременно с увеличением температуры увеличивался ток разряда. Давление, при котором наблюдался переход в режим искрового разряда, составляло 3500 Па и выше. Увеличение температуры стимулировало развитие разряда, что приводило к увеличению области свечения разряда.

4. ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование импульсного наносекундного разряда при низких давлениях. Изучено влияние давления, температуры и межэлектродного расстояния на характеристики наносекундного импульсного разряда. Дополнительно было проведено обсуждение изменения амплитуды разрядного напряжения при переходе от одноострийной геометрии электродов к двухострийной. При высоких приложенных напряжениях наблюдался переход в режим искрового разряда. Основные выводы заключаются в следующем.

1. Давление воздуха являлось важным фактором, определявшим смену режимов наносекунд-

ного разряда. При напряжении 4.56 кВ, температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм режимы коронного и тлеющего разрядов реализовывались при давлении 4500 и 1000 Па, соответственно. Переход от режима тлеющего разряда к искровому нельзя было осуществить путем изменения давления. Определяющим фактором в данном случае являлось увеличение приложенного напряжения. Режим искрового разряда реализовывался при напряжении 12.8 кВ.

2. Межэлектродное расстояние и давление оказывали совместное влияние на режим разряда — при больших расстояниях и давлениях облегчался переход в режим коронного разряда. Однако при межэлектродных расстояниях 5 мм невозможно было добиться режима коронного разряда путем увеличения давления. Переход в режим коронного разряда наблюдался только для межэлектродного расстояния 10 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что межэлектродное расстояние являлось более важным фактором при переходе к коронному разряду, чем давление.

3. При низком давлении температура эффективно влияла на режим разряда — увеличение температуры стимулировало развитие пробоя. При давлении 4000 Па, межэлектродном расстоянии 10 мм и температуре 295 К наблюдался режим коронного разряда. При достижении температуры 425 К происходил переход в режим слабого тлеющего разряда. Можно сделать вывод, что увеличение температуры способствовало переходу из режима коронного разряда в режим тлеющего разряда. В режиме искрового разряда при повышенном напряжении увеличение температуры приводило к увеличению области свечения разряда и одновременному увеличению разрядного тока.

4. При температуре 295 К и межэлектродном расстоянии 10 мм были реализованы разряды в одно- и двухострийной геометрии электродов. Было отмечено, что разряд в двухострийной геометрии имел однородную структуру и при параллельном расположении острий на расстоянии 15 мм друг от друга разряды от отдельных острий не взаимодействовали между собой. Однако напряжение разряда при двухострийной геометрии электродов было ниже, чем напряжение разряда при одноострийной геометрии, что указывает на уменьшение пробойного напряжения при наличии двух острий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была поддержана фондом естественно-научных исследований Китая (11372352, 51776222) и China Postdoctoral Science Foundation (2017T100772, 2016M590972).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adamovich I.V., Nishihara M.* // 29th ICPIG. 2009.
2. *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A.* // AIAA 2006-1373. 2006.
3. *Yang P.Y., Zhang B.L., Li Y.W.* // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2014. V. 35. P. 1539 [in Chinese].
4. *Correale G., Popov I.B., Rakitin A.E., Starikovski A.Y.* // AIAA 2011-1079. 2011.
5. *Popov N.A.* AIAA 2013-1052. 2013.
6. *Long Y.X., Ling H.X., Meng X.S., Liu F., Luo S.J.* // AIAA 2014-0933. 2014.
7. *Paliwoda M.C., Rovey J.* AIAA 2016-0197. 2016.
8. *Sernenov I., Starikovskiy A., Shneider N.* // AIAA 2016-4307. 2016.
9. *Rouso A.C., Lefkowitz J.K., Ju Y.G.* // AIAA 2016-0958. 2016.
10. *Murray R.C., Zaidi S.H., Shneider M.N.* // AIAA2003-1049. 2003.
11. *Murray R.C., Zaidi S.H., Carraro M.R.* // AIAA2004-1025. 2004.
12. *Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 175202.
13. *Tardiveau P., Moreau N., Jorand F.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 894.
14. *Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Sosnin E.A.* // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. P. 520.
15. *Janda M., Machala Z., Dvonč L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 035201.
16. *Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O.* // Plasma Sources Sci. Technology. 2010. V. 19. P. 065015.
17. *Pai D.Z., Stancu G.D., Lacoste D.A.* // Plasma Sources Sci. Technology. 2009. V. 18. P. 045030.
18. *Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O.* // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. P. 093303.
19. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 093301.
20. *Shao T., Zhang C., Wang R.X.* // High Voltage Engineering. 2016. V. 42. P. 685 [in Chinese].