

04;07;12

## Исследование структуры свечения начальной фазы наносекундного пробоя изоляционных промежутков

© Е.Г. Данченко, П.Б. Репин, А.Г. Репьев

Российский федеральный ядерный центр  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: repin@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 27 июня 2004 г. В окончательной редакции 10 ноября 2004 г.)

В целях разработки мер защиты энергетических объектов от воздействия перенапряжений природного и техногенного характера проведен цикл экспериментальных исследований диффузионной фазы высоковольтного наносекундного разряда атмосферного давления в промежутках с резконеоднородным распределением электрического поля. Исследована структура свечения разряда в геометрии штырь–плоскость при стержневом катоде пяти конфигураций и зазоре от 6 до 12 см. Установлено, что наблюдаются различные формы диффузного свечения разряда, причем реализация конкретного вида разряда имеет вероятностный характер. Изучены зависимости электрических характеристик разряда от величины межэлектродного зазора для двух типов катода, обеспечивающих преобладающее развитие объемной и многоканальной форм разряда. Показано, что основным фактором, определяющим вероятность реализации формы свечения разряда, является распределение напряженности электрического поля вблизи поверхности катода в фазе роста напряжения на промежутке в совокупности с динамикой разрядных процессов.

Один из аспектов практического интереса к изучению высоковольтного диффузного разряда, развивающегося в газовой среде повышенного ( $\leq 10^5$  Па) давления в промежутках с резконеоднородным распределением электрического поля, связан с проблемой защиты энергетических объектов. Приводящие к пробоям изоляционных промежутков перенапряжения, воздействующие в процессе эксплуатации на элементы энергетических систем, характеризуются широким спектром амплитудно-временных параметров. В частности, перенапряжения наносекундного диапазона длительностей могут возникать при воздействии факторов природного (некоторые стадии молниевых разрядов [1]) и техногенного характера. При этом пробой промежутка в смысле короткого замыкания является заключительной стадией процесса, которой предшествует фаза формирования диффузного разряда. Именно эта фаза определяет возможность перехода разряда в дугу с падающей вольт-амперной характеристикой, когда ток в изоляционном промежутке не прекращается после окончания импульса перенапряжения, поддерживаясь рабочим напряжением энергетического объекта.

Наносекундный разряд в промежутках с зазором  $\sim 1$  см достаточно подробно изучен экспериментально и теоретически [2,3]. Однако для решения проблем защиты энергетических объектов необходимо изучение разряда в воздушных промежутках атмосферного давления с межэлектродным расстоянием  $\geq 10$  см. Возникающие при этом технические трудности ограничивают число экспериментальных работ, и среди публикаций, посвященных исследованию наносекундного пробоя длинных промежутков, преобладают расчетно-теоретические работы [4,5]. В то же время сильная зависимость характеристик разряда от внешних условий, в частности геометрии промежутка и параметров импульса

напряжения, стимулирует проведение дополнительных экспериментов. В данной работе приведены результаты первого этапа исследований наносекундного диффузного разряда, развивающегося в электродной системе стержень(катод)–плоскость в воздухе атмосферного давления. Исследованы внешний вид диффузного разряда и его основные электрические параметры при различной величине межэлектродного зазора  $h$  и степени неоднородности электрического поля. Эксперименты проводились при  $h$  от 6 до 12 см с наконечниками стержня-катода пяти различных конфигураций. Длительность приложенного к электродам напряжения специально ограничивалась так, чтобы начальная, слабосветящаяся, фаза пробоя не успевала перейти в искровую стадию.

В качестве источника питания  $I$  (рис. 1) применялся блочный импульсный наносекундный генератор БИНГ-6 [6] (амплитуда выходного импульса напряжения до 60 кВ), нагруженный на трансформатор Льюиса [7]. Трансформатор собран на шести семнадцатиметровых отрезках коаксиального кабеля (с волновым сопротивлением 55  $\Omega$ ), выходные концы которых соединены последовательно в верхней части разрядной камеры 2. Корпус камеры представляет собой замкнутую металлическую

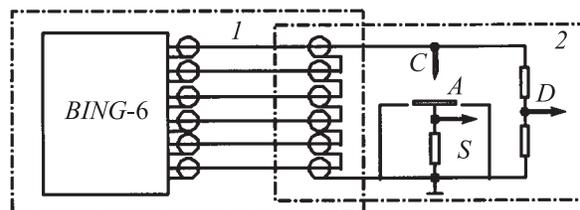


Рис. 1. Схема стенда.

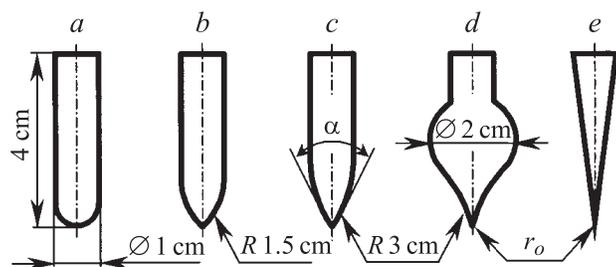


Рис. 2. Форма наконечников катода.

полость  $\varnothing 60$  и высотой 60 см. Максимальное напряжение выводится в центр камеры, где на ее оси с возможностью регулировки  $h$  закреплен стержневой катод  $C$   $\varnothing 1$  см и длиной 15 см со сменными торцевыми наконечниками. Применялись осесимметричные катодные наконечники из нержавеющей стали  $\varnothing 1$  см и длиной 4 см с различной кривизной поверхности (рис. 2,  $a-e$ ). Радиус острия  $r_o$  наконечников  $b-e$  составлял  $\sim 0.2$  мм (в ряде экспериментов  $r_o = 0.01-1.6$  мм). Анод  $A$  (алюминиевая токосъемная площадка  $\varnothing 18$  см) расположен симметрично катоду внизу камеры и геометрически является частью ее плоского заземленного основания, что обеспечивает однородность электрического поля вблизи поверхности плоского электрода.

В экспериментах регистрировались: напряжение на разрядном промежутке и ток разряда малоиндуктивными резистивными делителем  $D$  и шунтом  $S$ , а также интегральное по длине промежутка излучение разряда в диапазоне длин волн 300...600 нм с использованием быстродействующего фотоэлектронного умножителя. Регистрация электрических сигналов осуществлялась на цифровом осциллографе с полосой пропускания 500 МГц с временным разрешением не хуже: 0.5 нс для тока и напряжения и  $\sim 2$  нс для светового импульса. В экспериментах контролировался визуально и фотографировался внешний вид разряда (обработано  $\sim 1000$  разрядных импульсов). Фотографирование осуществлялось зеркальным фотоаппаратом, расположенным на расстоянии 0.4...1 м от оси разряда (при фотографировании прикатодной области разряда обычный объектив фотоаппарата заменялся на телескопический). В качестве светочувствительного материала использовались цветные и черно-белые фотопленки со спектральной чувствительностью до 640 нм. Число и диаметр токовых каналов разряда определялись фотографированием и методом автографов [8].

В экспериментах установлено, что при одинаковой геометрии промежутка и параметрах запитки форма диффузного свечения исследуемого разряда варьируется от импульса к импульсу. Наблюдаемые формы свечения можно разделить на три основных морфологических типа: многоканальную, объемную и переходную. Многоканальная форма разряда (рис. 3,  $a$ ), как правило, состоит из 4...60 каналов соизмеримых друг с другом диаметра и интенсивности, равномерно распределенных

в плоскости анода. Объемная форма (рис. 3,  $d$ ) представляет собой ярко выделенный центральный канал, размер и интенсивность которого существенно отличаются от остальных каналов. К переходному типу (рис. 3,  $b, c$ ) относятся в основном промежуточные формы разряда, которые из-за различных и, как правило, редковоспроизводимых особенностей свечения, например асимметричной деформации, не принадлежат ни к одному из вышеописанных типов.

Величина межэлектродного зазора в пределах предлагаемой классификации форм свечения практически не влияет на вероятность реализации той или иной формы разряда. В то же время геометрические параметры светящихся областей и излучательные характеристики разряда при вариации  $h$  заметно меняются. При уменьшении  $h$  диаметр каналов разряда в среднем уменьшается, интенсивность свечения возрастает. Объемный разряд при больших  $h$  визуально представляет собой два отдельно светящихся конуса с общим основанием диаметром до 7 см в центральной части межэлектродного зазора. С уменьшением  $h$  форма объемного разряда стремится к цилиндрической с диаметром  $\sim 1$  см. При  $h = 6$  см, если преобладают диффузные формы, наблюдаются искровые разряды, отличающиеся малым диаметром токового канала и значительной интенсивностью свечения.

Процессы развития разряда в диапазоне  $6 < h \leq 12$  см, несмотря на отсутствие пробоя промежутка в понимании [5], т. е. несмотря на отсутствие высокопроводящего искрового канала с падающей вольт-амперной характеристикой, вполне адекватно отражают допробойную стадию разряда. Это следует

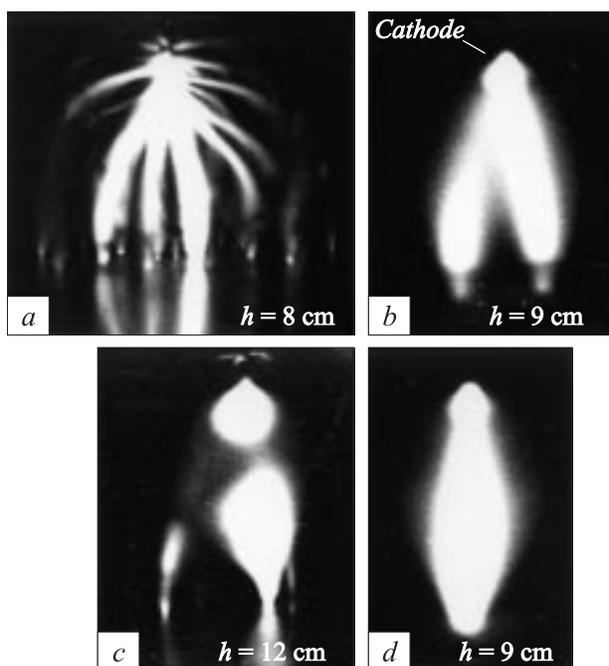
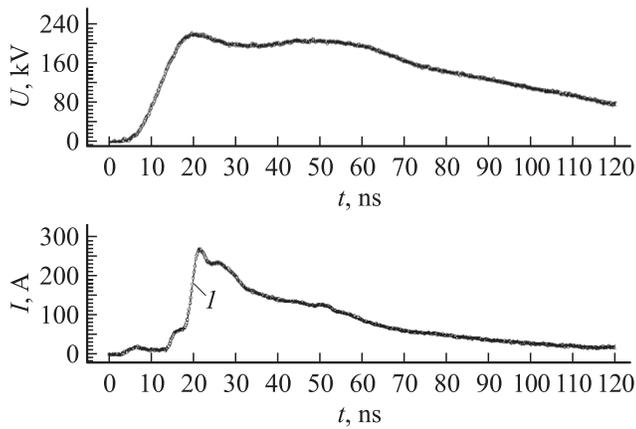


Рис. 3. Внешний вид разряда при пулеобразном (рис. 2,  $c$ ) катоде:  $a$  — многоканальная форма;  $b, c$  — переходная;  $d$  — объемная.



**Рис. 4.** Характерные осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда. *I* — начальный участок тока проводимости.

из сравнительного анализа осциллограмм диффузной и искровой форм разряда при малых ( $h = 5 \dots 6$  см) зазорах. Как правило, в этих условиях формирование высокопроводящего искрового канала наблюдается или в конце импульса напряжения, или на его обратном выбросе. При этом предшествующие образованию искры участки осциллограмм тока и напряжения в пределах вариаций от импульса к импульсу совпадают с аналогичными участками осциллограмм для диффузной формы разряда. Более того, вариации фронтальных участков осциллограмм тока и напряжения коррелируют с временными параметрами искрового пробоя.

На рис. 4 представлены типичные осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда. Изменение формы свечения разряда при постоянных условиях формирования сопровождается изменением электрических и излучательных характеристик. Кроме того, для разрядов с одинаковой формой свечения наблюдается статистический разброс этих параметров от импульса к импульсу. Наиболее подробно электрические характеристики разряда исследованы при полусферическом (рис. 2, *a*) и пулеобразном (рис. 2, *c*) катодах. Обнаружено, что при увеличении  $h$  от 6 до 12 см амплитудное значение напряжения в среднем слабо растет от 150 до 240 кВ для пулеобразного и от 140 до 230 кВ для полусферического катода. Амплитуда тока разряда при этом экспоненциально уменьшается от 800 до 150 А при пулеобразном катоде и до 300 А при полусферическом. Полная длительность токового импульса при малых межэлектродных зазорах составляет 170 нс и по мере роста  $h$  уменьшается до  $\sim 140$  и  $\sim 110$  нс для полусферического и пулеобразного катодов соответственно.

В максимуме тока сопротивление плазмы разрядов для обоих типов катода при  $h = 6$  см составляет  $\sim 100 \Omega$  и растет с увеличением зазора, достигая при  $h = 12$  см 1.2 к $\Omega$  для пулеобразного катода и 600  $\Omega$  для полусферического. Время переключения промежутка разрядными каналами, определяемое как задержка тока проводимости (начало резкого спада сопротивления

промежутка) относительно начала производной напряжения, в среднем линейно возрастает от 10 до 17 нс при увеличении  $h$  от 6 до 12 см. Таким образом, средняя скорость распространения стримерных образований в промежутке слабо зависит от  $h$  и составляет как минимум  $6 \cdot 10^8$  см/с.

Специальные эксперименты, проводимые при постоянной геометрии промежутка, не выявили внешних факторов, влияющих на реализацию различных форм свечения разряда. Установлено, что на статистику внешнего вида разряда не влияют микронеровности электродов, небольшие изменения давления, влажности и температуры воздуха, наличие в нем микрочастиц и долгоживущих продуктов предшествующих разрядов (синглетный кислород, озон и др.). Снижение полного тока разряда (за счет шунтирования промежутка) и ограничение тока во внеосевых зонах (помещаемой на анод диэлектрической пластиной с отверстием) также заметно не увеличили вероятности реализации какой-либо формы. Таким образом, формирование структуры свечения разряда определяется внутренними механизмами самого разряда.

В то же время установлено, что вероятность реализации той или иной формы свечения разряда (отношение числа разрядных импульсов с данной формой свечения к полному числу импульсов в серии экспериментов) зависит от конфигурации катодного наконечника и в основном определяется образующим вершину катода углом  $\alpha$  и радиусом острия  $r_o$  (см. таблицу). Из таблицы видно, что вероятность реализации многоканальной формы уменьшается при уменьшении  $\alpha$ , вероятность объемной формы в среднем растет. При полусферическом катоде ( $a$ ) преобладает многоканальная форма разряда, при катодах  $b-e$  и  $r_o = 0.2$  мм — объемная форма. При увеличении радиуса острия катодов  $b-e$  возрастает вероятность реализации переходной и многоканальной форм, уменьшение  $r_o$  до 10  $\mu\text{m}$  приводит к увеличению вероятности реализации объемной формы на  $\sim 10 \dots 20\%$ .

Формирование структуры свечения разряда осуществляется, по-видимому, в начальной фазе разряда за счет развития неустойчивостей плазменной прикатодной оболочки аналогично тому, как это происходит в высоковольтных диффузных разрядах в промежутках, образованных проволочкой и параллельной ей плоскостью [9,10]. На это указывают близость условий формирования разряда в данных экспериментах и в [9,10] (амплитуды напряжения и тока, скорость роста напряжения,

Вероятность реализации формы свечения разряда при разных  $\alpha$  ( $r_o = 0.2$  мм,  $h = 10$  см)

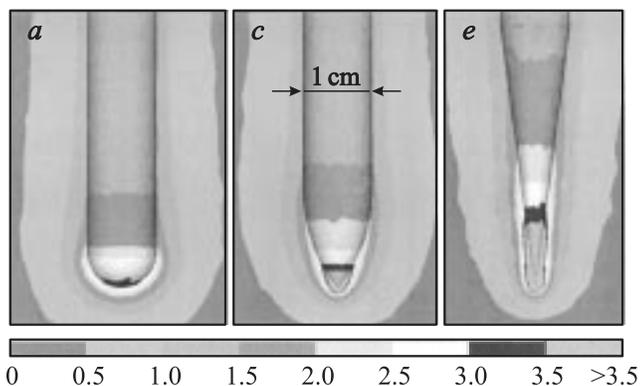
Катод (рис. 2)	$\alpha, ^\circ$	Форма разряда		
		многоканальная	переходная	объемная
<i>a</i>	180	0.7	0.2	0.1
<i>b</i>	90	0.2	0.3	0.5
<i>c</i>	60	0.1	0.2	0.7
<i>d</i>	30	0.1	0.3	0.6
<i>e</i>	15	0.1	0.2	0.7

параметры газовой среды, величина межэлектродного зазора), подобие внешнего вида разряда (многоканальной формы) и экспериментально обнаруженная зависимость структуры свечения от геометрических параметров катода.

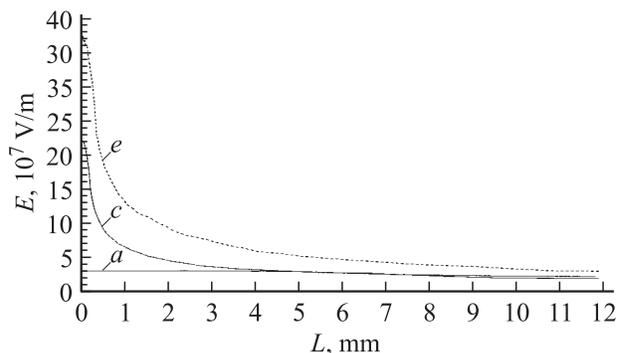
Для более детального рассмотрения влияния геометрии катодного наконечника на форму свечения разряда были проведены расчеты напряженности электрического поля. В расчетах использовалась трехмерная модель реального межэлектродного промежутка, где учитывалось влияние нулевого потенциала корпуса разрядной камеры на распределение напряженности поля в электродной системе. Расчет производился для пяти конфигураций катода, приведенных на рис. 2, при  $h = 10$  см и  $r_o = 0.2$  мм. Для каждой конфигурации вычислялось  $\sim 10^6$  значений поля, точность вычислений повышалась за счет увеличения плотности узловых точек вблизи критических участков поверхности катода.

Результаты расчетов для катодных наконечников полусферической, пулеобразной и конической форм (рис. 2, *a, c, e* соответственно) представлены на рис. 5 и 6. Согласно расчетам, увеличение угла  $\alpha$  при переходе от конического к полусферическому катоду ведет к существенному снижению максимального значения напряженности электрического поля при фиксированном напряжении на электродах и выравниванию распределения поля вдоль поверхности торца катода (рис. 6). Вместе в тем, как видно из рис. 6, при острых углах  $\alpha$  увеличивается протяженность области поля вдоль образующей катода  $L$  с величиной напряженности, близкой к максимальному значению для полусферического катода и, как следует из экспериментов, заведомо достаточной для формирования разряда. Это по аналогии с [9,10] должно было бы означать увеличение числа формируемых разрядных каналов и рост вероятности реализации многоканальной формы свечения при уменьшении  $\alpha$ , что противоречит результатам экспериментов (см. таблицу).

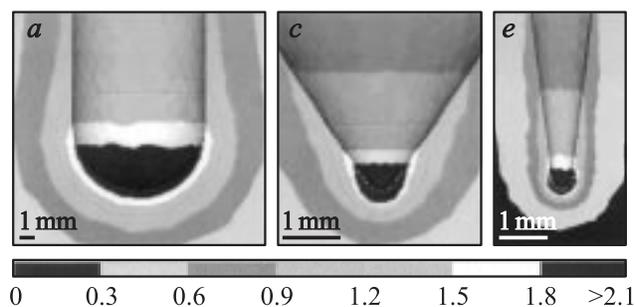
В отличие от [9,10] в данной работе резко неоднородное распределение поля вдоль образующей катода при малых  $\alpha$  в сочетании с конечным значением скорости роста напряжения на промежутке обеспечивает



**Рис. 5.** Распределение напряженности электрического поля  $E$  вблизи острия различных катодов (*a, c, e* на рис. 2) при одинаковом напряжении 200 кВ.



**Рис. 6.** Распределение напряженности поля  $E$  вдоль образующей  $L$  поверхности катодов *a, c* и *e* (рис. 2) при напряжении 200 кВ.



**Рис. 7.** Распределение напряженности поля  $E_0$  вблизи острия катодов *a, c* и *e* (рис. 2) в момент начала движения зарядов.

разновременное достижение достаточной для начала разрядных процессов напряженности электрического поля на разных участках поверхности катода, начиная с приосевой области. В самом деле, анализ токовых и коррелирующих с ними по временным характеристикам осциллограмм импульсов излучения разряда в УФ видимом диапазоне спектра позволил установить, что начало движения зарядов (вероятно, означающее начало формирования токовой структуры разряда) в фазе переключения промежутка (участок токовых осциллограмм, предшествующий току проводимости; рис. 4) регистрируется до достижения амплитудного значения напряжения на промежутке. Подробные результаты исследования динамики развития разряда будут опубликованы в ближайшее время. Величина задержки начала движения зарядов относительно начала производной напряжения зависит от типа катода и реализуемой формы свечения разряда. Для преобладающих при катодах *a, c* и *e* (рис. 2) форм задержки в среднем составляет 14, 8 и 6 нс соответственно. Напряжение на промежутке в эти моменты времени составляет примерно: 65, 20 и 15% своего максимального значения. Расчетные распределения напряженности электрического поля  $E_0$  при таких значениях напряжения представлены на рис. 7.

Видно, что картина радикально отличается от представленной на рис. 5. В момент начала движения зарядов в промежутке размеры области, ограниченной одинаковыми значениями напряженности электрического поля,

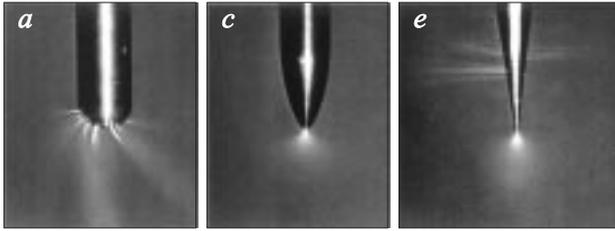


Рис. 8. Разряд вблизи катодов *a, c* и *e* (рис. 2).

в случае полусферического катода существенно больше, чем в случае катодов с острыми углами  $\alpha$ . Уменьшение радиуса острия катода  $r_o$  ведет к дальнейшему снижению размеров вышеупомянутой области. Если исходить из механизма формирования структуры разряда за счет неустойчивости прикатодной плазменной оболочки [9,10], то в полном соответствии с результатами экспериментов это означает, что вероятность реализации многоканальной формы свечения разряда выше для полусферического катода, чем для остальных исследованных конфигураций, и, наоборот, вероятность реализации объемной формы выше для катодов с малыми величинами  $\alpha$  и  $r_o$ . Кроме того, слабая зависимость напряженности поля вблизи катода от величины межэлектродного зазора обуславливает отсутствие влияния величины  $h$  на вероятность реализации той или иной формы свечения разряда. Действительно, рост напряжения на промежутке на должен привести к заметному изменению структуры разряда, развитие которой начинается с началом движения зарядов. С ростом напряжения увеличиваются расчетные размеры области с напряженностью поля, достаточной для начала разрядных процессов, однако реальная картина распределения поля будет отличаться от показанной на рис. 5 за счет экранировки и искажения поля объемными зарядами в промежутке. Кроме того, уже сформированные на поверхности плазменной оболочки возмущения имеют наибольший инкремент. Их рост будет подавлять формирование новых возмущений по крайней мере на расстоянии, превышающем характерное расстояние между ними. В случае катодов с острыми  $\alpha$  обеспечивается развитие преимущественно одного разрядного канала — объемной формы свечения. Это происходит, по-видимому, из-за слишком малых размеров области, в которой начинается движение зарядов, для появления нескольких возмущений плазменной прикатодной оболочки. Более того, единственное возмущение — предвестник разрядного канала не развивается, пока оболочка не достигнет определенных размеров. На это указывает рост расчетной максимальной напряженности электрического поля в момент начала движения зарядов с уменьшением угла  $\alpha$  от  $\sim 2 \cdot 10^7$  В/м для полусферического до  $\sim 5.5 \cdot 10^7$  В/м для конического катодов.

На рис. 8 представлена прикатодная область разряда. Видно, что каналы многоканальной формы разряда равномерно распределены по поверхности полусфериче-

ского катода. В случае объемной формы разряда с пулеобразного катода периферийные каналы почти всегда отсутствуют, при коническом катоде с большей протяженностью сильного поля вдоль образующей (рис. 5) они все-таки формируются на значительном удалении от основного канала. Однако в данном случае боковые каналы практически не несут токовой нагрузки и не искажают общего вида свечения разряда, по-видимому, из-за позднего старта и большой длины, определяемой распределением поля в межэлектродном промежутке.

Таким образом, наблюдаемые в данных экспериментах особенности свечения диффузного разряда объясняются в рамках разработанной в [9,10] модели формирования структуры разрядов в промежутках с резконеоднородным распределением поля, основанной на развитии неустойчивости плазменной прикатодной оболочки. Основным фактором, определяющим тип свечения разряда, является распределение напряженности электрического поля вблизи поверхности катода в фазе роста напряжения на промежутке в совокупности с динамикой протекающих в это же время разрядных процессов.

## Список литературы

- [1] *Uman M.* Lighting Discharge. London: Academic Press, 1987.
- [2] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [3] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [4] *Базелян А.Э., Базелян Э.М.* // ТВТ. 1993. Т. 31. № 6. С. 867–874.
- [5] *Александров Н.Л., Базелян Э.М., Дятко Н.А.* и др. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 7. С. 587–602.
- [6] *Kudasov B.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A.* et al. // 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. / Ed. G. Cooperstein, I. Vitkovitsky. 1998. P. 1572.
- [7] *Льюис И., Уэлс Ф.* Миллимикросекундная импульсная техника. М.: ИЛ, 1956.
- [8] *Репин П.Б., Репьев А.Г.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 128–130.
- [9] *Павловский А.И., Воинов М.А., Горохов В.В.* и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 1. С. 64–71.
- [10] *Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И.* и др. // ТВТ. 1991. Т. 29. Вып. 2. С. 383–385.