

03:04

## Предельный ток многоострийного коронного разряда

© Б.А. Козлов, В.И. Соловьев

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

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2005 г.)

Проведено исследование коронного разряда в системе с однорядным многоострийным электродом для выяснения условий достижения максимальных значений предельного тока, соответствующего переходу коронного разряда в искровой.

PACS: 52.80.Nc

### Введение

В целом ряде практических приложений необходимо формировать скоростные газовые потоки в агрессивных или высокотемпературных средах, а также в средах, не допускающих никаких органических загрязнений. Для этих целей наиболее приемлемы электроразрядные способы формирования газовых потоков, основанные на использовании газодинамических эффектов, сопровождающих протекание тока в униполярных коронных разрядах. Образующийся в этих типах разрядов однонаправленный поток ионов в результате ион-молекулярных столкновений приводит к направленному движению нейтрального газа и образованию газового потока, получившего название „электрический ветер“ [1,2].

Такой метод формирования газовых потоков имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными электромеханическими: отсутствие движущихся элементов, простота конструкции, минимальные размеры и вес, стоимость изготовления, практически неограниченный ресурс и „вакуумная чистота“. Последнее свойство имеет решающее значение для достижения максимального ресурса, надежности и стабильности параметров отпаянных газоразрядных лазеров и химических реакторов.

Скорость „электрического ветра“ пропорциональна корню квадратному из величины тока коронного разряда [2]. Наличие такой зависимости показывает, что для достижения высоких скоростей „электрического ветра“ необходимо обеспечить увеличение тока коронного разряда до его перехода в искровой, не пригодный для формирования газовых потоков. Проблема увеличения предельного тока коронного разряда возникает и в ряде других направлений его применения.

Широкоапертурные газовые потоки, представляющие наибольший практический интерес, формируются обычно с помощью протяженных проволочных или многоострийных коронирующих электродов [3–6]. Применение последних вместо более простых проволочных определяется в ряде случаев их большей надежностью и виброустойчивостью. В настоящей работе с целью выяснения условий достижения максимальной величины общего тока исследуются его взаимосвязи с плотностью расположения коронирующих острий, величиной

межэлектродного промежутка, геометрией электродов, величиной внешнего ограничительного сопротивления при отрицательной и положительной полярностях коронирующего электрода на атмосферном воздухе.

### 1. Методика эксперимента

Многоострийная система моделировалась фрагментом, состоящим из пяти острий (макет № 1). В качестве острий использовались стальные иглы диаметром 0,6, длиной конической части 3 и радиусом кривизны вершины острия не более 0,05 мм. Острия подбирались таким образом, чтобы их вольт-амперные характеристики (ВАХ) совпадали. Отдельно измерялся ток с центрального острия и суммарный ток трех основных острий (центрального и двух соседних). Два крайних охранных острия обеспечивали идентичность поля у основных острий. Межэлектродное расстояние измерялось в пределах 3–25, шаг — в диапазоне 2,5–30 мм. При шаге 2,5 мм число охранных острий увеличивалось до 2–3 с каждой стороны.

При шаге менее 2,5 мм (вплоть до плотного расположения острий) исследования были проведены на многоострийной системе длиной 35 мм с охранными многоострийными электродами протяженностью по 10 мм (макет № 2). Число острий здесь определялось величиной шага.

Некоронирующий плоский электрод представлял собой никелевую полосу шириной 10 см. В контрольных экспериментах использовался также электрод в виде полуцилиндра и, в случае одиночного острия, — полусферической формы.

Максимальное напряжение регулируемого высоковольтного источника составляло 35 кВ. Величина ограничительного сопротивления изменялась в диапазоне 1–100 МΩ. При каждом значении межэлектродного расстояния, шага расположения острий, величины ограничительного сопротивления снимались ВАХ коронного разряда, начиная от минимального значения измеряемого тока 2 мА до предельного, соответствующего переходу коронного разряда в искровой. Возникновение последнего сопровождалось резким снижением на-

пряжения на разрядном промежутке и фиксировалось визуально.

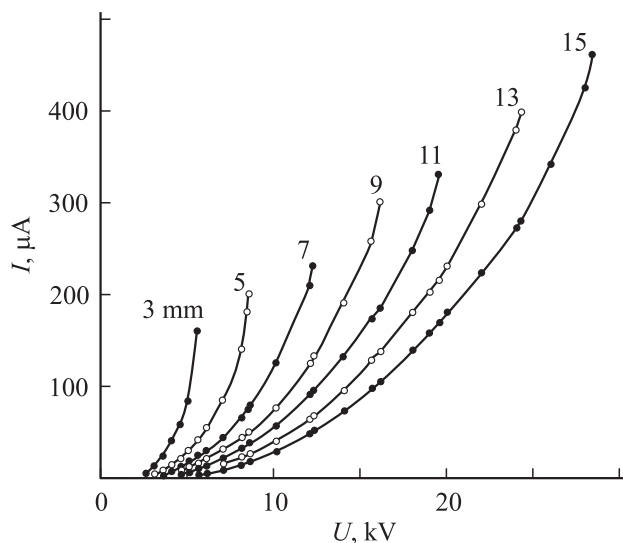
При проведении измерений в системе с одиночным острием дополнительно наблюдались изменения тока и напряжения на промежутке с использованием запоминающего осциллографа с полосой пропускания 20 МГц. Исследовалось также распределение тока по поверхности некоронирующего электрода. Плоский зонд диаметром 1 мм закреплялся в отверстии диаметром 1.2 мм в некоронирующем электроде на уровне его поверхности и перемещался вместе с электродом.

## 2. Результаты эксперимента

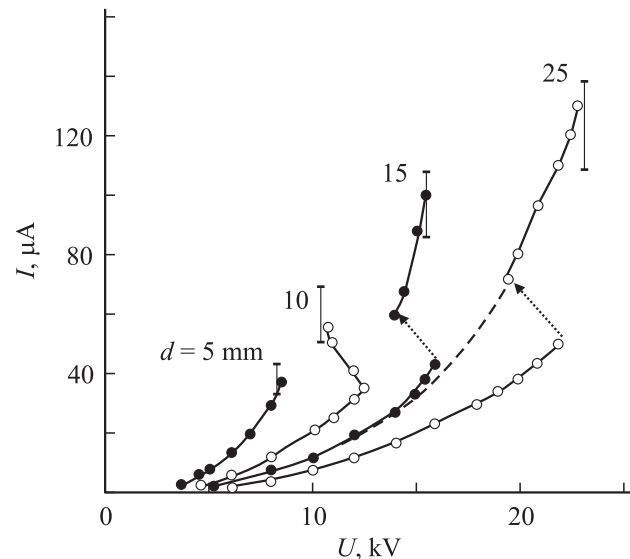
### 2.1. Одиночное острие

Вольт-амперные характеристики отрицательной короны при различных расстояниях между электродами представлены на рис. 1. Максимальные значения токов здесь соответствуют искровому перекрытию промежутка. Результаты в общих чертах согласуются с известными данными [7,8]. На начальных участках характеристик ток в основном протекал в виде треугольных импульсов (импульсов Тричели) амплитудой 100–150  $\mu\text{A}$ . Их длительность по уровню 0.5 составляла около 0.5, длительность переднего фронта не превышала 0.01  $\mu\text{s}$ . Падение напряжения на промежутке при протекании импульса, измеренное при величине ограничительного сопротивления 14.3 М $\Omega$ , составляет около 10 V и обусловлено незначительным разрядом паразитной емкости (при амплитуде импульса 100–150  $\mu\text{A}$  падение напряжения на таком сопротивлении составило бы не менее 1 kV).

С увеличением напряжения частота импульсов возрастала пропорционально среднему току примерно с 40 до 800 kHz при его увеличении с 2 до 40  $\mu\text{A}$ . Амплитуда импульсов несколько уменьшалась — со 150 до 100  $\mu\text{A}$ . Одновременно увеличивалась постоянная составляющая



**Рис. 1.** ВАХ отрицательной короны при различных расстояниях между острием и плоскостью.



**Рис. 2.** ВАХ положительной короны при различных межэлектродных расстояниях  $d$  при первом подъеме напряжения (ограничительное сопротивление 100 М $\Omega$ ). Пунктирная кривая при  $d = 25$  мм — установившийся вид характеристики после проведения многократных измерений.

шая. При среднем токе более 40–80  $\mu\text{A}$  наблюдалось скачкообразное исчезновение импульсов (при снижении напряжения они появлялись при меньшем значении тока), далее вплоть до искрового перекрытия промежутка ток оставался непрерывным. Значение максимальных токов, определяющих довольно резкую границу существования коронного разряда, хорошо воспроизводилось от измерения к измерению (разброс не превышал 10%) и практически не зависел от величины ограничительного сопротивления в диапазоне от 1 до 100 М $\Omega$ .

При исследовании положительной короны было обнаружено, что картина протекания тока и вид ВАХ существенно изменяются от измерения к измерению, что может быть связано с осаждением на вершине острия отрицательно заряженных частиц пыли. В отрицательной короне на поверхности положительного некоронирующего электрода также наблюдалось появление легко удаляемого налета темного цвета. В связи с этим для получения воспроизводимых результатов перед снятием каждой ВАХ производилась очистка поверхности кончика острия (и всех острий макета № 1).

ВАХ положительной короны при первом подъеме напряжения представлены на рис. 2. При расстояниях более 5 мм они имеют два четко выраженных участка. На первом ток, в отличие от отрицательной короны, непрерывный, затем при токе 40–50  $\mu\text{A}$  режим короны резко изменялся: появлялись импульсы тока длительностью порядка долей микросекунды. Их усредненные частота и амплитуда возрастали примерно пропорционально среднему току. При его величине 80  $\mu\text{A}$ , например, они составляли 25 kHz и 5 mA.

Изменение величины сопротивления на два порядка (1–100 МΩ) не влияло на условия возникновения импульсов. Падение напряжения на промежутке во время импульсов, измеренное при величине ограничительного сопротивления 14.3 МΩ, составляло несколько сотен вольт, и было обусловлено частичным разрядом паразитных емкостей. При полном разряде падение напряжения на ограничительном сопротивлении при токах порядка миллиампер должно превышать 10 кВ.

Возникновение импульсов обусловлено зарождением предпробойных положительных стримеров и последующим их затуханием при распространении к некоронирующему электроду в сторону уменьшения напряженности поля.

Изменение режима коронного разряда, связанного с появлением стримеров, сопровождалось звуковыми эффектами типа потрескивания, шипения и визуально наблюдаемыми изменениями в характере свечения коронирующей области: наблюдалось возникновение узкого светящегося канала, сужающегося в направлении от коронирующего электрода. Протяженность стримерных каналов увеличивалась по мере увеличения напряжения. Это приводило сначала к проскакиванию редких искр, полностью перекрывающих промежутки, а затем к их регулярному возникновению с частотой, определяемой величинами ограничительного сопротивления и паразитных емкостей. Из-за значительной флуктуации среднего тока, обусловленной нерегулярностью повторения импульсов, возникновения отдельных искр, граница, определяющая его предельное значение, является в определенной степени условной и, в отличие от отрицательной короны, имеет существенный разброс от измерения к измерению, отмеченный на рис. 2.

По мере увеличения продолжительности горения разряда (особенно в режиме искрового перекрытия промежутка) величина тока, соответствующая появлению и исчезновению импульсов, постепенно уменьшалась до значений примерно 4–10 мкА в связи с изменением состояния поверхности острия. Заметного перескока с одного участка характеристики на другой не наблюдалось, и ВАХ принимала вид пунктирной кривой, представленной на рис. 2 в качестве примера для расстояния 25 мм. После очистки кончика острия вышеописанная картина повторялась.

Результаты измерений распределения тока по поверхности некоронирующего электрода (рис. 3) показали, что профили плотности тока практически не зависят от его величины и полярности напряжения (в отсутствие стримеров). Ширина профилей на уровне 0.5 примерно равняется расстоянию между электродами, на уровне 0.1 — удвоенному. Максимальная плотность тока на оси пропорциональна величине тока (при расстоянии 5 мм и токе отрицательной короны 200 мкА, например, составляла 5 А/м<sup>2</sup>), а при одном и том же его значении уменьшается пропорционально квадрату расстояния.

При возникновении стримерного режима положительной короны профили плотности тока резко сужались

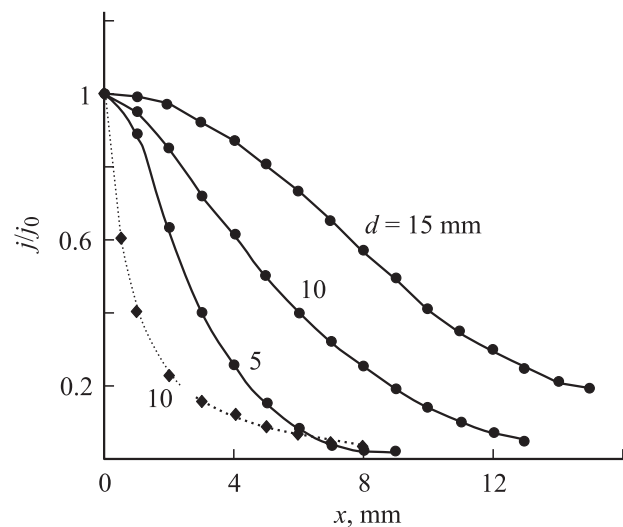


Рис. 3. Профили плотности тока у поверхности некоронирующего электрода при различных межэлектродных расстояниях: пунктирная кривая — стримерный режим положительной короны.

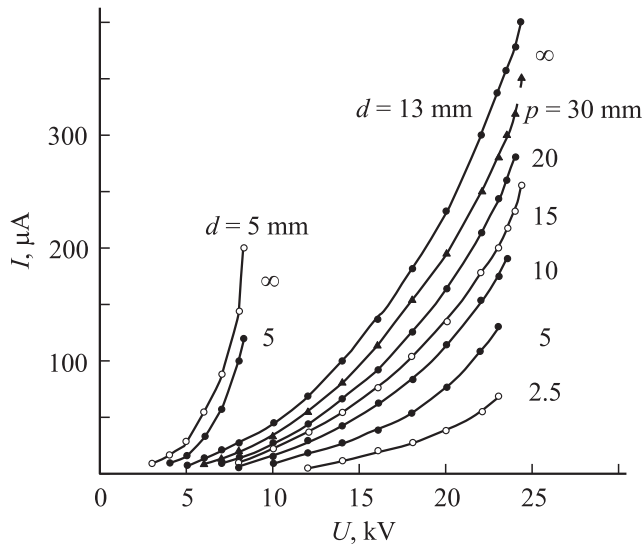
(пунктирная кривая на рис. 3). Их ширина по уровню 0.5 не превышала 1–2 мм независимо от межэлектродного расстояния.

## 2.2. Многоострый электрод

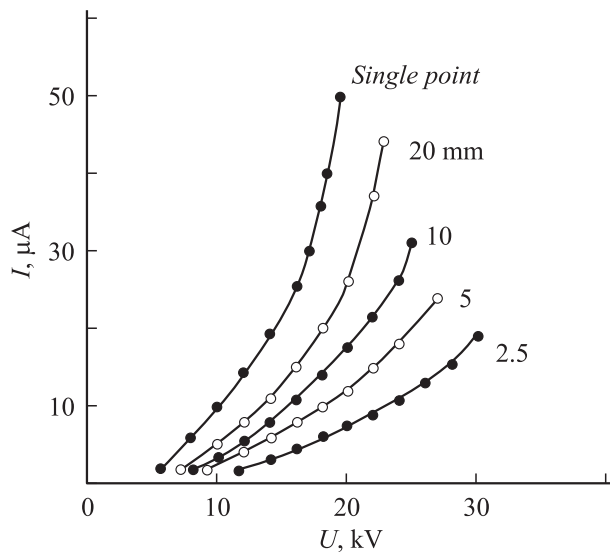
Типичные зависимости тока центрального острия (макет № 1) от напряжения при различном шаге расположения острий для отрицательной и положительной короны представлены на рис. 4, 5. Максимальные токи на рис. 4 соответствуют искровому перекрытию промежутка, на рис. 5 — появлению стримеров (при шаге менее 10 мм их появление практически сразу приводило к полному искровому перекрытию промежутка).

При шаге более 5 мм для всех межэлектродных расстояний суммарный ток трех основных острий ровно в три раза превышал ток центрального острия: это означало, что все острия работали в одинаковых условиях. При шаге менее 5 мм появилось заметное различие в значениях токов соседних острий. При шаге 2.5 мм оно достигало уже около 30%, хотя контрольные измерения при отдельном включении каждого из трех острий показывали одинаковые значения токов. Увеличение числа охранных острий до 2–3 с каждой стороны не изменяло ситуацию. В случае положительной короны при этом шаге можно было отчетливо наблюдать периодическое чередование от острия к острию яркости и протяженности стримерных каналов или формирование одного канала для двух соседних острий.

При шаге менее 2.5 мм (макет № 2) в случае отрицательной короны разряд зажигался уже не на всех остриях. Даже при максимальных напряжениях и токах, близких к предельным, горел не более чем на 13–14 остриях независимо от их общего числа, которое, например, в случае плотного расположения острий (шаг 0.6 мм) равнялось 60. При длине ряда



**Рис. 4.** ВАХ отрицательной короны с острия при различном шаге расположения острий для межэлектродных расстояний 5 и 13 мм.



**Рис. 5.** ВАХ положительной короны с острия при различном шаге расположения острий: межэлектродное расстояние 20 мм; ограничительное сопротивление 5.1 МΩ.

острий 35 мм это соответствовало среднему шагу между активными остриями примерно 2.5–2.7 мм. Общий предельный ток макета уменьшался с увеличением числа острий и сокращением межэлектродного расстояния, особенно значительно (почти вдвое) при расстояниях меньше 7 мм и плотном расположении острий.

Для положительной полярности измерения на данном макете при значениях шага менее 2.5 мм проводились без очистки острий, поэтому не дали воспроизводимых результатов. При шаге менее 1.2 мм неоднократно возникала ситуация, когда на ВАХ появлялись падающие участки (при увеличении напряжения значение среднего

тока уменьшалось). Можно лишь отметить, что явной зависимости тока положительной короны от числа острий при шаге менее 2.5 мм не проявлялось.

### 3. Обсуждение результатов

Общий ток разряда в системе с однорядным многоострийным электродом единичной протяженности

$$I = NI_1 = (1/p)\alpha I_0, \quad (1)$$

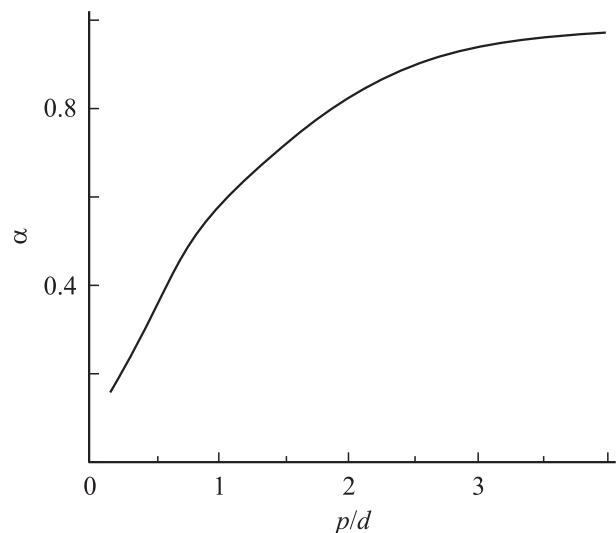
где  $N$  — число острий на единице длины, определяемое шагом их расположения  $p$ ;  $I_0$  и  $I_1$  — ток в случае одиночного острия и ток, приходящийся на одно острие многоострийной системы, при одинаковом напряжении на промежутке;  $\alpha$  — коэффициент, определяющий степень уменьшения тока  $I_1$  по сравнению с  $I_0$ , обусловленную взаимной экранировкой острий.

С уменьшением шага увеличивается число острий, одновременно, как следует из рис. 4, 5, уменьшается ток  $I_1$ . Результаты обработки измерений показали, что при шаге более 2.5–5 мм, когда токи соседних острий одинаковы, величина коэффициента  $\alpha$  практически однозначно определяется отношением шага к расстоянию  $p/d$  (рис. 6). В пределах разброса полученных значений 10–15% зависимости  $\alpha$  отдельно от напряжения или тока не установлено.

Уменьшение тока  $I_1$  по мере увеличения плотности расположения острий обусловлено следующими причинами.

Во-первых, с уменьшением шага в результате взаимной электростатической экранировки снижается напряженность поля на вершине острий. Поэтому для зажигания разряда и для обеспечения определенной величины тока требуется более высокое напряжение.

Во-вторых, из-за сужения профилей плотности тока в направлении расположения острий возрастает плотность



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента  $\alpha$  от отношения шага острий  $p$  к межэлектродному расстоянию  $d$ .

пространственного заряда ионов во внешней области короны, который, как известно, играет определяющую роль в ограничении тока. Действие этого фактора начинает проявляться при отношении  $p/d < 2.5$ , когда шаг по величине приближается к ширине профиля в случае одиночного острия (рис. 3).

При шаге менее 2.5–5 мм помимо указанных причин начинает сказываться экранирующее действие униполярного объемного заряда ионов во внешней области разряда, снижающее напряженность поля у соседних острий. В случае отрицательной короны эта экранировка оказывается настолько сильной, что при шаге менее 2.5 мм напряженность поля у острий, соседствующих с острием, на котором несколько ранее зажегся разряд, при дальнейшем увеличении напряжения (вплоть до его предельных значений) остается недостаточной для возникновения разряда. Этим, очевидно, объясняется наличие отдельных коронирующих точек на поверхности протяженных электродов (проводов, лезвий), характерное для отрицательной короны.

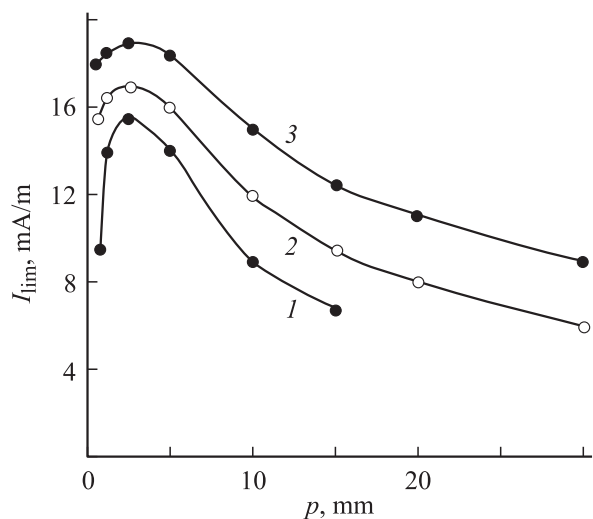
При использовании коронного разряда в системах прокачки газов для обеспечения стабильного режима приходится работать с напряжениями меньше критических. Поэтому при дальнейшем анализе в качестве предельных были приняты значения токов:

— в случае отрицательной короны — при напряжениях на 5% ниже критических;

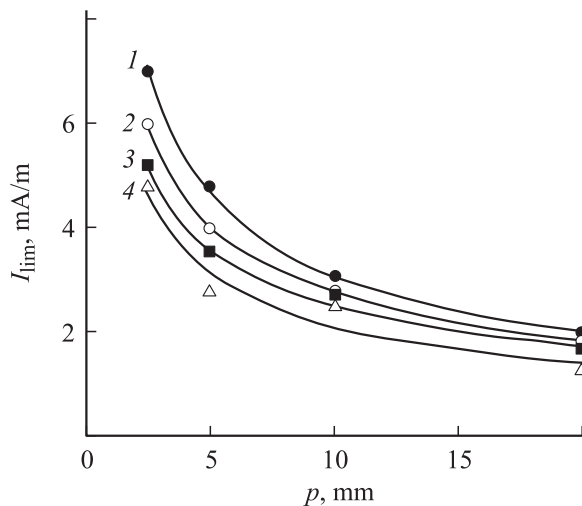
— для положительной короны — соответствующие возникновению стримеров, поскольку при дальнейшем увеличении среднего тока скорость газового потока перестает увеличиваться [2] или, как показали проведенные нами измерения, начинает даже уменьшаться.

Зависимости предельных токов, пересчитанных на единицу длины многоострийной системы, от геометрии разрядного промежутка представлены на рис. 7 и 8.

Независимо от полярности короны максимальные их значения достигаются при шаге расположения



**Рис. 7.** Зависимость предельного значения тока отрицательной короны от шага острий при межэлектродных расстояниях: 1 — 3, 2 — 7, 3 — 13 мм.



**Рис. 8.** Зависимость предельного значения тока, соответствующего возникновению стримеров в положительной короне, от шага острий для межэлектродных расстояний: 1 — 20, 2 — 15, 3 — 10, 4 — 5 мм.

острий 2.5 мм и возрастают с увеличением межэлектродного расстояния. В случае отрицательной короны, однако, степень влияния расстояния на величину предельного тока по мере уменьшения шага снижается. Так, при увеличении расстояния с 3 до 13 мм в случае одиночного острия ток возрастает в 3.5 раза (рис. 1), при шаге 10 мм — менее чем вдвое, а при оптимальном шаге 2.5 мм — не более чем на 20% (рис. 7). Причина в том, что, в отличие от одиночного острия, профили плотности тока при увеличении расстояния имеют возможность свободно расширяться только в направлении, перпендикулярном линии расположения острий.

Переход положительной короны в искровой разряд, как уже отмечалось выше, связан с образованием положительного стримера. Поскольку условия его возникновения определяются величиной напряженности поля и характером его распределения вблизи коронирующего острия, величина среднего тока, соответствующая появлению стримеров, слабо зависит от межэлектродного расстояния. Так, при увеличении расстояния с 5 до 25 мм, т. е. в пять раз, величина этого тока возрастает лишь примерно с 40 до 50 мкА (рис. 2). Величина же предельного тока, при котором происходит регулярное искровое перекрытие промежутка, возрастает более чем в три раза с 40 до 130 мкА, что обусловлено увеличением пути, который должен преодолеть стример в условиях понижающейся напряженности поля. При малых межэлектродных расстояниях (5 мм и менее) возникающий стример практически сразу пересекает промежуток.

С уменьшением шага величина тока, соответствующая зарождению стримеров, уменьшается (рис. 5). Это, возможно, указывает на то, что условия их появления обеспечиваются при меньшей напряженности поля у острия, поскольку из-за снижения степени неоднородности поля с уменьшением шага происходит более медленное сни-

жение напряженности по мере удаления от острия. Величина же напряжения на промежутке при этом, как видно из рисунка, возрастает. Стримеры возникают при более высокой средней напряженности поля, т.е. в условиях, более благоприятных для пересечения промежутка, и при шаге менее 10 мм его полное перекрытие, как уже отмечалось, происходит практически сразу с появлением импульсов тока.

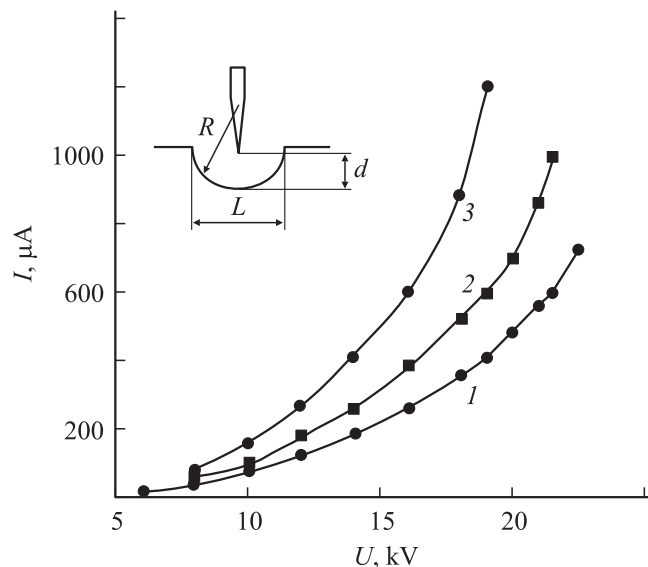
В случае отрицательной короны изменение формы разряда определяется условиями, возникающими во внешней области разряда вблизи некоронирующего электрода. На это указывает прежде всего то обстоятельство, что искровое перекрытие промежутка, как можно видеть из результатов, представленных на рис. 1 и 4, происходит при определенном значении средней напряженности поля, которое практически не зависит от расстояния, величины шага и составляет 17–19 кВ/см. Убедительны в этом отношении также результаты контрольного эксперимента, проведенного с одиночным острием при межэлектродном расстоянии 1 мм и наличии на некоронирующей плоскости против острия незначительной искусственной выпуклости диаметром и высотой примерно 1 и 0.5 мм. В результате локального усиления напряженности поля на поверхности некоронирующего электрода предельный ток и соответствующая средняя напряженность поля снизились со 185–190  $\mu\text{A}$  и 18.5 кВ/см до 120–125  $\mu\text{A}$  и 16 кВ/см, хотя ни напряжение возникновения короны, ни предшествующий ход ВАХ при таких размерах неоднородности еще практически не изменились.

Поскольку напряженность поля во внешней области короны определяется плотностью ионного пространственного заряда, ее уменьшение за счет расширения профиля тока при использовании некоронирующих электродов соответствующей формы позволяет значительно увеличить предельный ток отрицательной короны. Проведенные измерения показали, что при полусферической форме некоронирующего электрода (в случае одиночного острия) или полуцилиндрической (в случае многоострийного электрода, рис. 9) предельный ток возрастает приблизительно в 1.7 раза.

Переход отрицательной короны к искровому разряду следует, по-видимому связывать с появлением в ее внешней области положительных ионов. Поскольку при напряженности поля, не превышающей 17–19 кВ/см, коэффициент ударной ионизации остается еще значительно меньшим коэффициента прилипания (равенство обеспечивается при напряженности около 30 кВ/см [9]), образование положительных ионов во внешней области короны следует связывать с фотоионизацией молекул ее собственным излучением.

При появлении положительных ионов возможны два варианта развития событий:

— возникновение вблизи поверхности некоронирующего электрода положительного стримера, который, распространяясь в сторону возрастания напряженности поля, сразу получает возможность перекрыть весь промежуток;



**Рис. 9.** ВАХ отрицательной короны: многоострийный коронирующий электрод; шаг острий — 5 мм; число острий — 7; межэлектродное расстояние — 13 мм. Форма некоронирующего электрода: 1 — плоская; 2 —  $R = 30$  мм,  $L = 50$ ; 3 —  $R = 15$  мм,  $L = 30$  мм.

— компенсация ограничивающего действия пространственного заряда отрицательных ионов на напряженность поля у коронирующего электрода, что приводит к увеличению тока, интенсивности ионизирующего излучения, дальнейшему возрастанию концентрации положительных ионов и, в конечном итоге, к искровому перекрытию промежутка в результате лавинообразного развития процесса.

В обоих случаях, в отличие от положительной короны, имеется резкая граница, определяющая предельную величину тока.

## Заключение

Проведено исследование коронного разряда в системе с однорядным многоострийным электродом для выяснения условий достижения максимальных значений предельного тока. Установлены следующие закономерности:

1. Взаимная экранировка острий увеличивается с уменьшением отношения шага их расположения к межэлектродному расстоянию. Полученные количественные данные позволяют по результатам измерений тока разряда для одиночного острия прогнозировать характеристики многоострийной системы.

2. Переход отрицательной короны в искровой пробой промежутка происходит при определенном значении средней напряженности поля, не зависящей от межэлектродного расстояния и шага расположения острий. Для воздуха при нормальных условиях она составляет 17–19 кВ/см.

3. Величина предельного тока не зависит от величины ограничительного сопротивления, для промежутка

ков более 3 mm возрастает с уменьшением шага и достигает максимальных значений при его оптимальной величине 2.5–5 mm.

4. Пределный ток возрастает с увеличением межэлектродного расстояния. Однако в случае отрицательной короны степень влияния расстояния снижается по мере уменьшения шага расположения острий.

5. Величина предельного тока короны для воздуха в нормальных условиях составляет: при отрицательной полярности 16–19 для промежутков в диапазоне 3–13; при положительной — 5 для промежутка 5 и возрастает до 7 mA/m при 20 mm.

6. Полуцилиндрическая форма некоронирующего электрода, по сравнению с плоской, позволяет увеличить предельный ток отрицательной короны более чем в полтора раза.

## Список литературы

- [1] *Robinson M.* // American J. of Physics. 1962. Vol. 30. N 5. P. 366–372.
- [2] *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. Гл. 3. 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. Физическая. 1994. Т. 58. № 2. С. 42–45.
- [5] *Kozlov B.A., Solovyov V.I.* // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3574. P. 519–522.
- [6] *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В.* и др. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 2. С. 172–178.
- [7] *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. Гл. 3. С. 186–223. (Meek J.M. and Craggs J.D. Electrical breakdown of gases. Oxford at the Clarendn Press, 1953).
- [8] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. Ч. 3. Гл. 17. С. 505–516.
- [9] *Райзер Ю.П.* // Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. Гл. 3. С. 119–123.