

УДК 621.384.8

*А.Е. Малютин***ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА  
В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*Рассмотрены результаты экспериментального исследования особенностей горения положительного коронного разряда в потоке газа в ограниченном пространстве разрядной камеры ионного источника атмосферного давления на многоострийном матричном электроде на основе пучков углеродных волокон.*

**Введение.**

В последнее время в масс-спектрометрии проявляется значительный интерес к ионным источникам атмосферного давления. Это обусловлено такими особенностями данных источников, как экспрессность подготовки пробы и высокая чувствительность масс-анализа. Одним из методов ионизации при атмосферном давлении является положительный коронный разряд на многоострийном матричном электроде на основе пучков углеродных волокон [1]. К настоящему времени разработана технология изготовления матричного эмиттера и формовки его эмитирующей поверхности, позволяющая обеспечить стабильность тока коронного разряда в течение длительного времени [2]. Разработана конструкция сменного узла коронирующего электрода. Однако серьезной проблемой данных источников ионов является нестабильность ионного тока, связанная с особенностью горения коронного разряда в ограниченном пространстве разрядной камеры, влиянием на дрейф ионов диэлектрических стенок камеры, формы выходного электрода.

Анализ опубликованных данных по положительному коронному разряду в системе острие – плоскость показал, что процессы, происходящие в открытых системах, изучены достаточно хорошо. Исследований горения коронного разряда в условиях ограниченного пространства практически нет. Не изучено влияние диэлектрических стенок разрядной камеры малых размеров и малых разрядных промежутков на характеристики положительного коронного разряда. В данной работе проводилось экспериментальное исследование условий горения коронного разряда в малых объемах разрядной камеры.

**Методика эксперимента.**

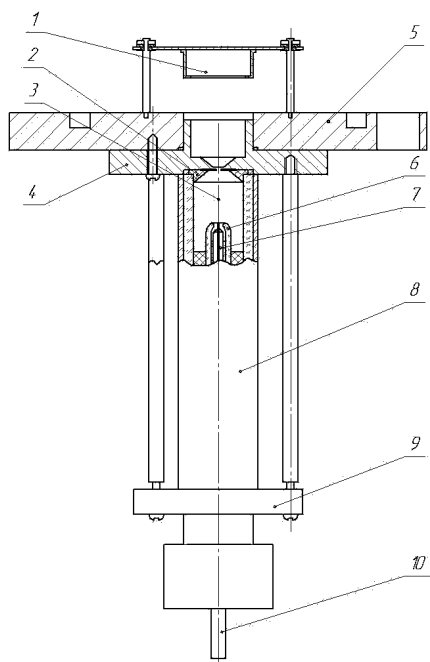
Для проведения сравнительных экспериментов по оптимизации геометрии разрядной камеры ионного источника был разработан универ-

сальный макет (рисунок 1), позволяющий измерять характеристики коронного разряда и визуально наблюдать процесс его горения. Макет состоит из разрядной камеры ионного источника и переходного устройства к вакуумной камере. Источник включает в себя блок коронирующего электрода 7, закрепленного на торце металлической трубки 10, которая использовалась как для ввода пробы в потоке газа-носителя, так и для подвода напряжения к эмиттеру; диэлектрический корпус источника 9, кварцевый наконечник 6, ограничивающий разлет газа из области ионизации. Разрядная камера состоит из кварцевой трубки 3, диэлектрической вставки 2, ограничивающей свободную область диафрагмы с выходным отверстием (соплом), и экранирующего металлического электрода 8. Блок источника через резиновую прокладку закреплялся на переходном фланце 4, который крепился на фланец 5 вакуумной установки, откачиваемой форвакуумным и диффузионным насосами. На противоположной (вакуумной) стороне фланца 5 устанавливался коллектор 1, представляющий собой цилиндр Фарадея. Макет позволял измерять вольт-амперные характеристики коронного разряда при изменении геометрии разрядной камеры и условий прокачки газов различного состава через нее. Одновременно проводилось измерение потока ионов через отверстие в выходной диафрагме.

Форма светящихся областей коронного разряда визуально наблюдалась через продольную щель в экранирующем электроде. Универсальный макет закрывался от внешнего освещения световым экраном с вмонтированной в тубус наблюдения лупой.

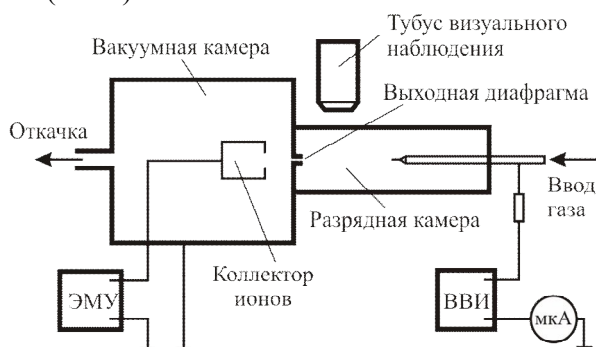
Конструкция макета позволяла изменять расстояние между коронирующим электродом и диафрагмой от 5 до 15 мм. Имелась возможность изменения диаметра разрядной камеры путем смены кварцевых трубок. Через разрядную каме-

ру можно было прокачивать воздух, гелий, смесь гелия и воды, гелия и органических соединений.



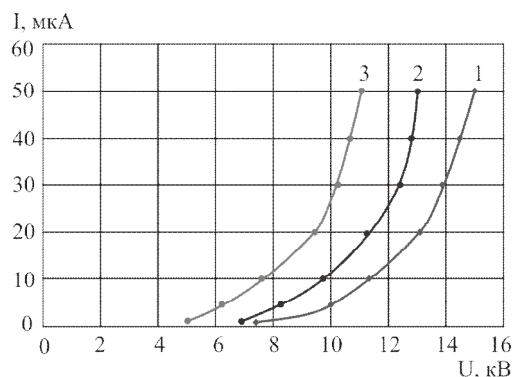
**Рисунок 1 – Конструкция экспериментального макета ионного источника атмосферного давления**

Вакуумная и электрическая схема испытательного стенда представлена на рисунке 2. Для проведения электрических измерений использовался регулируемый источник высокого напряжения (ВВИ) до 15 кВ. Ограничительное сопротивление, включенное в цепь для защиты эмиттера от разрушения при переходе разряда в дуговую форму, составляло 100 МОм, ток коронного разряда измерялся микроамперметром, ток ионов, прошедших через сопло в вакуумную камеру, измерялся электрометрическим усилителем (ЭМУ).



**Рисунок 2 – Схема испытательного стенда  
Результаты эксперимента.**

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) положительной короны при различных диаметрах разрядной камеры, ограниченной кварцевыми трубками с внутренними диаметрами  $D_1=3$  мм,  $D_2=5,5$  мм,  $D_3=10$  мм, представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики положительной короны при различных диаметрах разрядной камеры D: 1 –  $D_1=3$  мм; 2 –  $D_2=5,5$  мм; 3 –  $D_3=10$  мм. Межэлектродное расстояние  $d=10$  мм**

Из эксперимента следует, что напряжение горения разряда возрастает с уменьшением диаметра разрядной камеры. Благодаря использованию в качестве коронирующего электрода отформованного пучка углеродных волокон, на ВАХ не наблюдаются перескоки при переходе от малых токов к большим, что отмечалось в работах [3, 4].

Визуальное наблюдение картины коронного разряда показало, что при малых (до 10 мкА) токах на конце коронирующего электрода наблюдается яркое свечение голубого цвета, все остальное пространство остается темным. При увеличении тока разряда наблюдается появление тонкого (не более 0,5 мм в диаметре) и короткого (несколько мм в длину) светящегося шнура или плазменного столба (ПС), выходящего из коронирующей области разряда (рисунок 4). Цвет свечения ПС – красно-оранжевый. Длина ПС с ростом тока разряда возрастала.



**Рисунок 4 – Характерный вид положительного коронного разряда с плазменным столбом (ПС) (фотография получена цифровой камерой)**

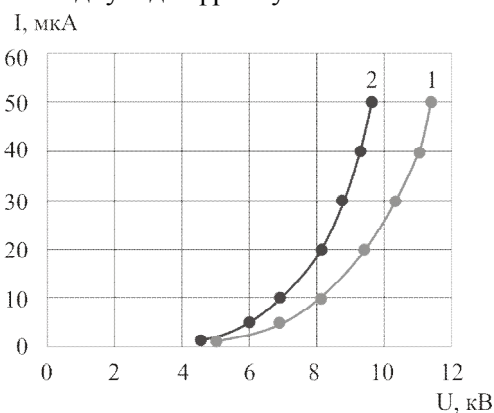
Было замечено, что при малых диаметрах разрядной камеры ПС был нестабилен, покачивался и даже замыкался на стенки диэлектрической разрядной камеры. Ток разряда при этом также был нестабилен. При увеличении диаметра разрядной камеры до значения 10 мм положение ПС заметно стабилизировалось и совпадало с геометрической осью камеры.

Для эффективной работы ионного источника в динамическом режиме, например в сочетании с

хроматографом, требуется иметь как можно меньший объем разрядной камеры, определяющий «память» источника. В связи с этим дальнейшие эксперименты проводились с разрядной камерой диаметром 10 мм – наименьшим размером разрядной камеры, обеспечивающим стабильность горения разряда.

Проводился анализ вольт-амперных характеристик разряда при различных расстояниях между коронирующим электродом и выходной диафрагмой (катодом). Межэлектродные расстояния составляли  $d_1=15$  мм,  $d_2=12,5$  мм,  $d_3=10$  мм,  $d_4=7,5$  мм. Замечено, что с ростом межэлектродного расстояния  $d$  напряжение горения разряда растет. Также наблюдались пространственные колебания ПС при максимальном и минимальном значениях расстояния. При малых расстояниях возрастала нестабильность тока разряда и наблюдалось искровое перекрытие промежутка. Наибольшая стабильность тока ПС соответствовала межэлектродному расстоянию 10 мм.

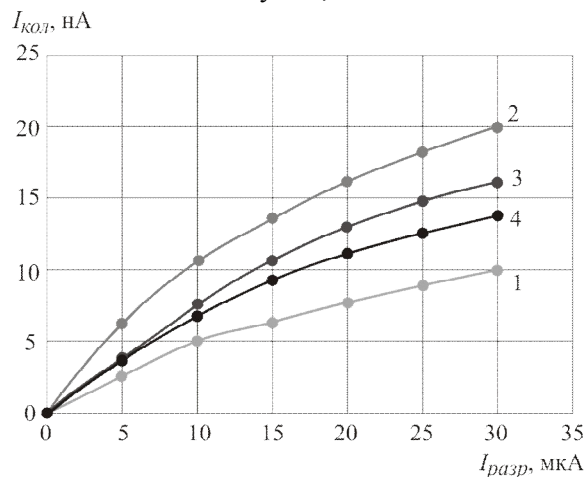
Источник ионов атмосферного давления предполагает необходимость прокачки газа через разрядную камеру при постоянном давлении. Все предыдущие эксперименты проводились при постоянной газовой среде. На рисунке 5 представлены вольт-амперные характеристики без прокачки (1) и при прокачке газа (2) через разрядную камеру. При прокачке наблюдалось уменьшение напряжения горения разряда. При этом длина ПС незначительно возрастала и стабильность его положения не нарушалась. Прокачка осуществлялась при установке экспериментального макета на вакуумную откачную систему. Газ поступал в разрядную камеру через металлическую трубку в коронирующую область вдоль пучка углеродных волокон и откачивался через выходную диафрагму.



**Рисунок 5 – Вольт-амперные характеристики для разрядной камеры диаметром 10 мм и межэлектродным расстоянием 10 мм без прокачки (1) и с прокачкой газа через камеру (2)**

В этом эксперименте проводилось измерение тока ионов, выходящих через сопло выход-

ной диафрагмы в вакуумную камеру. При этом исследовалась зависимость тока ионов  $I_{кол}$  от тока коронного разряда  $I_{разр}$  при прокачке различных газов и их смеси (рисунок 6). Исследовались зависимости  $I_{кол}$  от  $I_{разр}$  для смеси газа-носителя гелия с воздухом, водой и ацетоном.



**Рисунок 6 – Зависимость тока ионов  $I_{кол}$  от величины тока разряда  $I_{разр}$  при прокачке различных газов через разрядную камеру: 1 – воздух; 2 – He; 3 – He+вода; 4 – He+ацетон**

Теоретическое моделирование показало, что распределение электрического поля в системе острие – плоский диск (диафрагма) в объеме, ограниченном диэлектрическими стенками, существенно отличается от распределения в открытом пространстве. Это должно существенно влиять на горение положительного коронного разряда и условия дрейфа ионов в области слабого электрического поля вдали от коронирующего электрода.

#### Обсуждение результатов.

Как показал эксперимент, ВАХ положительной короны на многоострийном матричном электроде на основе пучков углеродных волокон не имеют скачков и отличаются большой крутизной. Это объясняется тонкой структурой электрического микрополя высокой напряженности вблизи отдельных углеродных волокон, при этом подключаются дополнительные механизмы ионизации – полевая ионизация.

Характеристики коронного разряда существенно зависят от геометрии разрядной камеры. Напряжение горения разряда и его стабильность существенно зависят от диаметра диэлектрической разрядной камеры. Увеличение диаметра приводит к стабилизации положения плазменного столба разряда и снижению напряжения горения разряда. Это объясняется влиянием диэлектрических стенок на условия дрейфа ионов в разрядном промежутке в среде нейтральных молекул газа.

Часть ионов уходит на стенки камеры, приводя к появлению на них дополнительного поверхностного заряда, снижая напряженность поля в коронирующей области. Заряд в результате хаотического движения ионов в газовой среде неоднороден и приводит к колебаниям напряженности поля, приводящим к нестабильности тока и положения плазменного столба. Оптимальный диаметр разрядной камеры, равный 10 мм, ограничивается с меньшей стороны нестабильностью разряда, а с большей – увеличением «памяти» источника ионов. Оптимальный размер межэлектродного промежутка составляет 10 мм. С большей стороны он ограничен ростом напряжения горения, а с меньшей – нестабильностью тока из-за увеличения вероятности перехода разряда в искровую форму.

Анализ результатов визуального наблюдения коронного разряда позволил выбрать оптимальную величину тока разряда в интервале 10-20 мкА. Этот интервал определяется стабильной локализацией плазменного столба на оси разрядной камеры, с одной стороны, и достаточной величиной тока ионов, поступающих в камеру масс-спектрометра, – с другой. Увеличение тока разряда выше выбранного интервала приводит к появлению светящейся области вблизи катода (диафрагмы), что свидетельствует об увеличении влияния катодных процессов на образование дополнительных ионов в области выходного отверстия диафрагмы, и дополнительному разбросу ионов по энергиям.

Сравнение вольт-амперных характеристик разряда в условиях прокачки газа через камеру и в условиях естественной конвекции подтвердило

положительное влияние выбранного способа прокачки (вдоль пучка углеродных волокон непосредственно в коронирующую область) на стабилизацию параметров ионного источника. Снижение напряжения горения разряда при прокачке свидетельствует о повышении эффективности ионизации.

Анализ зависимости тока ионов на выходе источника от тока разряда для различных составов газовых смесей показал, что для чистого газа (гелия) ток ионов выше, чем для смесей газов, при этом не наблюдается появления плазменного столба. Это явление можно объяснить различными условиями ионизации компонентов смесей газов.

В целом полученные результаты свидетельствуют о необходимости оптимизации разрядной камеры источника ионов и перспективности применения в нем положительной короны с многоострийным матричным электродом на основе углеродных волокон.

#### **Библиографический список**

1. Овсянников Н.П., Малютин А.Е., Минеев В.В. Ионный источник атмосферного давления на коронном разряде // Научное приборостроение: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2005. Т. 1. С. 41-51.
2. Овсянников Н.П., Малютин А.Е. Матричные эмиттеры на основе углеродных волокон для электронных и ионных источников // Вестник РГРТА. Вып 17. 2006. С. 89-94.
3. Козлов Б.А., Соловьев В.И., Фомин С.Г. Предельный ток многоострийного коронного разряда // Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2005.
4. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: Издательство иностранной литературы, 1960.