

04;12

Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе

© Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, А.С. Субботский, А.Н. Ковалев

Научно-образовательный центр „Электрофизика“
физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: stishkov@paloma.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 10 февраля 2010 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования импульсной короны для электрических полей различной степени неоднородности при воздействии стандартным грозвым импульсом в широком диапазоне напряжений от порога возникновения до пробоя. Благодаря применению высокочувствительной видеокамеры удалось зарегистрировать микроразрядные и стримерные процессы в воздухе задолго до искрового пробоя.

Известно, что размеры чехла коронного разряда постоянного напряжения растут при увеличении подаваемого напряжения, а форма чехла короны зависит от полярности активного электрода [1,2]. Диапазон напряжений от возникновения коронного разряда до искрового пробоя, как было впервые показано Пиком в работе [3], увеличивается с ростом степени неоднородности электрического поля. В работе показано, что аналогичная картина наблюдается и для импульсной короны. Полученные результаты показывают, что характер импульсного коронного разряда существенно зависит от полярности импульса, а искровой пробой становится возможным, когда большинство ветвей стримерной короны замыкает межэлектродный промежуток.

Импульсная корона в полях разной степени неоднородности

Эксперименты проводились на испытательной установке, созданной по принципу генератора Маркса, стандартными грозвыми импульсами (продолжительность переднего фронта $1.2 \pm 0.1 \mu\text{s}$, продолжительность импульса $50 \pm 1 \mu\text{s}$), для электродов с минимальным радиусом кривизны 1–40 мм и при межэлектродном расстоянии 75–200 мм. Для регистрации импульсной короны применялась высокочувствительная видеокамера (минимальная регистрируемая освещенность $3 \cdot 10^{-3} \text{ lx}$, максимальная — $1.5 \cdot 10^4 \text{ lx}$), объединенная с компьютером.

На рис. 1 приведены видеокadres разрядных процессов в широком диапазоне напряжений при воздействии грозвым импульсом для слабонеоднородного поля (система электродов цилиндр–плоскость, радиус скругления ребра цилиндра 25 мм, радиус цилиндра 35 мм, межэлектродное расстояние 200 мм, степень неоднородности поля — отношение максимальной напряженности поля к средней — 8). Рассмотрим результаты эксперимента в данной системе электродов при отрицательной полярности цилиндра (рис. 1, а).

Порог начала микроразрядной активности по уровню 2.45 кВ/мм для данной системы составляет 66 кВ. При отрицательной полярности сферы начиная с 105 кВ на кадрах видеозаписи можно увидеть отдельные конусообразные светящиеся образования с расширяющимся диффузным концом. Эти образования стартуют с отдель-

ных точек околополюсной поверхности отрицательного полусферического электрода и распространяются в радиальном направлении. Длина образований — не более миллиметра, форма и размер образований позволяют отождествить их с электронными лавинами [4]. Количество лавин за время действия импульса напряжения в среднем растет с ростом амплитуды импульса — при 120 кВ наблюдается порядка десяти лавин.

При отрицательной полярности сферы с напряжением 125 кВ и выше на видеокadres регистрируются удлиненные слабосветящиеся каналы с четкими границами, стартующие с поверхности сферического электрода в количестве порядка десяти. Эти каналы вначале утолщаются, а затем утончаются. Они преимущественно распространяются вдоль силовых линий поля и незначительно ветвятся, это позволяет отождествить светящиеся каналы с отрицательными стримерами. Длина стримеров составляет несколько сантиметров. Большинство стримеров затухает, не достигнув противоэлектрода. С повышением напряжения количество и длина стримеров растет, и при некотором напряжении отдельные стримеры касаются противоэлектрода, однако это далеко не всегда приводит к искровому пробую межэлектродного промежутка: значительное падение напряжения на электродах, характерное для пробоя, не регистрируется. Устойчивый искровой пробой, сопровождающийся резким (за доли микросекунд) разрядом емкости генератора напряжения, регистрируется при 175 кВ и выше. При этом всегда регистрируется сильное (по сравнению с силой излучения стримеров) свечение разрядного канала.

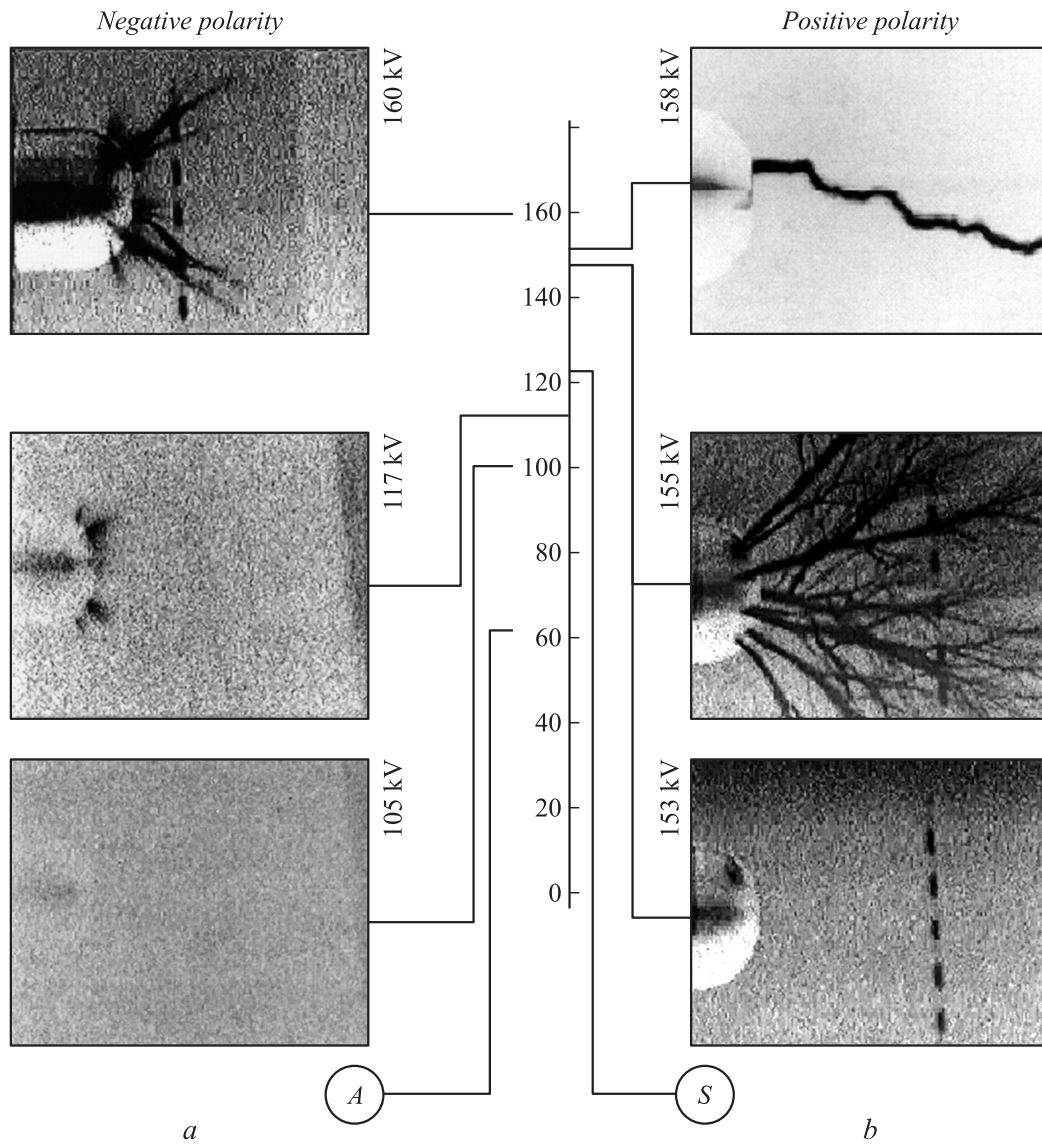


Рис. 1. Импульсная корона у отрицательного (*a*) и положительного (*b*) сферического электрода (негатив) в слабонеоднородном поле при воздействии грозвым импульсом. Радиус скругления цилиндра: $r = 25$ mm, межэлектродное расстояние $h = 200$ mm, степень неоднородности электрического поля 8. На шкале амплитуды импульса напряжения $U_{\text{амп}}$ отмечены рассчитанные порог начала микроразрядной активности (*A*) и порог возникновения стримеров (*S*).

О лавинной природе начальных очагов свечения говорит и оценка количества электронов в лавине N_e в дрейфово-диффузионном приближении [4]:

$$N_e = \exp \left[\int_a^b [\alpha(E(x)) - a(E(x))] dx \right].$$

Здесь $\alpha(E)$ — зависимость коэффициента ионизации от напряженности поля, а $a(E)$ — зависимость коэффициента прилипания от напряженности поля. Интегрирование проводится по силовой линии от поверхности катода до точки, где напряженность поля равна критической: $\alpha(E) = a(E)$. Коэффициенты ионизации и прилипания взяты из [4,5], учтено влияние влажности на коэф-

фициент прилипания (в эксперименте относительная влажность составляла 50% при температуре 18°C).

Известен критерий перехода лавины в стример: число электронов в лавине N_e достигает 10^8 [4]. Расчет показывает, что лавинно-стримерный переход становится возможен при напряжении 127 kV. В эксперименте первые диффузные очаги свечения на поверхности катода появились при 106 ± 1 kV (рис. 1), а первые удлиненные светящиеся образования — стримеры — при 125 ± 5 kV.

При подаче положительного импульса на сферический электрод картина иная (рис. 1, *b*): лавинной фазы не наблюдается, начиная с некоторого критического напряжения возникают древовидные сильноветвленные стримеры, стартующие с поверхности сферического электро-

да. Длина отдельных стримеров достаточно велика и достигает 5–10 см, толщина канала в стартовой точке составляет 5 мм, затем через 2.5–5 см наблюдается ветвление стримерных каналов, сопровождающиеся их утончением. Стартовые участки стримеров направлены преимущественно радиально, после ветвления стримеры распространяются в произвольных направлениях. Искровой пробой наступает, когда несколько ветвей стримеров замыкает межэлектродный промежуток. На рис. 1 также приведена фотография искрового пробоя: видно, что канал лидера проходит по одной из ветвей стримера и светится гораздо ярче стримерных каналов. Для его регистрации использованы специальная видеокамера, чувствительность которой существенно понижена. На рис. 2 приведена осциллограмма импульса напряжения в отсутствие искрового пробоя и с ним.

Стримеры не вызывают существенных искажений импульса напряжения ввиду сравнительно малой проводимости стримерных каналов, лидер, напротив, приводит к резкому падению заднего фронта импульса напряжения, разряжая выходной конденсатор.

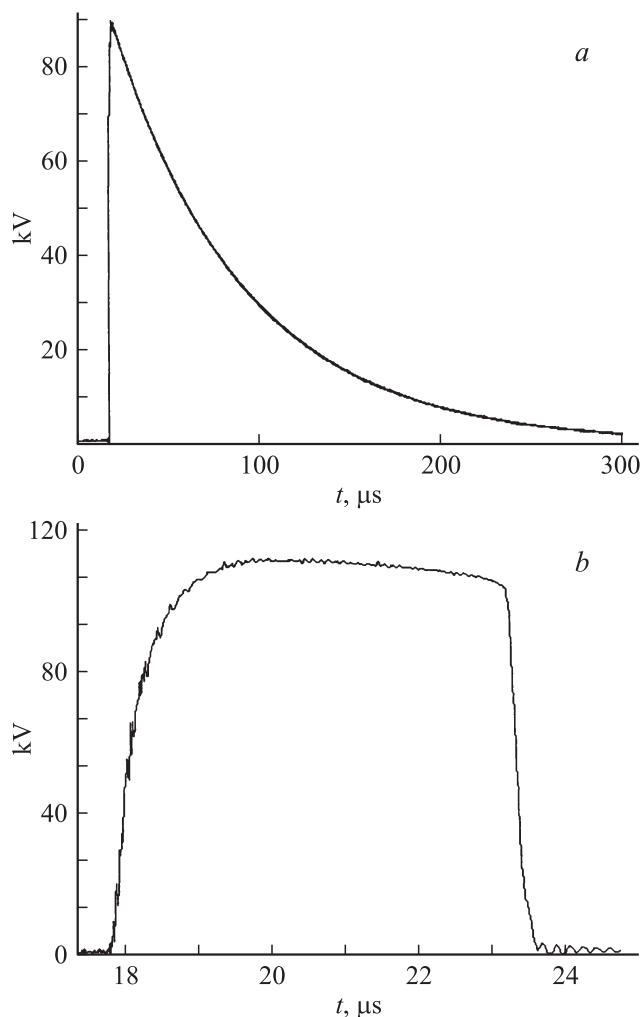


Рис. 2. Осциллограммы импульса напряжения в отсутствие пробоя (а) и с пробоем (б).

Как видно из видеок кадров, положительный стример имеет сильно разветвленную древовидную структуру, а отрицательный — радиальную линейную. Положительные стримеры значительно тоньше и распространяются на гораздо большее расстояние. При этом сам факт достижения одной из ветвей стримера противозэлектрода не гарантирует искрового пробоя.

В случае слабонеоднородного поля различие между напряжением пробоя и напряжением возникновения стримеров при положительной полярности невелико: 155 и 158 kV. Это связано с невысокой степенью неоднородности электрического поля, которая составляет 8. При более высокой степени неоднородности электрического поля картина иная.

На рис. 3 приведены видеок кадры разрядных процессов в широком диапазоне напряжений при воздействии грозвым импульсом для сильнонеоднородного поля (степень неоднородности поля 60). В данном случае диапазон между напряжением возникновения импульсной короны и напряжением искрового пробоя значительно шире: для отрицательного импульса более трех раз, а для положительного — 2.6 раз. По-прежнему сохраняются различия в стримерных процессах от отрицательного и положительного электродов: отрицательные стримеры значительно короче положительных, быстрее сужаются, сравнительно маловетвисты и имеют диффузные окончания. Искровой пробой, как и в слабонеоднородном поле, наступает при значительно больших напряжениях, чем при воздействии положительным импульсом. Положительные стримеры обнаруживают существенный рост длины с ростом напряжения в диапазоне 50–80 kV.

Различия и сходство коронного разряда при постоянном и импульсном напряжении

В целом формы импульсной короны подобны формам короны при постоянном напряжении [4] — свечение наблюдается вблизи активного электрода. Однако при импульсном воздействии корона имеет стримерную форму, тогда как при постоянном напряжении в случае отрицательной полярности активного электрода корона имеет облегающую форму, стримеров не наблюдается.

Как было показано выше, отношение напряжения пробоя к напряжению зажигания короны сильно зависит от степени неоднородности электрического поля — в слабонеоднородных полях отношение близко к единице, а в сильнонеоднородных — возрастает до нескольких раз. Эта закономерность наблюдается как при импульсном, так и при постоянном напряжении.

При постоянном напряжении основным источником затравочных электронов принято считать объемный источник ионизации — фоновое космическое излучение. Однако в случае импульсной короны этот источник не может быть эффективен сам по себе: космическое

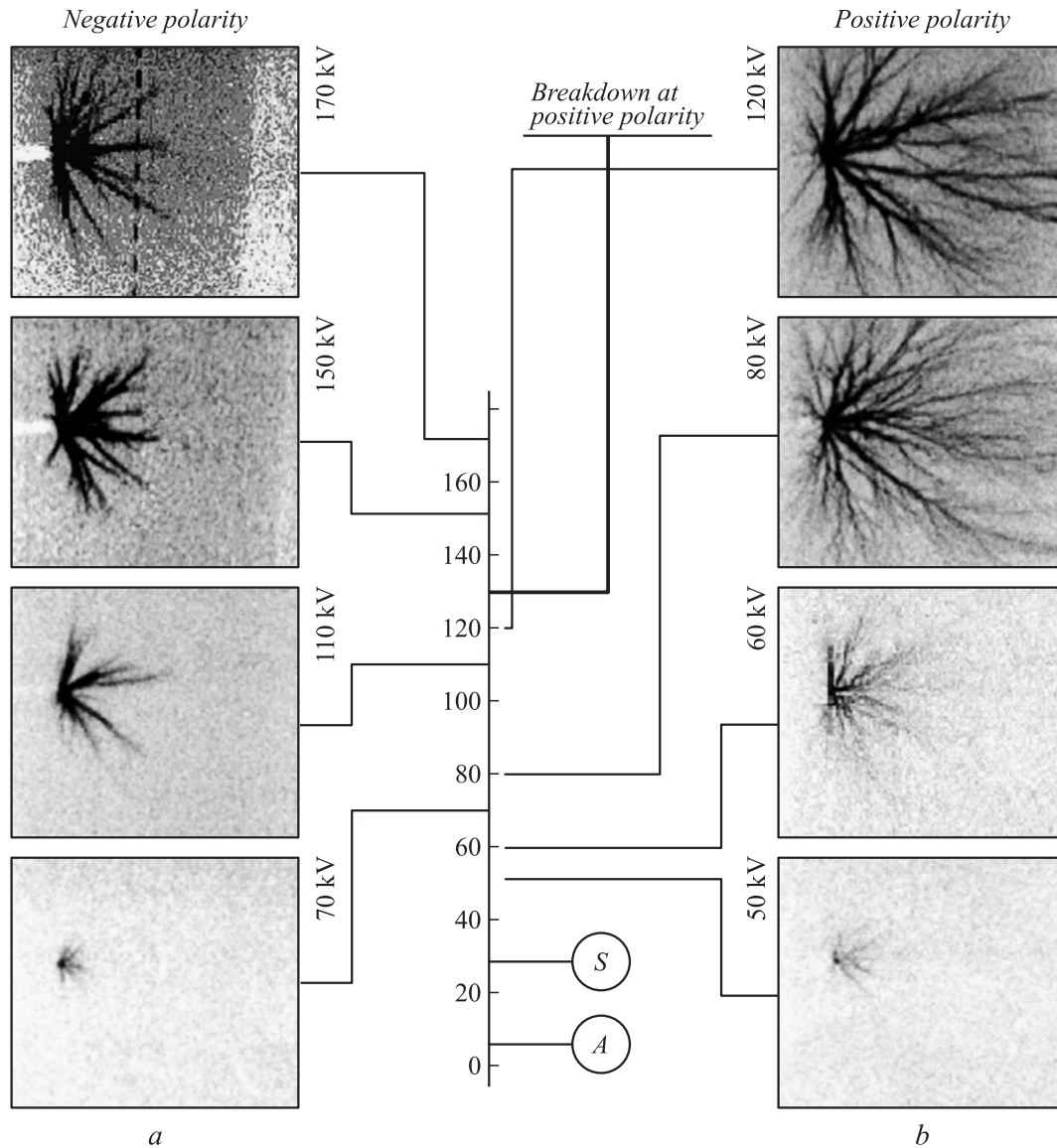


Рис. 3. Импульсная корона у отрицательного (*a*) и положительного (*b*) сферического электрода (негатив) в слабнеоднородном поле при воздействии грозвым импульсом. Радиус сферы: $r = 2.5 \text{ mm}$, межэлектродное расстояние $h = 150 \text{ mm}$, степень неоднородности электрического поля 60. На шкале амплитуды импульса напряжения U_{amp} отмечены рассчитанные порог начала микрозарядной активности (*A*) и порог возникновения стримеров (*S*).

излучение производит порядка 10 электронов в 1 cm^3 за 1 s [4]. Для активного электрода с радиусом порядка 1 cm область, где напряженность поля выше критической и возможны лавинные процессы, составляет при умеренном напряжении не более нескольких сантиметров кубических. Среднее время ожидания затравочного электрона, порожденного космическим излучением, в области такого размера составляет не менее 0.01 s , тогда как продолжительность стандартного грозового импульса составляет $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$. В таких условиях зажигание короны было бы исключительно редким событием. Очевидно, непосредственное производство электрона космическим излучением не играет в этом случае существенной роли. В случае импульсной короны источник

затравочных электронов, видимо, зависит от полярности разряда.

При отрицательной полярности активного электрода при напряжении вблизи порога зажигания короны можно отчетливо различить очаги зарядной активности на поверхности электрода (рис. 1). Они имеют диффузную форму и малый (порядка миллиметра размер). При положительной полярности сразу возникают протяженные стримерные каналы. Таким образом, представляется, что при отрицательной полярности активного электрода затравочный электрон возникает с поверхности — при наличии диэлектрических пленок эмиссионные токи могут быть существенны уже при напряженностях порядка 10^7 V/m [6]. На опытах с коронным разрядом отрица-

тельной полярности постоянного напряжения в системе электродов нить—цилиндр при диэлектрических напряженностях поля (менее 10–20 kV/cm) наблюдались темновые токи плотностью 10^{-7} – 10^{-6} A/m². В пересчете на площадь торца исследуемого электрода $4 \cdot 10^{-3}$ m² это дает частоту появления отрицательно заряженных частиц на поверхности порядка $(1-10) \cdot 10^3 \mu\text{s}^{-1}$. Таким образом, эмиссии заряженных частиц с поверхности электрода, покрытого оксидными пленками, вполне достаточно для объяснения появления десятка лавин при околокритических напряженностях поля.

При положительной полярности активного электрода затравочные электроны вытягиваются в область высокой напряженности из окружающего объема. Поскольку в объеме отрицательные заряды существуют в основном в виде отрицательных ионов, образование затравочного электрона происходит, видимо, через отлипание, вызванное сильным электрическим полем [4].

Измерение длины стримеров

В [4] описаны возможные механизмы затухания стримеров импульсной короны, к которым, прежде всего, относится прилипание электронов к электроотрицательным молекулам кислорода. Для изучения этого механизма необходимо исследовать зависимость длины стримерных каналов от напряжения. Однако, как показал анализ видеок кадров, наблюдается существенный статистический разброс длин стримеров, как на отдельных фотографиях, так и на фотографиях, полученных при последовательной подаче серии импульсов. С этой целью проводилась обработка видеок кадров импульсной короны.

Для обработки массива видеок кадров была написана оригинальная программа, позволяющая определять либо автоматически, либо вручную максимальную длину стримеров в каждом кадре с последующим сохранением результата и выводом зависимости этой длины от напряжения [7].

На рис. 4 приведена зависимость максимальной длины стримеров от порядкового номера импульса, полученная для системы электродов сфера—плоскость (радиус сферы 9.5 mm, межэлектродное расстояние 175 mm) для положительной и отрицательной полярности сферы в диапазоне напряжений 50–170 kV. Интервал между импульсами составлял 5 s.

На графиках видны хаотические скачки максимальных длин стримеров, хотя в среднем отмечается устойчивый рост максимальной длины с ростом напряжения. Следует отметить, что для положительного стримера этот разброс больше, чем для отрицательного. Статистический разброс означает, что при заданных внешних условиях стримерный процесс может развиваться по-разному. Причинами столь большого статистического разброса могут быть:

а) различная стартовая задержка отдельных стримеров относительно максимума напряжения импульса;

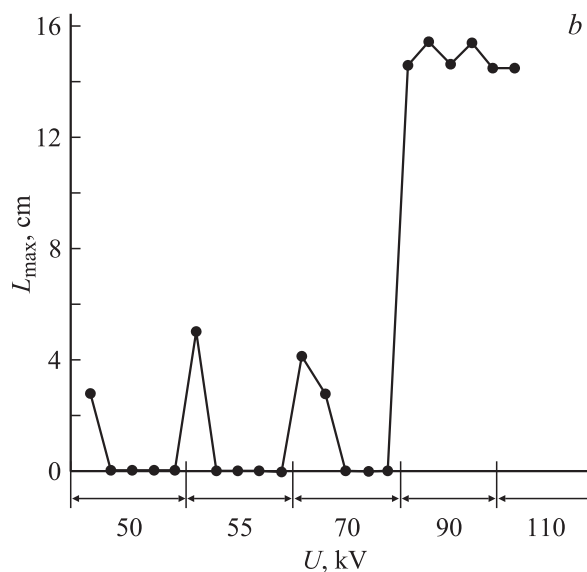
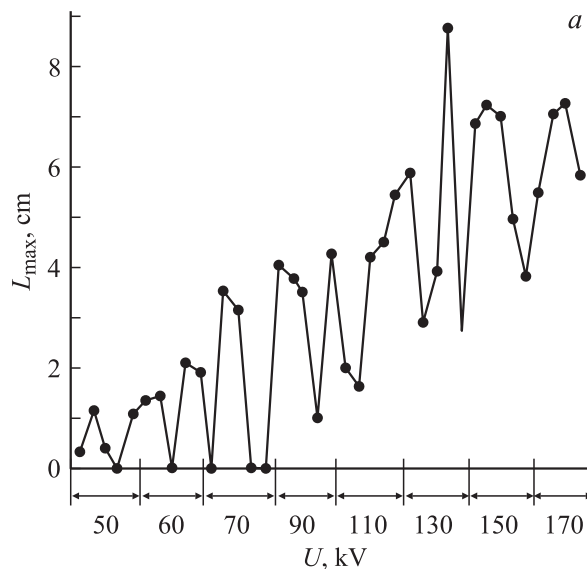


Рис. 4. Зависимость максимальной длины стримера L_{max} от амплитуды напряжения U . Каждая точка графика соответствует одному импульсу. а — отрицательная полярность, б — положительная.

б) совместное развитие нескольких стримеров — в этом случае они мешают друг другу распространяться (для положительного стримера влияние этого фактора более существенно из-за сильной разветвленности стримерных каналов);

в) влияние остаточного ионного следа либо других долгоживущих продуктов реакций, вызванных прошедшим стримером, на распространение других стримеров. Влияние последнего фактора можно исключить, если проводить эксперименты с увеличенным временем задержки между импульсами.

Влияние задержки между импульсами исследовано в системе электродов цилиндр с закругленным ребром—плоскость (рис. 5). В качестве опытного образ-

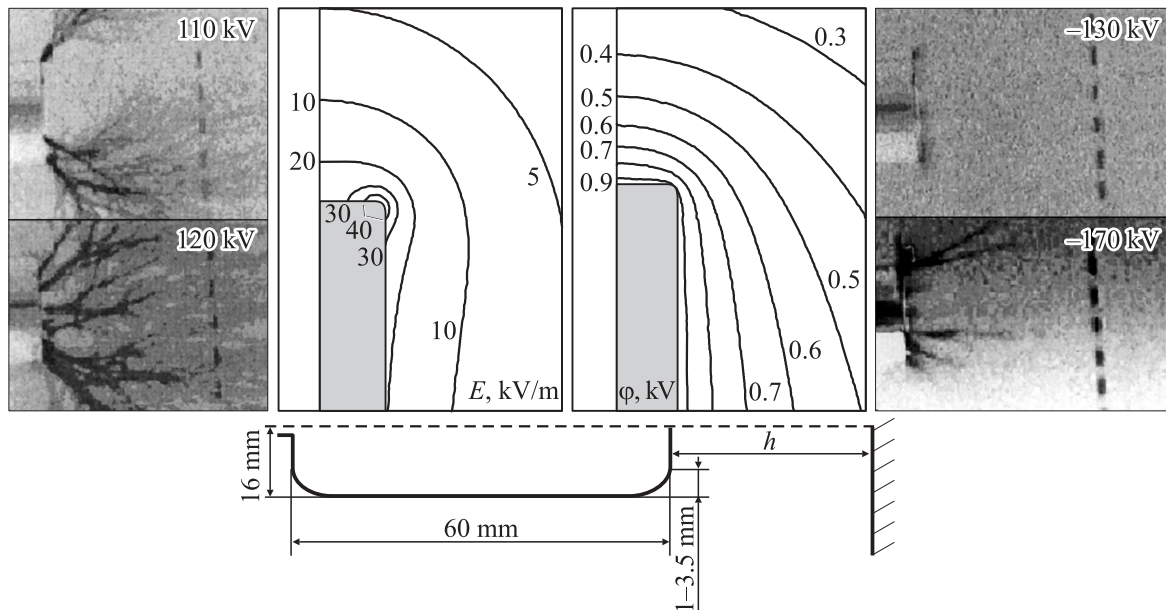


Рис. 5. Фотографии стримеров в системе электродов цилиндр—плоскость (межэлектродное расстояние 200 мм) при различных напряжениях (справа и слева). Напряженность поля и распределение потенциала (напряжение 100 кВ).

ца использовался цилиндр с радиусом закругления 3 мм. Межэлектродное расстояние составило 200 мм.

На рис. 5 приведен контурный график распределения напряженности поля. Как видно, поле на торцевой поверхности цилиндра существенно неоднородно, у закругления торца наблюдается максимум напряженности, а у центра торца цилиндра поле в 2.2 раза меньше. По фотографиям можно судить, что лавины и стримеры развиваются именно с закругления торца электрода как при положительной, так и при отрицательной полярности.

На рис. 6 приведена зависимость максимальной длины стримера (максимум берется среди всех стримеров, зарегистрированных на видеокadre для данного импульса) для напряжения 170 кВ отрицательной полярности при различных временных задержках между импульсами. Виден существенный разброс длин стримеров при малых интервалах между импульсами.

Видно, что разброс длин стримеров значительно снижается при увеличении интервала между импульсами до 5 мкс. Возможно, это значение связано с процессом релаксации ионной плазмы стримерного канала. Рассмотрим подробнее эту гипотезу.

Как известно, в стримере можно выделить две области — головка и стримерный канал [5]. Головка — область, близкая к фронту, это только что образованная плазма высокой концентрации, состоящая из электронов и положительных ионов. Поле в плазме канала экранировано, поэтому ионизации в канале практически нет. Электроны гибнут из-за прилипания, поэтому плазма достаточно быстро становится ионной, благодаря чему ее проводимость резко падает. За время гибели электро-

нов (это характерное время прилипания, 10^{-8} с) фронт успевает значительно продвинуться вперед.

В результате сразу за фронтом движется область высокой (электронной) проводимости, это головка стримера и электронный канал. За ней вплоть до электрода, откуда стартовал стример, тянется ионный канал. В ионном канале идут два основных процесса — ион-ионная рекомбинация и релаксация электрического заряда за счет проводимости плазмы, причем эти процессы не останавливаются и после остановки стримера. Послед-

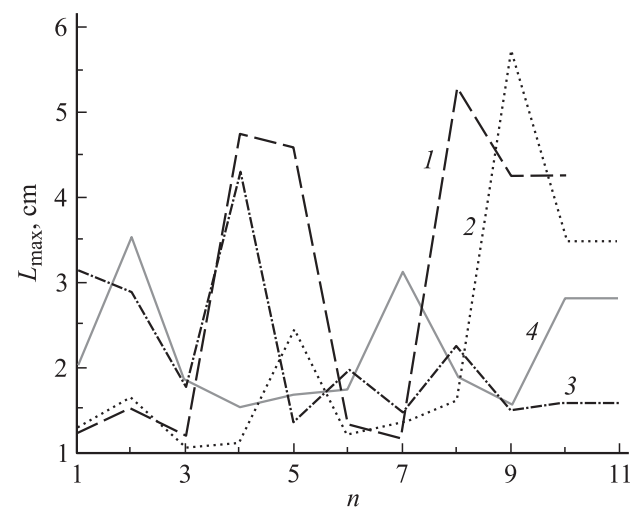


Рис. 6. Зависимость максимальных длин стримеров L_{\max} от порядкового номера импульса n при различных значениях времени задержки импульсов (1 — 10, 2 — 60, 3 — 120, 4 — 300 с).

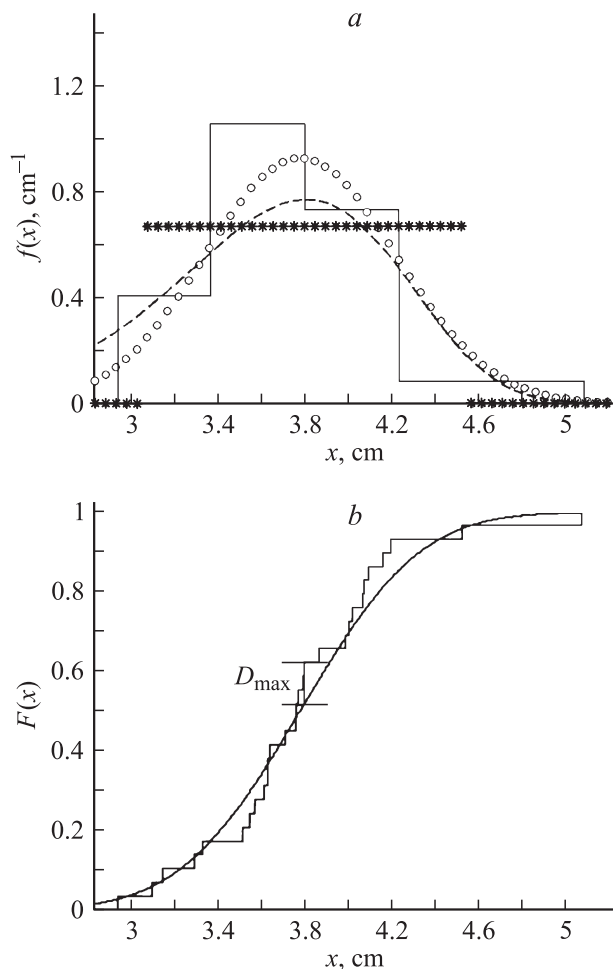


Рис. 7. *a* — эмпирическая и теоретические функции плотности вероятности: сплошная кривая — эмпирическая; \circ — нормальное распределение; $*$ — однородное распределение; штриховая кривая — распределение Вейбулла. *b* — разность между нормальным (гладкая кривая) и эмпирическим (ломаная) распределением по критерию Колмогорова D_{\max} . Интервал между импульсами 300 с.

ний процесс аналогичен обычной разрядке конденсатора через сопротивление, образованное ионным каналом.

Начальная плотность плазмы головки стримерного канала превышает 10^{19} m^{-3} . Коэффициент ион-ионной рекомбинации $\beta \sim 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ [5], изменение концентрации за счет рекомбинации дается следующей формулой:

$$n(t) = \frac{n_0}{1 + n_0 \beta t}. \quad (1)$$

Расчет по формуле (1) показывает, что за 1000 с концентрация в ионном следе упадет до фонового значения 10^{10} m^{-3} . Из этого следует, что для исключения влияния ионного следа интервал между импульсами напряжения должен составлять 10–15 мин. По порядку величины это совпадает с указанным выше значением интервала между импульсами, при котором разброс максимальной длины стримеров существенно снижался — 5 мин.

На рис. 7 приведены результаты изучения длины стримеров в системе электродов цилиндр–плоскость (цилиндр повернут к плоскости торцом, радиус закругления ребра 25 mm, радиус цилиндра 30 mm, расстояние между цилиндром и плоскостью 100 mm). Подаваемое напряжение отрицательной полярности составляло 160 kV. Интервал между импульсами составлял 300 с.

Для оценки соответствия эмпирической функции распределения предполагаемой теоретической используется критерий согласия Колмогорова [8]. По критерию Колмогорова оптимальным является нормальное распределение.

Видно, что при задержке в 300 с распределение максимальных длин стримеров соответствует нормальному (рис. 7). Хорошее соответствие распределения максимальных длин стримеров по длине нормальному распределению говорит о том, что при задержке 300 с стримерные процессы статистически независимы.

Зависимость длины стримеров от напряжения

Опираясь на результаты проведенного исследования, можно построить экспериментальную зависимость максимальной длины стримера от подаваемого напряжения при положительной и отрицательной полярностях.

Из сравнительного графика (рис. 8) видно, что положительные стримеры при одном и том же напряжении в 1.5–2 раза длиннее отрицательных. Кроме того, наблюдается разброс значений при больших напряжениях, что, вероятно, является следствием влияния боковых стримеров и сильной разветвленностью последних.

Заключение

В случае воздействия грозовым импульсом отрицательной полярности при напряжениях, близких к порогу возникновения лавинных процессов, зарегистрированы отдельные лавины на поверхности активного электрода.

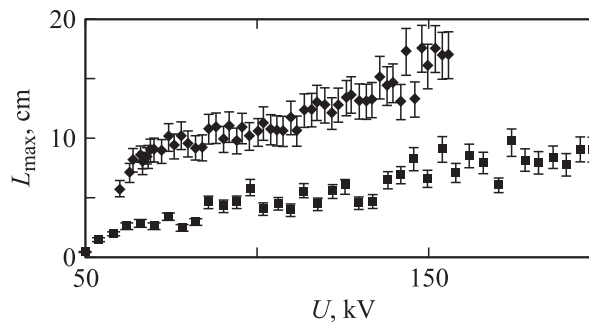


Рис. 8. Экспериментальная зависимость максимальной длины стримеров L_{\max} от амплитуды напряжения U . Система электродов шар (диаметр 9.5 mm)–плоскость. Межэлектродное расстояние 200 mm. \blacklozenge — положительная полярность шара; \blacksquare — отрицательная полярность шара.

При положительной полярности импульса лавины не наблюдаются, процессы развиваются в стримерной форме. Зарегистрированы стримерные процессы в диапазоне напряжений от начала лавинной активности до искрового пробоя межэлектродного промежутка в сильнонеоднородных и слабонеоднородных электрических полях.

Описаны структурные различия стримерных процессов от отрицательного и положительного электродов.

Показано, что длина ветвей стримеров увеличивается с ростом напряжения, а переход к лидерной (искровой) стадии пробоя возможен в случае, когда значительная часть ветвей стримерной короны переключает межэлектродный промежуток. Показано, что отношение напряжения пробоя к напряжению зажигания импульсной короны зависит от степени неоднородности электрического поля.

Статическое распределение максимальных длин стримеров при достаточно большом времени задержки является преимущественно нормальным. При частом следовании импульсов развитие стримерных процессов зависит от предыстории, влияние предшествующих импульсов становится незначительным при промежутке между импульсами не менее 5 минут.

Список литературы

- [1] *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [2] *Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 7. С. 30.
- [3] *Peek F.W.* Dielectric phenomena in high-voltage engineering. London: McGraw-Hill Book Company, 1929. 397 p.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [5] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [6] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука. 1991. 224 с.
- [7] *Стишков Ю.К., Субботский А.С., Ковалев А.Н.* // Сб. докл. IX Междунар. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. СПб: Соло, 2009. С. 210–213.
- [8] *Хаушильд В., Мош В.* Статистика для электротехников в приложении к технике высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 312 с.