

03;04;12

Исследование „электрического ветра“ в электродных системах с коронирующими остриями

© Б.А. Козлов, В.И. Соловьев

Рязанская государственная радиотехническая академия,
390005 Рязань, Россия
e-mail: kozlov.qe@post.rzn.ru

(Поступило в Редакцию 14 ноября 2006 г.)

Исследованы характеристики „электрического ветра“, сопровождающего горение коронного разряда, с целью выяснения условий достижения максимальных значений скорости и потока. Используются системы с одиночным коронирующим острием и однорядным многоострийным электродом. Выявлена зависимость характеристик газового потока от величины тока, напряжения, его полярности, межэлектродного расстояния, конфигурации коронирующих острий, конструкции некоронирующего электрода.

PACS: 52.80.Nc

Введение

Известно, что горение униполярного коронного разряда сопровождается возникновением специфического движения газа, носящего название „электрический ветер“ [1]. Возникновение направленного потока газа от коронирующего электрода в окружающее пространство обусловлено передачей импульса ионов, движущихся в этом направлении во внешней униполярной области коронного разряда, частицам газа при столкновении с ними. Довольно подробный библиографический список работ, посвященных изучению „электрического ветра“, приведен в [2]. Как физическое явление „электрический ветер“ известен давно. В то же время поскольку его целенаправленное применение практически отсутствует, результаты исследования этого явления остаются еще довольно скудными.

Повышение интереса к изучению этого явления в настоящее время обусловлено возможностью его использования для формирования скоростных газовых сред, не допускающих появления каких-либо органических загрязнений, т. е. когда применение традиционных электромеханических систем затруднительно или полностью исключено. В других случаях целесообразность использования систем формирования газовых потоков на основе „электрического ветра“ обусловлена рядом преимуществ по сравнению с традиционными электромеханическими, заключающимися в отсутствии движущихся частей, простоте конструкции, надежности, минимальных размерах и весе, низкой стоимости изготовления, практически неограниченном ресурсе, „вакуумной чистоте“. В частности, системы прокачки газа на основе электрического ветра нашли применение в малогабаритных оптических ТЕА-лазерах [3–5]. Эффективность системы здесь, как и в других случаях, определяется скоростью газового потока. В связи с этим целью проводимых в настоящей работе исследований является выяснение условий, обеспечивающих возможность достижения максимальных значений скорости электрического ветра.

Исследования выполнялись применительно к электродным системам с коронирующими остриями. Применение последних вместо более простых проволочных электродов определяется в ряде случаев их большей надежностью и виброустойчивостью. (Результаты детального исследования характеристик самого коронного разряда в таких электродных системах приведены в работе [6]).

Выяснялась зависимость характеристик газового потока, выходящего из межэлектродного промежутка, от величины тока вплоть до его предельных значений, напряжения и его полярности, межэлектродного расстояния, конфигурации коронирующего и некоронирующего электродов.

1. Методика эксперимента

Все измерения проводились на открытом воздухе при атмосферном давлении и нормальной температуре. В качестве датчика скорости использовался бусинковый полупроводниковый терморезистор СТЗ-18. Его небольшие размеры (не более 0.5 mm) позволяли проводить измерения без существенного искажения газового потока. Небольшая постоянная времени (около 1 s) позволяла получать определенную информацию о степени его турбулизации. Датчик калибровался в потоке воздуха, скорость которого измерялась с помощью крыльчатого анемометра АСО-3.

В качестве острий использовались стальные иглы диаметром 0.5–0.6, длиной конической части 3 и радиусом кривизны вершины острия не более 0.5 mm. При выяснении влияния формы острий использовались также острия с диаметрами цилиндрической части от 0.5 до 3, длиной конической части от 0.8 до 3 и радиусами кривизны вершины от 0.03 до 1.5 mm при полусферическом закруглении вершины.

В качестве некоронирующих электродов применялись различные плоские металлические сетки с квадратными

№	Вид электрода	Характерные размеры		
		диаметр проволоки или стержня, mm	шаг, mm	коэффициент заполнения
1	Сетка с квадратными ячейками	0.2	1.2	0.31
2	То же	0.4	2.3	0.31
3	"	0.3	1.4	0.44
4	"	0.4	1.8	0.44
5	Стержневой	2.5	7	0.36
6	"	1.0	8	0.125

ячейками (см. таблицу), стержневые, кольцевые и другие конструкции.

Поскольку датчик скорости располагался на небольших расстояниях от высоковольтного промежутка (если нет специальной оговорки, оно составляло 2 см), некоронирующий электрод заземлялся. Для зажигания отрицательной и положительной корон использовались два отдельных регулируемых источника напряжения положительной и отрицательной полярности с максимальным напряжением 35 kV.

Измерение характеристик коронного разряда и газового потока проводилось в диапазоне токов разряда от минимальной в данных экспериментах величины 2–5 μA до предельных значений, соответствующих переходу коронного разряда в искровой.

Измеряемые потоки характеризовались, как правило, значительной турбулентностью. При неизменном положении датчика из-за флуктуаций скорости показания измерительного прибора могли изменяться во времени (особенно на краях профиля скорости) в 1.5–2 раза. Для определения положения, соответствующего максимальной скорости, т.е. оси потока, а также для измерения профиля скоростей потока датчик мог перемещаться в поперечной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При измерении скорости на оси потока перемещением датчика всякий раз фиксировались его максимальные показания.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

2.1. Одинокое острие

2.1.1. Зависимость скорости, профилей скорости, величины потока от тока, межэлектродного расстояния, полярности напряжения

В данном разделе представлены результаты, полученные при использовании в качестве некоронирующего электрода сетки № 1.

Зависимости скорости на оси газовой струи V_0 от тока при различных межэлектродных расстояниях для отрицательной и положительной корон представлены на рис. 1. Скорость измерялась здесь на расстоянии 2 см за

некоронирующим электродом, рис. 2 дает представление об изменении ее величины в направлении движения потока.

Имеющиеся в литературе данные показывают наличие примерно линейной зависимости скорости ветра от корня квадратного из тока разряда [1,2]. Такой характер зависимости вытекает из общих энергетических соображений. Действительно, энергия движущегося потока $mv^2/2$ пропорциональна энергии, получаемой им от поля. Последняя, в свою очередь, пропорциональна концентрации ионов в этом потоке n_i и напряженности поля E , определяющей энергию, приобретаемую ионом на длине свободного пробега и передаваемую при соударениях молекулам газа. Поскольку $n_i = j/v_{dr} = j/\mu E$ (v_{dr} — скорость дрейфа, j — плотность тока, μ — подвижность ионов), энергия движущегося потока $mv^2/2$ пропорциональна j/μ . Соответственно скорость пропорциональна квадратному корню из отношения плотности тока к подвижности ионов.

Полученные результаты подтверждают наличие такой зависимости только при относительно небольших значениях тока. При приближении к предельным значениям нарастание скорости существенно замедляется, а в случае положительной короны скорость начинает даже

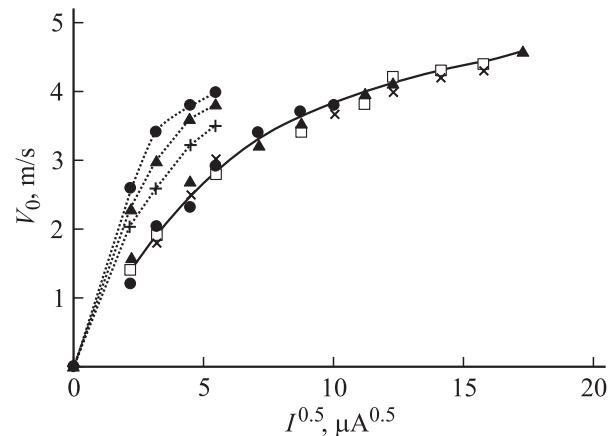


Рис. 1. Зависимости скорости ветра на оси потока на расстоянии 2 см за сеткой № 1 от корня квадратного из тока разряда для положительной (пунктир) и отрицательной (сплошная кривая) корон при различных межэлектродных расстояниях: ● — 5; ▲ — 10; □ — 15; × — 20; + — 30 мин.

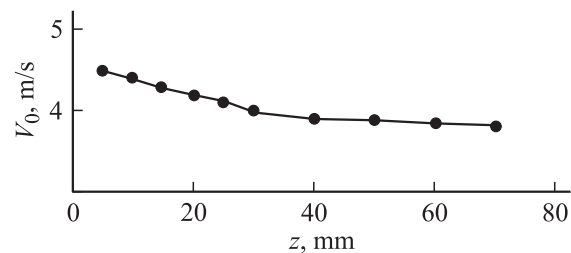


Рис. 2. Изменение скорости V_0 в направлении распространения „электрического ветра“: отрицательная корона; межэлектродное расстояние — 10 мин; ток — 200 μA .

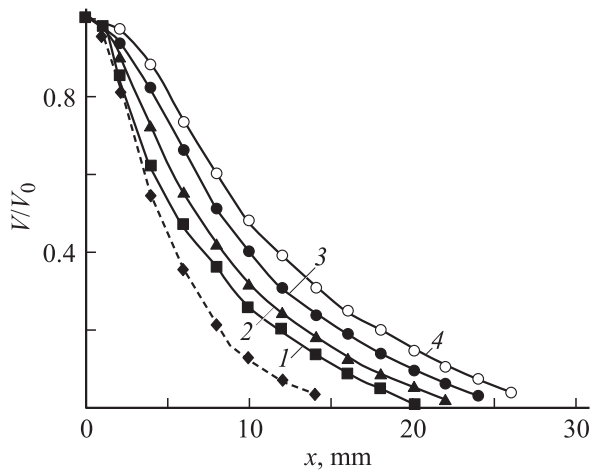


Рис. 3. Профили скорости ветра: межэлектродное расстояние 10 mm, пунктир — положительная корона (расстояние от сетки — 3 см, ток — $10 \mu\text{A}$), сплошные кривые — отрицательная корона (расстояние от сетки — 2 см, ток: 1 — 10; 2 — 20; 3 — 100; 4 — $200 \mu\text{A}$).

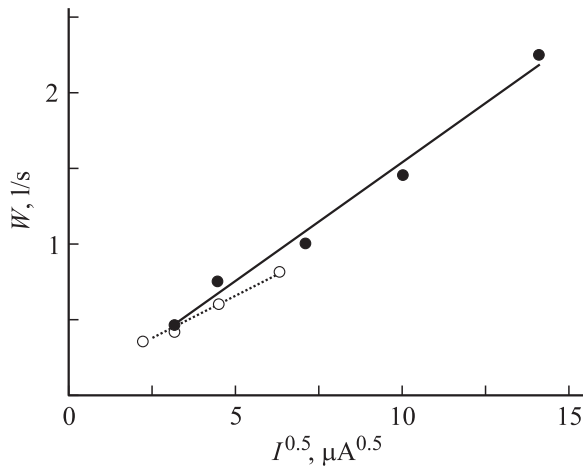


Рис. 4. Зависимость величины потока от корня квадратного из тока разряда: межэлектродное расстояние — 10 mm, пунктир — положительная корона; сплошная кривая — отрицательная.

уменьшаться. Скорее всего, это обусловлено уменьшением степени униполярности тока разряда в результате появления положительных ионов во внешней области отрицательной короны и возникновением стримеров в случае положительной короны.

Результаты измерения профилей скоростей электрического ветра при различных значениях тока представлены на рис. 3. На основании этих данных проведена оценка общей величины потока и ее зависимости от тока (рис. 4).

При неизменном расстоянии между электродами профиль скоростей потока несколько расширяется с ростом тока (несмотря на то что ширина профиля плотности тока при этом практически не изменяется [6]). В резуль-

тате величина потока возрастает быстрее, чем скорость на оси и, как видно из рис. 4, пропорциональна корню квадратному из тока практически до его предельных значений.

С увеличением межэлектродного расстояния несмотря на увеличение протяженности внешней оболочки разряда и соответственно области дрейфа ионов V_0 практически не изменяется (рис. 1). В случае положительной короны она имеет даже некоторую тенденцию к снижению. Такая ситуация объясняется тем, что газовый поток, как показывают результаты исследования ветра в самом высоковольтном промежутке [2], формируется непосредственно вблизи коронирующего острия, где напряженность поля, плотность тока максимальны и соответственно максимальна скорость. Несмотря на увеличение расстояния, проходимого ионами во внешней области разряда, скорость на оси практически не изменяется, или даже несколько снижается, что связано как с уменьшением плотности тока и напряженности поля, так и с наличием сопротивления потоку, обусловленного внутренним трением.

В связи с расширением профиля плотности тока при увеличении расстояния [6] в движение вовлекается больший объем газа (рис. 5). В результате несмотря на то что скорость на оси потока практически не изменяется, как видно из рис. 6, увеличивается примерно пропорционально расстоянию.

При одинаковой величине тока в положительной короне формируются более узкие и скоростные потоки, что может быть обусловлено в определенной степени меньшей подвижностью положительных ионов по сравнению с отрицательными [7,8]. Однако предельные токи положительной короны (соответствующие переходу к стримерному режиму, при котором скорость не растет,

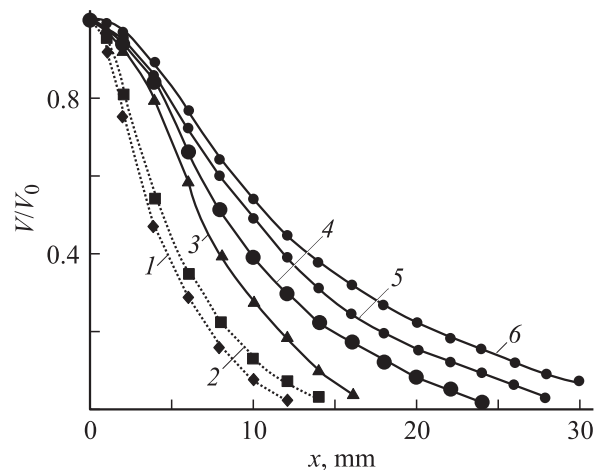


Рис. 5. Профили скорости ветра: пунктир — положительная корона (расстояние от сетки — 3 см, ток $20 \mu\text{A}$, расстояние острие–сетка № 1: 1 — 5, 2 — 10 mm); сплошные кривые — отрицательная корона (расстояние от сетки — 2 см, ток — $100 \mu\text{A}$, расстояние острие–сетка № 1: 3 — 5; 4 — 10; 5 — 15; 6 — 20 mm).

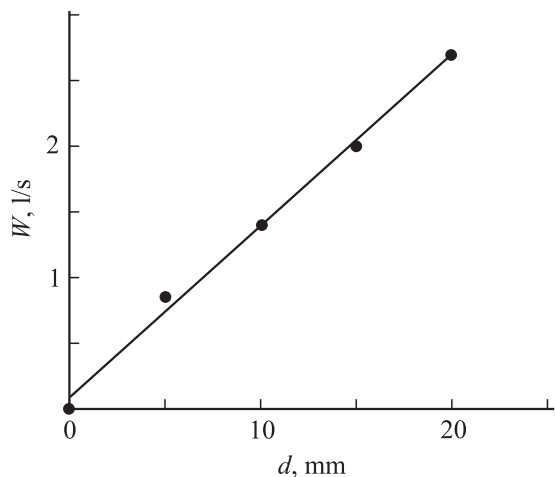


Рис. 6. Зависимость величины потока от межэлектродного расстояния; отрицательная корона; ток $100 \mu\text{A}$.

а даже уменьшается) значительно меньше предельных токов отрицательной короны. Поэтому в предельных режимах отрицательной короны обеспечиваются заметно большие потоки при примерно таких же максимальных скоростях на оси. В условиях эксперимента при напряжении 30 kV и межэлектродных расстояниях $1.5\text{--}2 \text{ cm}$ предельные значения скорости и потока составили 4.5 m/s и $\sim 3 \text{ l/s}$.

Следует также иметь в виду, что предельные токи отрицательной короны в случае одиночного острия растут с увеличением расстояния [6]. Поэтому предельно достижимые параметры газового потока должны определяться значением напряжения источника питания, определяющим максимальное расстояние, при котором достигаются предельные токи короны. В работе [2], например, приведены сведения о достижении наибольшей скорости 9 m/s при использовании источника напряжением до 60 kV и расстоянии от острия до плоскости 40 mm .

2.1.2. Зависимость характеристик газового потока от геометрии коронирующего и некоронирующего электродов

С учетом результатов, полученных в системе с одиночным острием, относительно влияния полярности напряжения все дальнейшие измерения проводились только при отрицательной полярности коронирующего электрода.

Исследования влияния геометрии острий на характеристики потока показали, что при одинаковом токе зависимость скорости от формы и радиуса кривизны вершины используемых в работе острий практически отсутствует несмотря на различие напряжений, соответствующих одному и тому же значению тока (меньшие напряжения соответствуют меньшему радиусу кривизны острия). В то же время при минимальном радиусе кривизны вершины острия, составляющем примерно

$30 \mu\text{m}$, отмечается практическое отсутствие флуктуаций скорости при токах до $100 \mu\text{A}$, что обусловлено жесткой привязкой очага короны к вершине острия. При радиусе кривизны более 1 mm визуально заметна локализация очага короны в виде отдельной точки на полусферической поверхности. Его мерцание и перемещение по поверхности вызывает значительные флуктуации скорости.

Результаты, иллюстрирующие влияние на характеристики потока геометрии некоронирующего электрода, представлены на рис. 7. Как и следовало ожидать, уменьшение коэффициента заполнения сетки (отношения диаметра проволоки к шагу) в результате уменьшения сопротивления проходящему через нее потоку обеспечивает возможность получения больших скоростей. При одинаковом коэффициенте заполнения (рис. 7, 1–4) большие скорости обеспечиваются при большем шаге сетки. Наибольшие скорости соответственно достигаются в случае стержневых конструкций (5, 6).

При использовании некоронирующих электродов с малым коэффициентом заполнения следует учитывать возможность возникновения обратной короны, приводящей к снижению скорости потока в связи с появлением ионов, движущихся в противоположном направлении. Так, при коэффициенте заполнения 0.125 и диаметре стержней 1 mm (электрод 6) уменьшение скорости, обусловленное возникновением обратной короны с тонких стержней, наблюдается при токе более $100 \mu\text{A}$ (рис. 7). О возникновении обратной короны свидетельствует значительное увеличение тока с 100 до предельной величины $400 \mu\text{A}$ при незначительном увеличении напряжения от 12 до 12.8 kV . При диаметре стержней 2.5 mm увеличению тока с 100 до предельной величины $250 \mu\text{A}$ соответствовал рост напряжения с 12.8 до 17.2 kV .

Максимальные скорости „электрического ветра“ в экспериментах с одиночным острием 5 m/s были за-

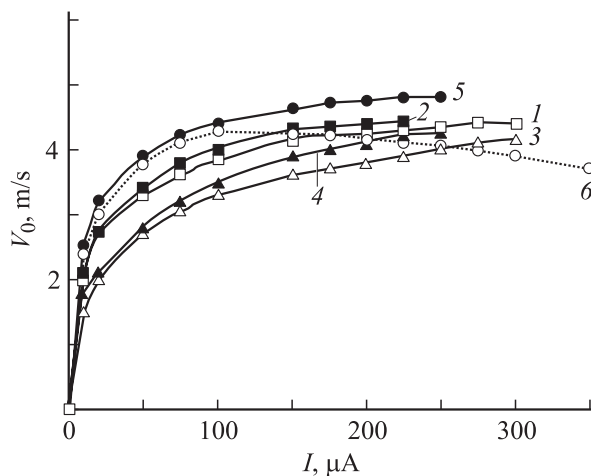


Рис. 7. Зависимости скорости ветра на оси потока от тока разряда и геометрии некоронирующего электрода: межэлектродное расстояние 10 mm ; расстояние от некоронирующего электрода 20 mm ; номер кривой соответствует номеру некоронирующего электрода (см. таблицу).

фиксированы при некоронирующем электроде в виде кольца (внутренний и внешний диаметры 10 и 12, высота — 5.5 mm). Такая конструкция позволяет повысить плотность тока во внешней области короны, поскольку профиль плотности тока задается размерами кольца, соответственно плотность тока во внешней области короны мало изменяется с увеличением расстояния. В связи с этим, в отличие от плоских электродов (сеточных или стержневых), отмечается некоторое увеличение скорости на оси потока при увеличении расстояния.

Таким образом, для достижения максимальной скорости конструкция некоронирующего электрода должна обеспечивать возможно большую плотность тока во внешней области разряда.

2.2. Многоострый электрод

Многоострый электрод моделировался системой из 7 острий: 3 основных и по 2 охранных острия с каждой стороны для обеспечения одинаковой напряженности поля на основных остриях. Шаг острий составлял 5 mm. Согласно ранее полученным результатам [6], при шаге 2.5–5 mm достигаются максимальные токи на единицу длины многоостриной системы.

Отдельно измерялись ток центрального острия, общий ток трех основных острий (для контроля равномерности их работы) и ток всех семи острий.

В качестве некоронирующего электрода использовались: сетка № 1, щель 5 mm с закругленными краями в плоскости, два металлических стержня диаметром по 2.5 или 3 mm с зазором между ними 4, 7.5 и 12 mm.

Характеристики газового потока (максимальная скорость, профили скорости) контролировались на расстоянии 2 cm от некоронирующего электрода в пределах ± 10 mm вдоль ряда острий и ± 20 mm в поперечном направлении от центрального острия.

На рис. 8 представлены зависимости скорости ветра на оси центрального острия от тока острия, т.е. тока, приходящегося на одно острие многоостриной системы, при различных расстояниях и некоронирующем электроде № 1.

При одной и той же величине тока острия скорость на его оси в случае ряда острий, как видно из рис. 8, заметно выше, чем при одиночном острии. Это обусловлено более высокой напряженностью поля во внешней области короны и большей плотностью тока (ширина профиля плотности тока вдоль ряда острий определяется шагом их расположения и не изменяется при увеличении расстояния). В отличие от одиночного острия, где зависимость скорости от расстояния практически отсутствует, заметное увеличение скорости с расстоянием в случае ряда острий обусловлено более медленным уменьшением плотности тока во внешней области короны, поскольку расширение его профиля происходит лишь в направлении, перпендикулярном ряду острий.

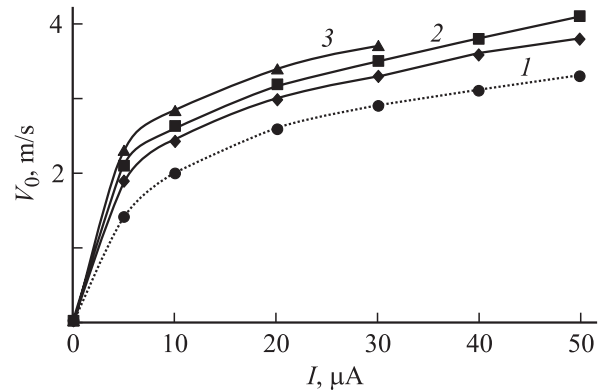


Рис. 8. Зависимости скорости ветра на оси центрального острия от тока острия, отрицательная корона; некоронирующий электрод — сетка № 1; сплошные кривые — многоостриная система при различных межэлектродных расстояниях (1 — 5; 2 — 10; 3 — 20 mm); пунктир — одиночное острие (расстояние 10 mm).

Однако поскольку предельный ток острия в многоостриной системе значительно меньше, чем в случае одиночного острия [6] (при некоронирующем электроде № 1 он составлял соответственно примерно 50–55 и 250–300 мкА), какого-либо существенного различия максимальных значений скорости при предельных значениях токов не наблюдается. Максимальные скорости, соответствующие предельным режимам, в обоих случаях находятся в диапазоне 4–4.5 м/с.

На рис. 9 представлены результаты, полученные при различных некоронирующих электродах. Все кривые здесь заканчиваются при предельных значениях тока, соответствующих переходу коронного разряда в искровой.

Как и в случае одиночного острия, значительно большие скорости наблюдаются при стержневой конструкции некоронирующего электрода. При щелевом электроде скорости по сравнению со стержневым

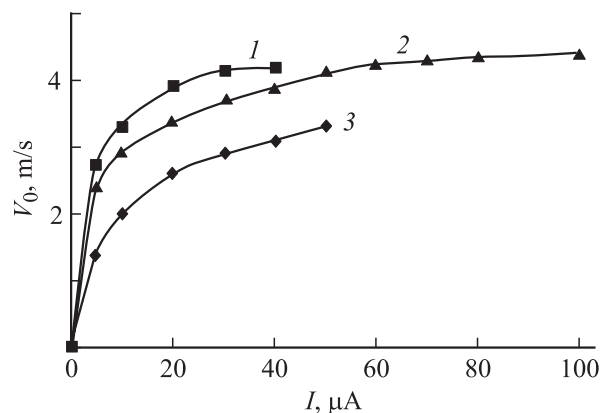


Рис. 9. Зависимости скорости ветра на оси центрального острия от тока острия. Отрицательная корона, расстояние 10 mm, некоронирующий электрод: 1 — два стержня диаметром 2.5 с зазором 4 mm; 2 — щель 5 mm; 3 — сетка № 1.

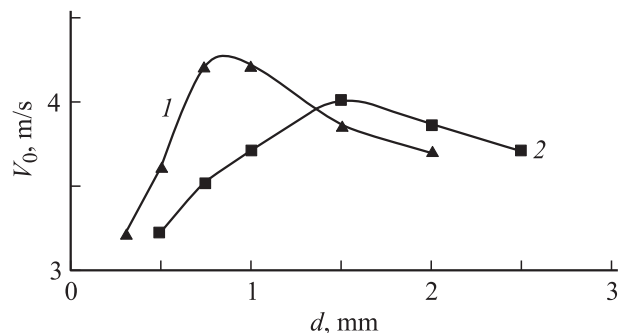


Рис. 10. Зависимости скорости ветра на оси центрального острья от межэлектродного расстояния при токе $40\mu\text{A}$ и различных зазорах между двумя стержнями некоронирующего электрода: 1 — 4; 2 — 7.5 mm.

несколько меньше, однако предельные токи здесь примерно в два раза больше (110 против $45\mu\text{A}$). Поэтому скорости более 4 m/s обеспечиваются при токе, существенно меньшем предельного, т.е. в режиме устойчивого горения коронного разряда.

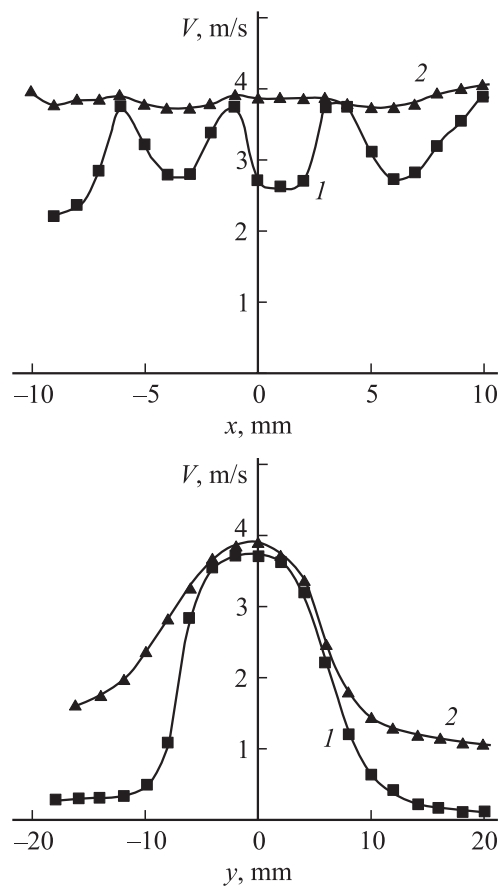


Рис. 11. Профили скорости ветра вдоль ряда острий (x) и в поперечном направлении (y): ток острья $40\mu\text{A}$; шаг острий 5 mm; некоронирующий электрод — два стержня диаметрами по 3 и зазором — 12 mm; межэлектродное расстояние: 1 — 0.5; 2 — 2 cm.

При использовании стержневого или щелевого электродов следует иметь в виду, что скорость зависит от соотношения межэлектродного расстояния и ширины зазора между стержнями или ширины щели (рис. 10).

При одинаковом токе зависимость скорости от расстояния имеет оптимальный характер. С увеличением расстояния скорость сначала увеличивается, далее несколько уменьшается. Расстояние, при котором обеспечивается максимальная скорость потока, определяется величиной зазора между стержнями. При зазорах 4, 7.5 и 12 mm максимум скорости наблюдался соответственно при расстояниях 7.5, 15 и 20 mm, примерно вдвое превышающих величину зазора.

Результаты измерения профилей потока, формируемого многоострийной системой, представлены на рис. 11.

Однородность потока вдоль ряда острий, как показали результаты измерений, обеспечивается при расстоянии, в 3–4 раза превышающем шаг расположения острий.

Заключение

Проведено исследование „электрического ветра“, сопровождающего горение коронного разряда, применительно к электродным системам с коронирующими острями.

Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. Линейная зависимость скорости ветра на оси потока от корня квадратного из тока разряда подтверждается лишь в области относительно небольших значений тока. При токах, близких к предельным, скорость изменяется весьма незначительно. В то же время в связи с расширением профиля скоростей потока его величина возрастает быстрее, чем скорость на оси, и линейная зависимость величины потока от квадратного корня из тока сохраняется до существенно больших значений тока разряда.

2. При одинаковой величине тока в положительной короне формируются более узкие и скоростные струи. Однако в предельных режимах отрицательная корона обеспечивает заметно большие потоки при примерно таких же максимальных скоростях на оси.

3. Скорость существенно зависит от конструкции некоронирующего электрода. Максимальные скорости в предельных режимах разряда обеспечиваются для одиночного острья при кольцевой форме некоронирующего электрода и для ряда острий в случае двух стержней параллельных ряду острий или щели в плоском электроде.

4. При одинаковой величине тока отрицательной короны скорость на оси потока для промежутков с одиночным острием практически не зависит от межэлектродного расстояния, величина потока при этом увеличивается примерно пропорционально расстоянию.

В системе с рядом острий и некоронирующим электродом в виде двух стержней скорость зависит от соотношения между межэлектродным расстоянием и

шириной зазора между стержнями. Максимум скорости обеспечивается, когда это отношение примерно равняется 2.

5. Однородность потока, формируемого в системе с однорядным многоострийным коронирующим электродом, обеспечивается при межэлектродном расстоянии, в 3–4 раза превышающем шаг острий.

6. Предельные значения скорости и величины потока определяются величиной напряжения источника питания. При максимальном напряжении на промежутке 30 kV и расстояниях между электродами 1.5–2 см максимальные значения скорости ветра, соответствующие предельным режимам коронного разряда, составили 4–5 m/s, величины потока — 2–3 l/s.

Список литературы

- [1] Катцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофилтрах. М.–Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1947. С. 210–212, 226.
- [2] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 117–123.
- [3] Козлов Б.А., Соловьев В.И., Федотов А.А. Импульсный газовый лазер. Патент. РФ № 2068213 с приоритетом от 30.03.93.
- [4] Горкин С., Козлов Б.А., Соловьев В.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 2. С. 42–45.
- [5] Kozlov B.A., Solovyov V.I. // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3574. P. 519–522.
- [6] Kozlov B.A., Solovyov V.I. // Tech. Phys. 2006. Vol. 51. N 7. P. 821–826.
- [7] Попков В.И. Коронный разряд. Энциклопедия современной техники и промышленная электроника. М., 1963. Т. 2. С. 118–122.
- [8] Катцов Н.А. Электроника. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1953. С. 165–167.