

УДК 537.523.4

СТРИМЕРНЫЕ И ЛИДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОЗДУХЕ ПРИ НАЛИЧИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЛОСКОСТИ

© 2020 г. Р. В. Скляренко¹, А. В. Самусенко^{1, *}, Ю. К. Стишков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.samusenko@spbu.ru

Поступила в редакцию 24.01.2019 г.

После доработки 03.09.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Рассматривается система электродов сфера–плоскость в воздухе при наличии одного или двух диэлектрических барьеров-листов, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости. Таким образом барьеры не перегораживают кратчайший путь между электродами. Исследуется влияние барьеров на стримерные процессы и пробой. Выявлено, что при уменьшении расстояния барьер–электрод напряжение пробоя, как правило, уменьшается.

DOI: 10.31857/S0040364420010184

ВВЕДЕНИЕ

При достаточно большой напряженности электрического поля в воздухе возможно образование стримеров – проводящих разветвленных плазменных структур, растущих за счет усиления поля на оконечностях каналов [1–3]. Из-за прилипания электронов к молекулам кислорода плазма в стримерных каналах постепенно теряет проводимость, поэтому сами по себе стримеры не приводят к пробоям. Однако, если температура газа в каналах стримера превышает критический уровень, при котором эффект прилипания электронов подавляется, запускается процесс повышения температуры и проводимости, приводящий к образованию искрового канала и к пробоям [3].

Пробой нарушает нормальное функционирование высоковольтных устройств, поэтому оценка напряжения пробоя и его повышение являются актуальными задачами. Существуют критерии для определения порогового напряжения возникновения стримеров и пробоя [4, 5]. Для предотвращения нежелательной разрядной активности используются твердые диэлектрические барьеры различной формы, препятствующие развитию стримеров и осложняющие переход к искровому каналу. При приложении переменного напряжения в подобных системах возникает барьерный разряд [6]. Однако далее ограничимся воздействием одиночными импульсами напряжения, при которых форма разряда – стримерная. Наиболее простые конфигурации твердых диэлектрических барьеров – плоские, расположенные поперек пути развития стримеров, – относительно изучены: описаны особенности распространения

стримеров, рассмотрена зависимость напряжения пробоя от расположения барьера, его размеров и свойств [2, 5–10]. Так, при достижении головкой стримера поверхности твердого диэлектрика рост плазменного стримерного канала прекращается, поэтому твердые диэлектрические элементы (“барьеры”) могут использоваться для остановки развития стримерного разряда. Создаваемая таким образом “барьерная изоляция” позволяет увеличить напряжение пробоя (до 60–130% [5]) при неизменном межэлектродном расстоянии, что важно для создания компактных высоковольтных устройств.

Рассмотрим менее изученную конфигурацию – не параллельные заземленной плоскости, а перпендикулярные ей барьеры (рис. 1а, 1б). При таком размещении барьеры не перегораживают межэлектродный промежуток и не препятствуют распространению стримеров от активного электрода к заземленной плоскости. Похожая система рассматривалась в работах [11–15]. В [11] сообщается об увеличении минимального значения напряженности электрического поля по сравнению со случаем без барьера, что ведет к увеличению скорости стримеров и интенсивности ионизации в присутствии изолирующей поверхности. Экспериментальные результаты, полученные в [12], показывают, что основной фактор, определяющий размеры и структуру стримерной зоны, – распределение электростатического поля у высоковольтного электрода. Оно в свою очередь зависит от характеристик диэлектрического барьера: положения барьера относительно высоковольтного электрода, материала барьера и его толщины.

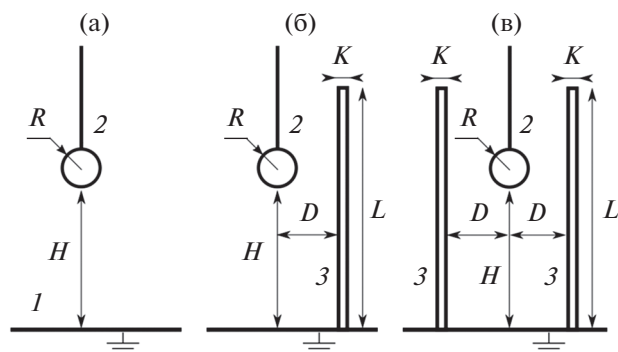


Рис. 1. Схема расположения электродов и диэлектрических барьеров: (а) – без барьеров, (б) – при наличии одного барьера, (в) – при наличии двух барьеров; 1 – заземленный плоский электрод, 2 – высоковольтный электрод-сфера, 3 – плоские диэлектрические барьеры.

В работах [13, 14] изучалась разрядная активность в условиях сухого или влажного барьера-пластины и различной влажности или давления газа для барьера-цилиндра соответственно. В [13] доказано, что на напряжение пробоя в первую очередь влияет диэлектрическая проницаемость барьера, тогда как его химический состав и присутствие воды оказывают незначительное влияние. В [14] результаты испытаний показали, что при фиксированной напряженности электрического поля скорость распространения стримера обратно пропорциональна давлению воздуха или влажности. В [15] исследуются траектории пробоя при наличии различных диэлектрических материалов в форме цилиндрических стержней между электродами.

Новизна настоящей работы заключается в сопоставлении случаев одного барьера и двух барьеров, образующих зазор, а также в анализе причин снижения напряжения пробоя при наличии таких барьеров.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассматривается система электродов сфера–плоскость в воздушном пространстве при наличии твердых диэлектрических барьеров, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости (рис. 1). Высоковольтный электрод – сфера – подключен к генератору импульсного напряжения, формирующего стандартные грозовые импульсы (длительность переднего фронта – 1.2 ± 0.1 мкс, заднего – 50 ± 1 мкс), амплитуда импульсов напряжения (далее для краткости – “напряжение”) составляет от 40 до 500 кВ. Используется следующее измерительное оборудование: цифровой осциллограф Tektronix для измерения тока, протекающего через заземленную плоскость; измеритель напряжения между электро-

дом-сферой и заземленной плоскостью; измеритель напряженности электрического поля ИПЭП-1, с помощью которого можно восстановить распределение плотности заряда на поверхности барьера. Также используются высокочувствительные камеры для регистрации изображений возникающих стримеров и искр. Полученные снимки отражают интегральную картину развития стримеров и искр, поскольку время экспозиции заметно превышает длительность импульса напряжения.

Рассматривается три варианта расположения элементов конструкции:

1) система электродов сфера–плоскость без барьеров (рис. 1а);

2) те же электроды с одним барьером, расположенным перпендикулярно заземленной плоскости (рис. 1б);

3) те же электроды с двумя барьерами, расположенными перпендикулярно заземленной плоскости (рис. 1в).

Барьеры представляют собой квадратные листы стекла толщиной $K = 1$ см, шириной и длиной $L = 50$ см; диэлектрическая проницаемость в диапазоне частот $0.01 - 1$ МГц $\epsilon = 6.0 \pm 0.4$; объемная удельная электропроводность σ находится в диапазоне $10^{-11} - 10^{-8}$ См/м. Выбор стекла в качестве материала барьеров связан с тем, что время максвелловской релаксации стекла $\tau_M = \epsilon\epsilon_0/\sigma$ находится в промежутке между длительностью стандартного грозового импульса и интервалом между подачей импульсов. Благодаря этому на временном масштабе импульса напряжения данный материал является диэлектриком, однако между импульсами напряжения накопленный электрический заряд успевает нейтрализоваться за счет электропроводности стекла. Это важно для обеспечения независимости испытаний (отсутствия влияния предыдущих испытаний на результаты последующих), поскольку накопленный на поверхности твердого диэлектрика электрический заряд может существенно исказить электрическое поле [7]. Указанный широкий разброс уровней удельной электропроводности барьеров не снижает значимости результатов, поскольку даже для верхней границы диапазона время максвелловской релаксации (~ 10 мс) заметно больше длительности грозового импульса (~ 0.1 мс).

Для регистрации поверхностного заряда используются барьеры из другого материала – поликарбоната, обладающего объемной проводимостью σ не более 10^{-12} См/м, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.5 \pm 0.2$. Толщина барьеров из поликарбоната $K = 0.4$ см, ширина и длина $L = 50$ см. Радиус электрода-сферы $R = 9$ мм.

Напряжение пробоя определялось следующим образом по аналогии с ГОСТ 1516.2-97 [16]. Пода-

ется несколько серий грозových импульсов (в рамках серии амплитуда импульсов напряжения одна и та же), шаг по напряжению между сериями – 2 кВ. В рамках каждой серии вычисляется доля пробоев; далее, исходя из предположения о нормальном распределении выборки, ищутся доверительные интервалы для параметра $U_{50\%}$ – напряжения, при котором вероятность пробоя равна 0.5. Далее для краткости эта величина будет называться просто “напряжением пробоя”. Уровень статистической значимости при построении доверительных интервалов был взят равным 0.05.

Эксперимент представляет собой серию испытаний. В каждом испытании производится следующая последовательность действий:

1) установка двух барьеров в межэлектродном промежутке;

2) запуск видеосъемки;

3) подача серии высоковольтных импульсов;

4) сохранение кадров с разрядной активностью и соответствующими напряжениями.

Затем изымается один барьер, и последовательность действий 1–4 повторяется.

Потом изымается оставшийся барьер, и последовательность действий 1–4 повторяется.

После этого напряжение поднимается, варьируется ширина зазора, начинается следующее испытание.

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДОМ И БАРЬЕРОМ

На рис. 2 показана зависимость напряжения пробоя от расстояния барьер–электрод для случаев без барьера, с одним и двумя барьерами. При близком расположении одного барьера или узком зазоре между двумя барьерами напряжение пробоя падает (до 11% и 6% соответственно) по сравнению со случаем отсутствия барьеров. По мере удаления барьера или барьеров напряжение пробоя возрастает и выходит на насыщение, соответствующее напряжению пробоя без барьеров. Отметим, что в случае двух барьеров имеется интервал, в котором напряжение пробоя превосходит случай “без барьеров” – не более чем на 6%. В остальном, зависимости для одного и двух барьеров имеют схожий характер.

Целесообразно ли использование критериев для расчета напряжения пробоя в воздушных зазорах для рассмотренных систем?

Известна эмпирическая закономерность [4]: длина стримеров L есть линейная функция от напряжения U , увеличение напряжения на 5 кВ приводит к увеличению длины стримеров примерно на 1 см:

$$L(U) = (U - U_0)/E_0, \quad E_0 \approx 5 \text{ кВ/см}, \quad (1)$$

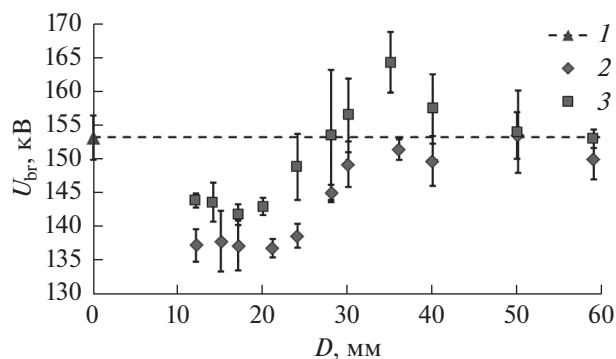


Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя U_{br} от расстояния барьер–электрод D : 1 – без барьеров, 2 – при наличии одного барьера, 3 – при двух барьерах; расстояние электрод–заземленная плоскость $H = 25$ см.

где E_0 – средняя напряженность поля в канале стримера, $U_0 = 25$ кВ.

Если считать, что напряжение пробоя соответствует уровню напряжения, при котором стримеры замыкают межэлектродный промежуток, из (1) следует выражение для напряжения пробоя U_{breakd} в сильнонеоднородных полях:

$$U_{breakd} = U_0 + E_0 H. \quad (2)$$

Здесь H – межэлектродное расстояние. Исходно эта закономерность выявлена для систем с воздушной изоляцией. Однако можно распространить формулу (2) и на случай барьерной изоляции, если под H понимать не межэлектродное расстояние, а кратчайший путь по воздуху между электродами [5]. В таком случае выражение (2) является оценкой “снизу” для напряжения пробоя (из-за того, что не всегда замыкание стримерами межэлектродного промежутка ведет к пробоям). Формула (2) отражает представление о том, что диэлектрические барьеры влияют на распространение стримеров прежде всего посредством удлинения их траектории за счет удлинения кратчайшего расстояния по воздуху H . В данном случае H неизменно, поскольку барьеры не перегородивают кратчайший путь между электродами по воздуху. Однако, как показывает рис. 2, наблюдается заметное (до 10%) влияние расположения барьера на напряжение пробоя.

Для выяснения физического механизма влияния расположения барьеров на напряжение пробоя были рассмотрены основные характеристики стримерного разряда и искры: траектории искровых каналов, длины стримеров и наведенные ими на заземленную поверхность токи.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СТРИМЕРОВ

Для перехода к искре необходимо замыкание стримерами пары электродов. Поэтому можно предположить, что падение напряжения пробоя

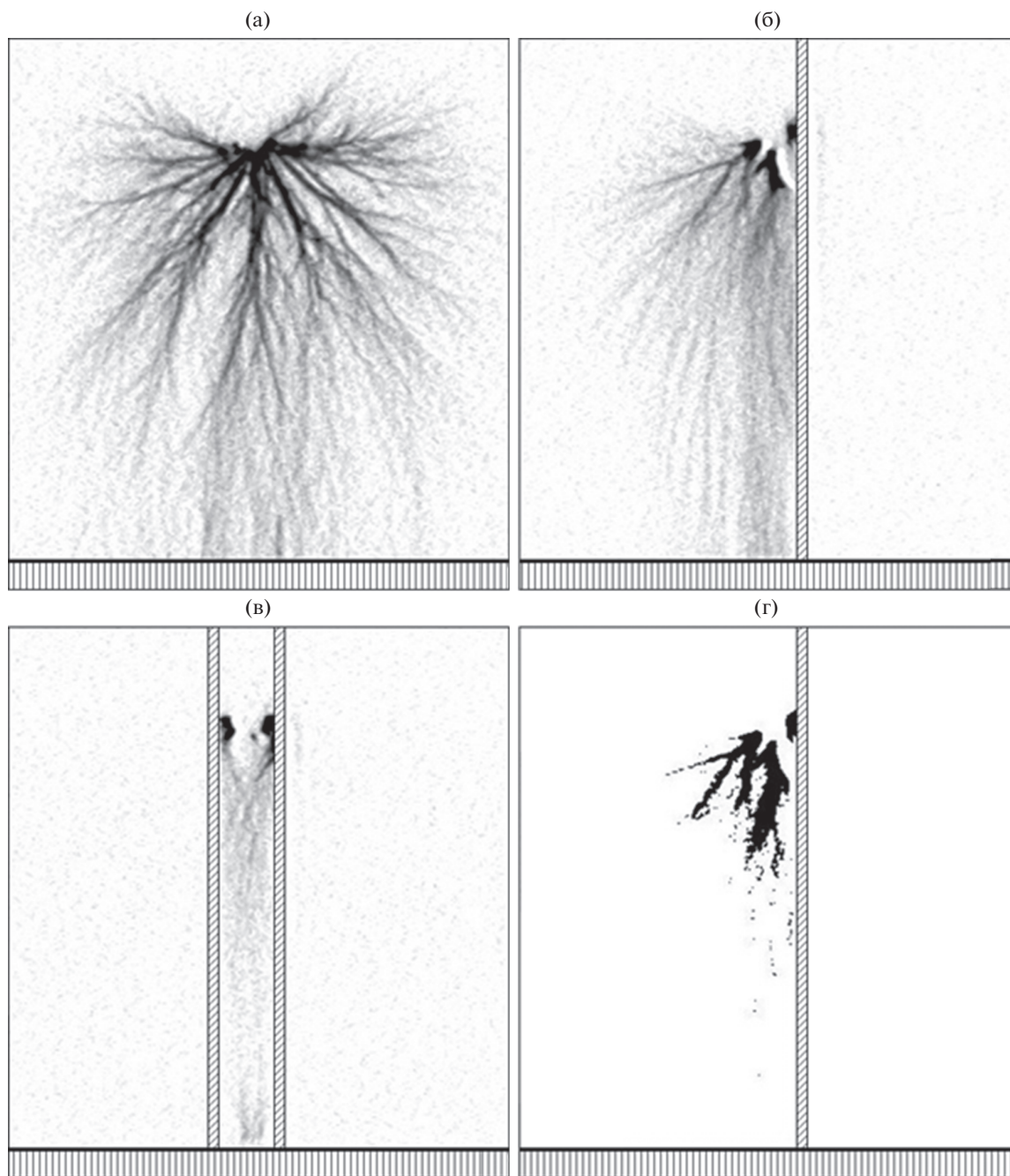


Рис. 3. Фотографии стримеров (негативы), достигающих заземленную плоскость, для случаев: без барьеров (а), с одним барьером (б), с двумя барьерами (в); расстояние электрод–заземленная плоскость $H = 20$ см, напряжение – 115 кВ; (г) – пример бинаризации фотографии при наличии одного барьера для определения длины “ярких ветвей”; изображения барьеров (наклонная штриховка) и заземленного плоского электрода (вертикальная штриховка) нанесены в процессе обработки изображений.

при наличии одного или двух барьеров вызвано тем, что в этом случае стримерам требуется меньшее напряжение, чтобы достичь противоэлектрода. Другими словами, можно допустить, что при наличии барьеров стримеры при равном напряжении длиннее, чем без барьеров. Для проверки данной гипотезы рассмотрим результаты обработки фотографий стримеров.

Настройки камеры на всем протяжении эксперимента не изменялись, что позволяет сопоставлять фотографии стримеров между собой не только качественно, но и количественно – исходя из уровня яркости (рис. 3). Устанавливая порог бинаризации (рис. 4), можно сравнить длину наиболее удаленных и слабосветящихся ветвей (в дальнейшем “все ветви”), а также длину более ярких

участков (“яркие ветви”). Последнее представляет интерес, поскольку повышенная яркость косвенно свидетельствует о более высокой проводимости данных участков. Выбранный уровень яркости для порога бинаризации условен, поэтому анализируются только результаты сравнения длины “ярких” ветвей, а не их абсолютные величины.

Обработка результатов эксперимента показала, что наличие барьеров влияет на длину стримеров (рис. 4). Учитывая, что напряжение пробоя при наличии барьеров снижается, можно было бы предположить, что длина стримеров должна при этом увеличиться. Однако, напротив, при наличии одного или двух барьеров длина “всех ветвей” уменьшается в сравнении со случаем без барьеров (рис. 4а). Это верно и для “ярких ветвей” (рис. 4б, 4в). Отметим, что различие по длине между случаями двух барьеров и одного находится в пределах доверительных интервалов. В то же время отличие этих случаев от случая “без барьера” статистически значимо.

Таким образом, барьеры, расположенные перпендикулярно заземленной плоскости, препятствуют росту стримерных каналов. Для объяснения эффекта снижения напряжения пробоя в присутствии барьеров рассмотрим другие факторы.

ТРАЕКТОРИИ ИСКРОВЫХ КАНАЛОВ И ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ ПРОБОЯ

Рассмотрим влияние барьеров на траектории искровых каналов. На рис. 5 приведены фотографии искровых каналов при расстояниях барьер–электрод–сфера $D = 17$ и 27 мм. При этом падение напряжения пробоя по сравнению со случаем “без барьеров” заметно (см. рис. 2).

По рис. 5 видно, что при близком расположении барьеров к электроду-сфере искровой канал может идти как не касаясь диэлектрика, так и вдоль его поверхности. Можно было бы предположить, что при наличии барьера образуется некая форма лидера скользящего разряда – специфического лидерного канала, распространяющегося вдоль поверхности диэлектрика, особенностью которого является меньшее напряжение, необходимое для возникновения и развития [3]. Однако анализ фотографий показывает, что и при малых D значительная часть пробоев характеризуется полным отсутствием либо незначительной длиной “скользящих” участков искрового канала. Не наблюдается корреляции и между наличием таких участков и приложенным напряжением. Видимо, “скользящие” участки возникают из-за ограниченности свободного воздушного пространства при наличии барьеров. Можно видеть, что и в отсутствие барьеров траектория искры не соответствует кратчайшему пути между

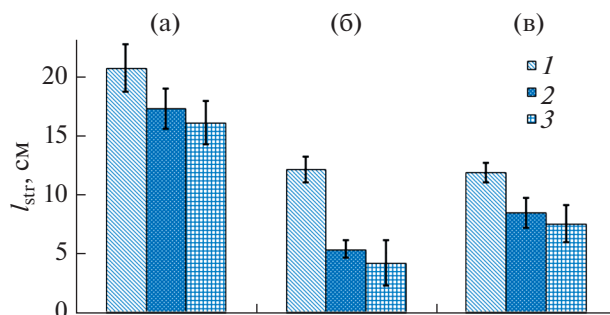


Рис. 4. Длины стримеров l_{str} без барьеров (1), с одним барьером (2), с двумя барьерами (3); расстояние электрод–барьер $D = 1.4$ см: (а) – длина всех ветвей, межэлектродное расстояние $H = 19.7$ см, напряжение $U = 115$ кВ; (б) – длина “ярких” ветвей, 19.7, 115; (в) – длина “ярких” ветвей, 25, 150.

электродами, а почти всегда отклоняется в ту или иную сторону.

Также выявлено, что наличие барьеров не влияет существенно на время между началом грозового импульса и пробоем (“время задержки пробоя”). При $H = 20$ см, $D = 17$ мм и $U = 130$ кВ время задержки пробоя составило 4.3 ± 0.3 мкс без барьеров, 4.3 ± 0.1 мкс с одним барьером и 4.4 ± 0.6 мкс с двумя барьерами. При том же межэлектродном расстоянии H , $D = 27$ мм и $U = 136$ кВ время задержки пробоя составило 3.9 ± 0.3 мкс без барьеров, 3.8 ± 0.4 мкс с одним барьером и 3.9 ± 0.4 мкс с двумя барьерами. Таким образом, статистически значимого различия между временами возникновения искры для трех случаев не наблюдается. Наличие барьеров не влияет на время между началом импульса напряжения и пробоем.

ЗАРЯД И ТОКИ, НАВЕДЕННЫЕ СТРИМЕРАМИ НА ЗАЗЕМЛЕННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Рассмотрим следующее предположение о причине уменьшения напряжения пробоя при сближении барьера и электрода: наличие барьера повышает величину переносимого стримерами заряда, или повышает проводимость стримерных каналов, вследствие чего каналы быстрее нагреваются и раньше происходит переход к искре (пробой). Чтобы проверить это предположение, при помощи осциллографа регистрировались токи, наведенные стримерами на заземленную плоскость для случаев с одним барьером и без барьеров (рис. 6). Проинтегрировав импульс тока, получаем заряд, наведенный стримерами на электрод-плоскость.

Эксперимент проводился при $H = 19.5$ см, $D = 1.8$ см, $U = 100$ кВ (возникает стримерная активность) и 115 кВ (возможны стримерная активность и пробой). Случай с двумя барьерами не

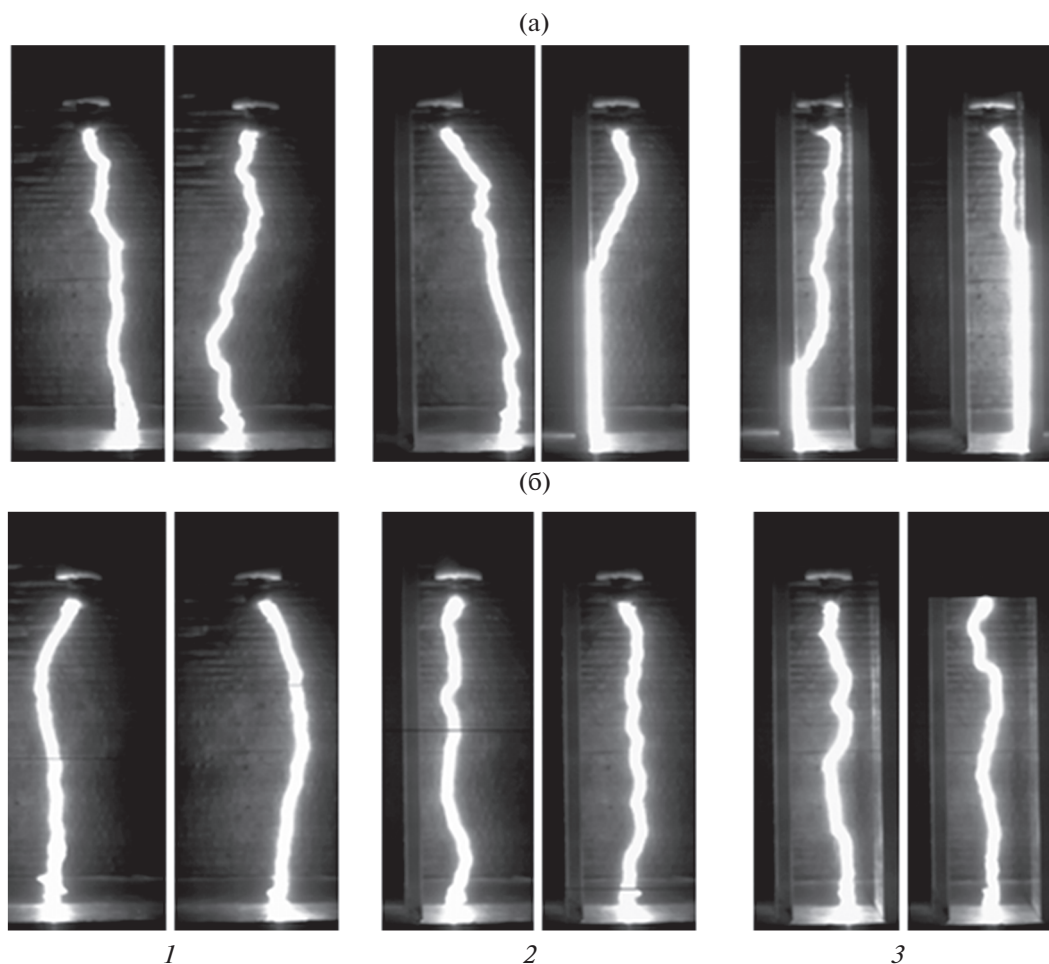


Рис. 5. Фотографии искровых каналов без барьеров (1), при одном (2) и двух (3) барьерах; межэлектродное расстояние $H = 20$ см: (а) – $U = 130$ кВ, $D = 17$ мм; (б) – 136, 27.

рассматривался, так как при этом импульсы тока, соответствующие стримерам, накладываются на пик, связанный с током смещения, что делает невозможным их выделение и обработку. При наличии одного барьера наведенный стримерами заряд меньше на 40 и 28% по сравнению со случаем без барьеров для напряжений 100 и 115 кВ соответственно.

Таким образом, наличие барьера уменьшает величину заряда, наводимого стримерами на заземленную поверхность.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что стримеры, встречая на своем пути диэлектрический барьер, передают ему свой заряд, распределяя его по поверхности [1, 2]. По мере накопления этот заряд начинает искажать электрическое поле в воздушном промежутке, что меняет условия развития стримеров. Стримеры наносят на барьер заряд того же знака, что и электрод-сфера, это снижает напряженность по-

ля между электродом-сферой и барьером. Поскольку разность потенциалов между электродами фиксирована, снижение напряженности поля в окрестности сферы ведет к ее увеличению вблизи заземленной плоскости.

Подобное перераспределение напряженности может объяснить кажущееся противоречие (снижение напряжения пробоя при сближении барьера и электрода-сферы сопровождается уменьшением длины ветвей стримеров). А именно, в окрестности сферы наличие барьера усложняет развитие стримеров, что приводит к уменьшению длины ветвей; однако в окрестности заземленной плоскости влияние барьера (искажение электрического поля накопленным на нем зарядом), напротив, интенсифицирует развитие стримеров, делая возможным пробой при меньшем напряжении.

Это объяснение согласуется с результатами работы [12], в которой рассматривается схожая конфигурация барьерной изоляции, но при наличии

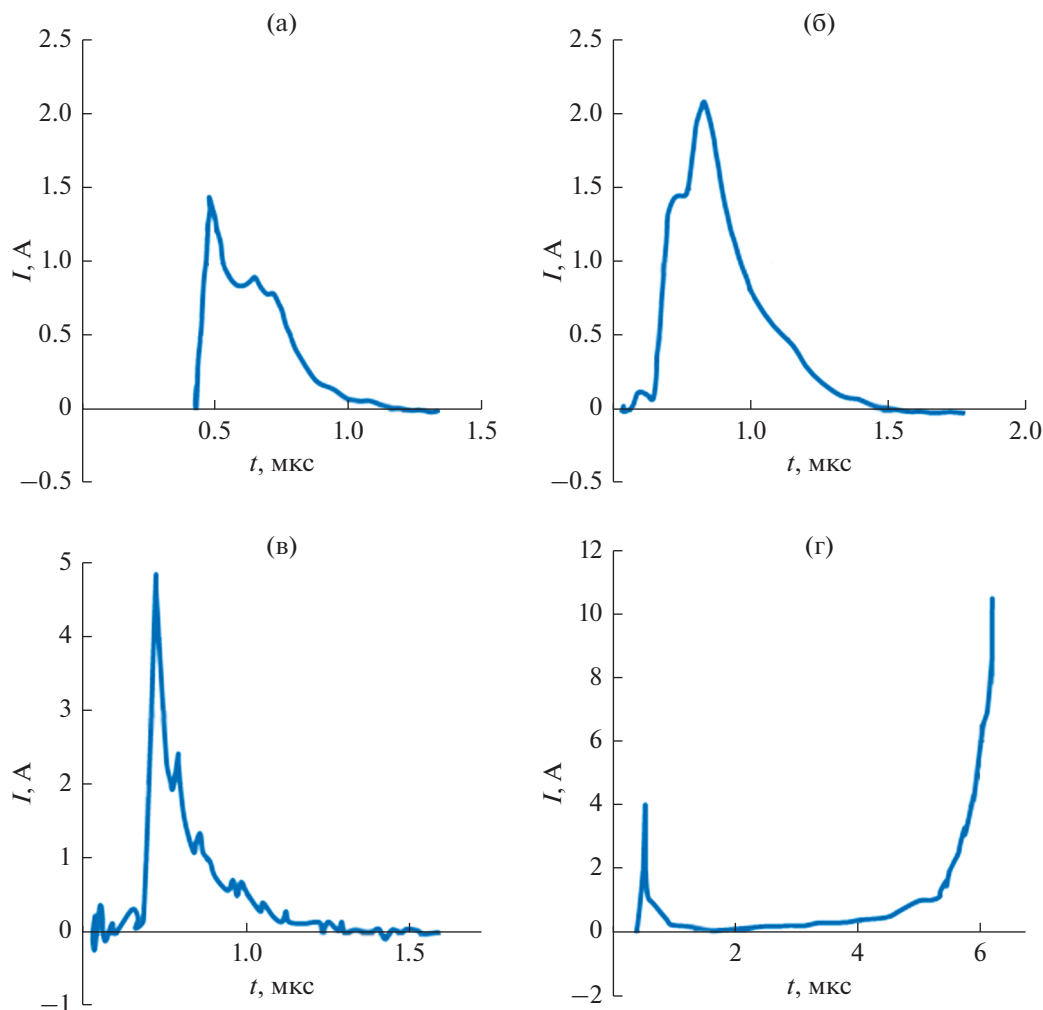


Рис. 6. Типичные осциллограммы тока при $U = 115$ кВ: (а), (б) – без барьера; (в) – один барьер; (г) – стримерный разряд и пробой.

одной диэлектрической пластины. В этой работе не рассмотрен случай, когда стримеры не достигают заземленной плоскости, поэтому нет анализа влияния наличия диэлектрических пластин на длины стримеров. Однако в [12] указано, что при наличии барьера, расположенного перпендикулярно заземленной плоскости, стримеры достигают земли (при достаточном напряжении на электроде) быстрее, чем в случае без барьера, что согласуется с выдвинутой гипотезой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие одного или двух твердых диэлектрических барьеров, расположенных вдоль пути распространения разрядной активности и перпендикулярно заземленной плоскости, влияют на характеристики стримеров и на переход к пробую. Так, по сравнению со случаем без барьеров возможно: уменьшение напряжения пробоя до 11% (и увеличение в определенном интервале рассто-

яний барьер-электрод для двух барьеров до 6%); уменьшение длины стримеров; уменьшение введенных токов стримеров. Указанные эффекты могут объясняться искажением электрического поля зарядом, наносимым стримерами на барьеры: уменьшением напряженности в окрестности активного электрода и увеличением напряженности в окрестности заземленного электрода.

Таким образом, сужение воздушных зазоров между твердыми диэлектрическими элементами изоляции способно привести к снижению напряжения пробоя.

Исследование выполнено с использованием оборудования ресурсного центра “Геомодель” научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. 3-е изд. М.: Интеллект, 2009. 736 с.

2. Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. Учеб.-метод. пособ. СПб.: ВВМ, 2012. 649 с.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
4. Прилепа К.А., Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Методы расчета пробивного напряжения воздушных промежутков в слабо- и сильнонеоднородном поле // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 693.
5. Mauseth F., Jørstad J.S. Streamer Inception and Propagation for Air Insulated Rod-Plane Gaps with Barriers // Proc. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2012. P. 732.
6. Скворцов В.В. Средняя мощность, вносимая в барьерный разряд пульсирующим электрическим током // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 9.
7. Красильников С.Ю., Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Встречные лидеры в системах с диэлектрическим барьером // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 11.
8. Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Субботский А.С., Ковалев А.Н. Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 11. С. 21.
9. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 8. С. 21.
10. Стишков Ю.К., Ковалев А.Н., Самусенко А.В., Козлов В.Б. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе // Электронная обработка материалов. 2010. № 4. С. 31.
11. Akyuz M., Gao L., Cooray V. Positive Streamer Discharges along Insulating Surfaces // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2001. V. 8. № 6. P. 902.
12. Timatkov V.V., Pietsch G.J., Saveliev A.B., Sokolova M.V., Temnikov A.G. Influence of Solid Dielectric on the Impulse Discharge Behaviour in a Needle-to-plane Air Gap // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. № 6. P. 877.
13. Trémas L., Lesaint O., Bonifaci N., Ohl B., Gentils F. Breakdown in Air along Insulating Solid Surfaces of Different Natures, Parallel or Perpendicular to the Field Direction // Proc. IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2016. 7785524.
14. Xiaobo Meng, Hongwei Mei, Liming Wang, Zhicheng Guan. Characteristics of Streamer Propagation along the Insulation Surface: Influence of Air Pressure and Humidity // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017. V. 24. № 1. P. 391.
15. Gomes C., Cooray V., Rahman M. Breakdown Characteristics and Optically Visible Discharge Paths of Surface Flashover // Proc. IEEE Conf. on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. 2012. 6408376.
16. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.