

А.Ю. Чернухин

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів формування об'ємного заряду в області вершини стрижневого блискавкоприймача. Розглянуто особливості формування стримерної корони на стрижневих блискавкоприймачах з різними конфігураціями вершини в електричному полі грозової хмари. Встановлено залежності сили струму корони від напруженості електричного поля та висоти для кожного варіанта стрижня. Показано, що при цьому часові параметри імпульсів струму стримеру змінюються не більше ніж на 30%, а заряд стримеру і, як наслідок, сила струму корони, збільшуються з ростом напруженості електричного поля. Запропоновано метод вимірювання швидкості просування стримеру. Метод базується на одночасному вимірюванні напруги та струму у розрядному проміжку. Результати пропонують врахувати при сертифікації блискавкоприймачів. Бібл. 10, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: стрижневий блискавкоприймач, імпульсна корона, напруженість електричного поля грозової хмари, струм корони, швидкість стримеру.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования объемного заряда в области вершины стержневого молниеприемника. Рассмотрены особенности формирования стримерной короны на стержневых молниеприемниках с различными конфигурациями вершины в электрическом поле грозового облака. Установлены зависимости силы тока короны от напряженности электрического поля и высоты для каждого варианта стрижня. Показано, что при этом временные параметры импульсов тока стримера меняются не более чем на 30%, а заряд стримера, и как следствие, сила тока короны увеличиваются по мере роста напряженности электрического поля. Предложено метод измерения скорости продвижения стримера. Метод основан на одновременном измерении напряжения и тока на разрядном промежутке. Результаты предлагается учесть при сертификации молниеприемников. Библ. 10, табл. 4, рис. 9.

Ключевые слова: стержневой молниеприемник, импульсная корона, напряженность электрического поля грозового облака, ток короны, скорость стримера.

Введение. Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. Требования к устройству таких систем регламентируются стандартами IEC 62305-1:2010 и IEC 62305-3:2010. В отличие от упомянутых выше систем, которые условно можно назвать «пассивными», в мире на протяжении последнего десятилетия предпринимаются попытки создания активных устройств, обеспечивающих существенное увеличение размеров зоны защиты, по сравнению с зоной защиты классического молниеприемника Франклина (далее ПСМ – пассивный стержневой молниеприемник). К числу таких устройств относятся, так называемые «Early streamer emission air terminals» (ESE), которые, по утверждению разработчиков, обеспечивают более быстрое по сравнению с ПСМ создание встречного стримера, способствующего перехвату молнии. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников прямо пропорционален времени опережения [1]. Основой такого подхода является многократно подтвержденный экспериментально факт формирования встречных лидеров с металлических объектов как заземленных так и не имеющих контакта с землей. Однако не все особенности и условия образования встречного лидера достаточно изучены. В частности, вероятность встреч канала нисходящей молнии с восходящими лидерами носит вероятностный характер. Кроме того, скорость продвижения встречного восходящего лидера зависит от потенциала головки канала молнии, который также имеет случайное значение.

На рынке также предлагаются различные варианты устройств, названных рассеивателями

(Dissipater), обеспечивающих снижение вероятности удара молнии в объект за счет создания вокруг вершины объекта объема воздуха, насыщенного заряженными частицами. Этот эффект обеспечивает снижение напряженности электрического поля над вершиной объекта, в результате чего встречный лидер возникает при больших значениях напряженности электрического поля, формируемого каналом молнии, что приводит к снижению вероятности поражения объекта молнией.

В Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ») за последние 10 лет проведены исследования более 20 типов различных образцов ESE молниеприемников и рассеивателей практически всех компаний, представленных на мировом рынке. В 2007 году были проведены сравнительные испытания ESE терминала компании ERICO (США) в лабораториях Технического университета Валенсии (Испания) и НТУ «ХПИ» (Украина). Результаты испытаний показали, что положения первой редакции (1995 года) стандарта Франции [1] не достаточные для достоверной оценки размеров защитной зоны ESE молниеприемников. В ходе обсуждения результатов было доказано [2], что необходимо внести дополнительные требования на величину дисперсии времени опережения и установить параметры эталонного ПСМ. В новой редакции (2011 г.) стандарта [1] эти рекомендации учтены.

Значительная часть научного сообщества, объединенного в рамках международной конференции ICLP (International Conference Lightning Protection)

© А.Ю. Чернухин

категорически отрицает научную обоснованность положений стандарта [1]. Основными аспектами, не имеющими должного экспериментального подтверждения, являются такие:

- оценка радиуса зоны защиты ESE молниеприемника осуществляется путем умножения времени опережения (определяемого как среднеарифметическое значение по 100 разрядам) на скорость продвижения встречного лидера с молниеприемника, которая установлена равной $10^6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Экспериментальные значения скорости, полученные с помощью скоростных видеокамер, лежат в диапазоне $(10^4 - 10^6) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

- отсутствие документально подтвержденного экспериментами большего радиуса защиты по сравнению с ПСМ. Неоднократные совместные испытания на моделирующих установках не подтверждали этого факта.

Другая часть сообщества, в которую входят в основном производители и дистрибьюторы рассматриваемых устройств, объединена в рамках Международной ассоциации молниезащиты ILPA (International Lightning Protection Association), которая проводит собственные научные симпозиумы.

Возникшее противоречие имеет не только научный аспект, но обуславливает важные проблемы практического применения новых устройств. Ошибочное определение размеров зоны защиты обуславливает снижение вероятности перехвата молнии системой молниезащиты, что может иметь негативные последствия. Тем не менее, на сегодняшний день, стандарт [1] введен в действие в ряде стран, в том числе Франции, Испании, Казахстане, Латвии, которые фактически легализовали использование ESE молниеприемников с учетом расчетной зоны защиты. Настойчивые попытки предпринимаются внедрить стандарт [3] в Украине. Сложившиеся обстоятельства побудили НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и функционирующий на его базе Технический комитет Украины по стандартизации в сфере электромагнитной совместимости (ТК 22) инициировать исследования с целью разобраться в физике сопутствующих явлений.

Основой принципа действия обоих типов новых устройств являются процессы коронного разряда с металлических стержней и игл. Поэтому, научное обоснование реальных защитных свойств таких устройств требует детального исследования физики коронного разряда в условиях нахождения изделий в электрическом поле грозового облака.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования процессов коронного разряда проводятся на протяжении многих десятилетий. Однако, они не прекращаются и по сей день. Причина заключается в том, что процессы имеют вероятностный характер, а полнота и достоверность результатов исследований в значительной мере зависит от используемых средств измерения электрофизических величин и скорости видео регистрации. Естественно, что информация, полученная в последние годы, точнее за счет качественно нового уровня упомянутой выше техники.

Принцип действия ESE терминала основан на предположении, что возникновение стримера, переходящего во встречный к каналу нисходящей молнии лидер, с такого терминала происходит ранее, чем с обычного стержневого молниеприемника [1]. Следовательно, величина времени опережения является основной технической характеристикой ESE терминала. При этом, восходящий стример возникает на фоне коронного разряда, являющегося неотъемлемой частью процесса. Поэтому, решение рассматриваемой проблемы в нашем институте начато с исследования закономерностей развития стримерной короны и перехода ее во встречный лидер [2].

В определенной степени появление короны негативно влияет на защитные свойства молниеприемника, т.к. ее наличие препятствует развитию встречного лидера. Вопросам изучения процесса коронного разряда посвящено большое число работ, в том числе [3-6]. Для зажигания короны величина напряженности электрического поля на вершине коронирующего электрода должна превышать определенное критическое значение (E_c). Впервые это значение было получено эмпирическим путем Пиком для электрода цилиндрической формы:

$$E_c = 29,8\delta \left[1 + \frac{0,3}{(\delta R)^{1/2}} \right], \quad (1)$$

где: E_c – значение критической напряженности, кВ/см; $\delta = N/N_0$; N , N_0 – плотность газа при существующих и нормальных условиях соответственно, R – радиус электрода, см.

В работе [5] представлена формула (2) для электрода сферической геометрии радиусом R

$$E_c = 27,8 \left[1 + \frac{0,54}{(R)^{1/2}} \right]. \quad (2)$$

Сравнение результатов оценки по этим формулам для электродов радиусом $R \leq 1$ см, для которых формулы справедливы, представлено в табл. 1.

Таблица 1
Значения критической напряженности электрического поля, вычисленные по формуле Пика и Базеляна [5]

R , см	0,1	0,5	1,0
E_c , кВ/см	58,5	42,6	39,0
E_c [5], кВ/см	75,1	48,9	42,8

Очевидно, что расхождение между значениями критической напряженности возрастает по мере уменьшения радиуса электрода.

В промежутках с большой степенью неоднородности электрического поля плазменная область, возникающая вследствие коронного разряда, может проникнуть в зону с низкой напряженностью только в виде тонкого канала – стримера. Когда стример попадает в область слабого поля, его скорость замедляется, он может остановиться. Такой незавершенный процесс называется импульсной или стримерной короной. Распространение продолжается до тех пор, пока напряженность электрического поля больше

минимально допустимой. Среднее значение напряженности электрического поля E_s вдоль стримерного канала при положительной полярности находится в диапазоне $450 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1} - 500 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ [3]. В работах Уотерса (Waters, 1987) и Галлимберти (Gallimberti, 1979) показано, что увеличение длины стимера L прямо пропорционально росту напряжения U_i до тех пор, пока L мало по сравнению с длиной разрядного промежутка. Коэффициент пропорциональности равен, соответственно упомянутым авторам: $0,145 \text{ см}\cdot\text{кВ}^{-1}$ и $0,152 \text{ см}\cdot\text{кВ}^{-1}$.

По мнению авторов работы [5] тупые молниеотводы более эффективны при перехвате молний, чем острые. Напротив, в работе [7] утверждается, что, меняя радиус молниеотвода в достаточно широких пределах (практически значимых), нельзя повлиять на величину и распределение объемного заряда короны в его окрестности. Это противоречие также требует экспериментальной проверки.

Граничной скоростью нарастания фронта импульса для квазистационарного режима, когда можно пренебречь изменением напряжения за время развития стримеров считается величина $50 \text{ кВ}\cdot\text{мкс}^{-1}$. Согласно формулы (2) из работы [7], следует, что для линейного роста напряженности электрического поля, ток короны нарастает линейно, а при стабилизации E_0 ток снижается во времени. Данные экспериментальных исследований [6] этот факт не подтверждают. Если крутизна фронта выше граничной, стример продвигается в течение всего времени роста напряжения на промежутке, при этом скорость его нарастает.

Сильная стримерная вспышка инжектирует в промежуток так много заряда, что поле на всем аноде падает гораздо ниже порога ионизации, в результате чего в развитии разряда наступает пауза [7]. Если напряжение на промежутке не меняется или меняется медленно, время паузы может быть большим - около времени дрейфа ионов на расстояние, сравнимое с радиусом анода (при $r_a \sim 10 \text{ см}$ и средней напряженности электрического поля $5 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$ $\Delta t \sim 10^{-3} \text{ с}$). Это явление характерно для стержня с острой конической вершиной, потому что элемент, который инжектирует заряд, имеет размер точки. Следовательно, плоская вершина стержня должна иметь преимущества при создании стабильной последовательности стримеров.

Цель статьи – исследование процессов формирования объемного заряда в области вершины стержневого молниеотвода в условиях действия электрического поля грозового облака для оценки эффективности элементов систем молниезащиты.

Результаты теоретических исследований. Очевидно, что молниеотвод, связанный с грунтом проводником имеет нулевой потенциал. При приближении грозового облака на нем наводится электрический заряд, поверхностная плотность которого обусловлена напряженностью электрического поля на вершине в области наибольшей неоднородности. При определенных условиях, описанных выше, возникает коронный разряд и стримеры, в последствии перерастающие во встречный к молнии лидер.

Быстродействие молниеотвода зависит от степени ионизации окружающего воздушного пространства. Если ионизация активная, образуется облако заряженных частиц, осложняющих прорастание встречного лидера. На этом эффекте основаны конструкции рассеивателей, представляющие собой комбинации тонких проводников. Если ионизация слабая, отсутствуют заряды, необходимые для формирования лавин. Значит, можно предположить, что существует конструкция вершины молниеотвода, которая обеспечит ток короны оптимальный для минимизации времени формирования встречного лидера. Этот факт важен для выбора эталонного образца молниеотвода, необходимость определения которого была инициирована в работе [2] и подтверждена стандартом [1].

С целью исследования начальной фазы процесса образования стационарной короны на вершине стержневого молниеотвода, выбрана математическая модель максимально приближенная к реальным условиям при проведении испытаний по стандарту [1]. Электростатическое поле образовано двумя круглыми дискообразными проводящими пластинами, диаметром 10 м каждая. Одной из пластин (верхней) присвоен потенциал 10 кВ, другая – заземлена ($U = 0$). Расстояние между пластинами модели изменяется в диапазоне от 3 м до 10 м. Значение потенциала выбрано таким из соображений уровня напряженности электрического поля $E_0 \geq 1 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$, характеризующей предгрозовую обстановку. Высота стержневого молниеотвода принята равной 2 м. Математическая модель задачи такова. В воздушном пространстве электрическое поле является потенциальным, а потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа. Граничные условия задачи заданы равенством нулю потенциала на нижней пластине и стержне; положительный потенциал 10 кВ на верхней пластине; остальные границы соответствуют условию непрерывности потенциала.

Цель моделирования – определение такого соотношения параметров стержневого молниеотвода, при котором достигается оптимальное соотношение максимальной напряженности поля около вершины и объема этой области (напряженного объема), благоприятное для стримерного процесса.

Расчет напряженности электрического поля на поверхности заостренного стержня проведен вдоль образующей конуса его вершины. Степень остроты вершины стержня характеризуется коэффициентом заостренности (k), который равен отношению высоты острия к радиусу стержня. Рассмотрены варианты, когда коэффициент принимает значения 1; 2; 3 и 4 для стержня радиусом 0,05 м. Результаты расчета напряженности электрического поля на вершине острия заостренного стержня высотой 2 м, находящегося в электрическом поле напряженностью $2 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ представлены в табл. 2. Там же даны расчетные значения коэффициента K усиления напряженности поля в рассматриваемой точке.

Таблица 2

Напряженность электрического поля на вершине острия заостренного стержня высотой 2 м

k	1	2	3	4
$E, \text{кВ}\cdot\text{м}^{-1}$	220	600	1020	1250
K	110	300	510	625

Результаты решения задачи для различных вариантов высоты стержня (в диапазоне от 1 м до 8 м), поперечного сечения (круг, квадрат, многоугольники), его размера (от 10 мм до 30 мм) и формы вершины (плоскость, острие) представлены в работе [8]. Результаты моделирования показали, что максимальное значение напряженности электрического поля на поверхности стержня увеличивается прямо пропорционально высоте стержня. В частности, для стержня квадратного сечения, эта зависимость описывается формулой (3) с погрешностью $\leq 5\%$.

$$E_m(h) = 26,7 \cdot E_0 \cdot h, \quad (3)$$

где $E_m(h)$ – максимальное значение напряженности E -поля на ребре вершины квадратного стержня с плоской вершиной, $\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$; E_0 – напряженность электрического поля, в котором размещен стержень, $\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$; h – высота стержня, м.

С целью проверки результатов, проведено сравнение с результатами расчетов, полученных другими исследователями: по формулам, приведенным в работе [4] для заземленной половины сфероиды во внешнем электрическом поле и численного метода работы [9]. Рассчитано напряженность E -поля на вершине стержня радиусом 0,05 м с вершиной в виде полусферы. Входные параметры модели таковы: $H = 5$ м, $h = 2$ м, $U = 10^4$ В. По нашим оценкам максимальное значение напряженности электрического поля на вершине стержня равно $7,2 \cdot 10^4 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$, то есть в 36 раз больше чем $E_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$. При использовании графика 10 из работы [4] для сфероиды с соотношением высоты к радиусу равным 40, коэффициент усиления определяется близко к 30. В результате численного решения в работе [9] результат близок к 35. Учитывая некоторую разницу между геометрическими фигурами, используемыми в расчетах, и не слишком точную шкалу на графике в работе [4], есть основания считать достоверными результаты применяемого нами численного метода достоверными. Иллюстрация напряженного объема вокруг стержня квадратного сечения представлена на рис. 1.



Рис. 1. Напряженный объем E -поля вокруг стержня квадратного сечения (модель повернута на 90° влево)

С целью обобщения результатов исследования процесса формирования коронного разряда со стержневых молниеприемников, проведено компьютерное моделирование на основе многофакторного плана эксперимента. В качестве функции отклика выбрано значение напряженного объема пространства вокруг вершины стержня. Напряженный объем – объем

пространства, в котором напряженность внешнего электрического поля превышает $30 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$. На основании анализа результатов экспериментальных исследований отобраны количественные и качественные факторы, которые в полной мере определяют значение функции отклика. Эти факторы таковы: напряженность электрического поля, длина стержня, форма поперечного сечения, размеры сечения, форма вершины. Априори, предположено, что уровни значимости этих факторов сопоставимы. Из опыта известно, что функция отклика имеет несколько максимумов, зависящих от формы сечения стержня. Поэтому, выбор нулевой точки модели связан с формой поперечного сечения стержня. Построенные ранее по экспериментальным данным функциональные зависимости показывают, что они являются аналитическими и позволяют задаться конкретным видом зависимости целевой функции от каждого их выбранных факторов. Это позволило ограничиться двух уровневый факторным планом типа 2^k (k – число факторов). Для обеспечения возможности проверки адекватности выбранной математической модели и правильности определения констант, использовался ненасыщенный план (число экспериментов превышает число неизвестных констант в модели). Проведен полный факторный эксперимент, на основании которого построена целевая функция отклика.

Величина напряженного объема, определяемая по установленной функциональной зависимости, сопоставлена со значением числа импульсов стримеров, полученных экспериментальным путем. Сопоставление позволило определить необходимый минимальный напряженный объем, при котором начинается процесс образования коронного разряда. Кроме того, установлено значение длины начальных стимеров, в зависимости от значений факторов эксперимента.

Основные результаты теоретических исследований таковы:

- поскольку зона повышенной напряженности локализована около ребер стержня, «напряженный объем» увеличивается с ростом периметра стержня;
- максимальное значение напряженности электрического поля и величины напряженного объема на поверхности молниеприемника, при прочих равных условиях, достигается при использовании стержня квадратного сечения с плоской вершиной. Такой стержень предлагается в качестве нового эталонного для стандарта [1].

Результаты экспериментальных исследований. При некотором значении напряженности электрического поля, в которое помещен молниеприемник, на фоне «тихой» короны, ток которой составляет не более сотен микроампер, возникают стримерные вспышки, характеризующиеся током в десятки миллиампер. Только стримерная вспышка при определенных условиях может преобразоваться в лидер. Поэтому, определение критического значения напряженности электрического поля, при котором возникают стримерные вспышки, и характер их поведения при изменении уровня напряженности электрического поля является важной задачей. Моделирование

процессов осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Для оценки быстродействия конкретного молниеприемника предлагается использовать значения параметров стримеров, которые возникают при размещении его в электрическом поле.

Чтобы выявить зависимость между параметрами стримеров и защитными свойствами молниеприемника, проведено комплекс исследований, включая определение характеристик стримеров при постоянном и импульсном напряжении. Исследования на постоянном напряжении позволяют оценить поведение молниеприемника при приближении грозового облака,

другая же часть исследований связана с изучением процесса возникновения стримеров при воздействии импульсного электрического поля, сопровождающего прорастающий канал молнии.

Исследования проведены на стержневых молниеприемниках, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4×6,5 м, верхняя – 3,6×5,2 м. Схема испытательной установки для исследования характеристик тока короны при постоянном и изменяющемся напряжении и ее внешний вид приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

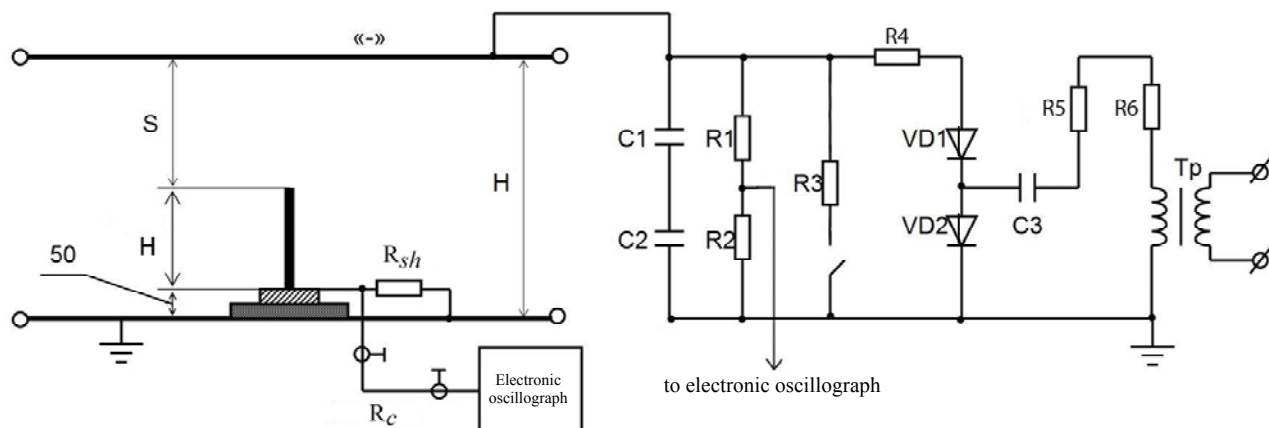


Рис. 2. Схема испытательной установки ВВС-1.2

($C1 = 0,381 \text{ мкФ}$; $C2 = 0,385 \text{ мкФ}$; $C3 = 0,4 \text{ мкФ}$; $R1 = 300 \text{ МОм}$; $R2 = 30 \text{ кОм}$; $R3 = 60 \text{ кОм}$; $R4 = 510 \text{ кОм}$; $R5, R6 = 60 \text{ кОм}$; $R_{sh} = 75 \text{ Ом}$; $R_c = 75 \text{ Ом}$; T_p – трансформатор ИОМ 100/25)



Рис. 3. Внешний вид испытательной установки ВВС-1.2

В данном варианте нижняя плоскость заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подается высокое напряжение отрицательной полярности. Расстояние (S) между вершиной стержня и потенциальным верхним электродом варьировалось в диапазоне от 2,5 м до 0,5 м

При этом, начальное значение напряженности электрического поля в промежутке не изменялось. Результаты экспериментальных исследований подробно представлены в работах [6-8]. Обобщение этих результатов позволяет сделать следующие выводы. Типовая осциллограмма силы тока одиночного стримера представлена на рис. 4. Заряд, содержащийся в стримере примерно $5,85 \cdot 10^{-9}$ Кл. Для сравнения, в работе [5] измерение заряда стримера альтернативным методом дало среднее значение $5 \cdot 10^{-10}$ Кл. Учитывая различие конфигураций вершин стержней и высот стержней совпадение результатов удовлетворительное.

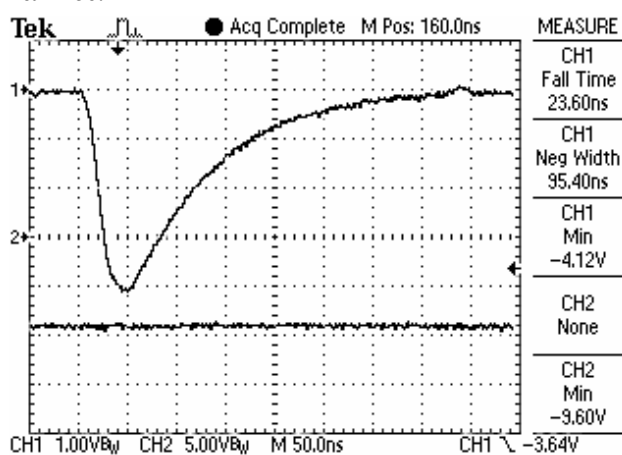


Рис. 4. Осциллограмма единичного стримера со стержня квадратного сечения 12×12 мм² высотой стержня 1,7 м, находящего в электрическом поле напряженностью $30 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ (сигнал снят с резистора номиналом 75 Ом, заряд в импульсе $58,5 \cdot 10^{-10}$ Кл)

Зависимости среднего арифметического числа стримерных вспышек от напряженности электрического поля для заостренного и квадратного стержней представлены на рис. 5.

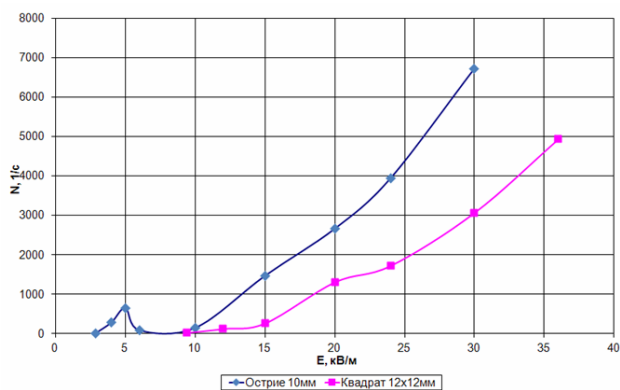


Рис. 5. Зависимость частоты следования стримеров с заостренного (диаметр 10 мм, коэффициент заостренности $k = 3$) и квадратного (12×12 мм²) стержней от напряженности электрического поля. Длина каждого стержня 3,4 м

Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в табл. 3 и 4 для заостренного и квадратного стержней соответственно. Следует отметить, что временные параметры (форма) тока единичного стримера для всех рассмотренных случаев изменяются в пределах $\pm 30 \%$ от средне арифметических значений. Существенные изменения наблюдаются только для пикового значения импульса, следовательно, величины заряда стримера. При каждом напряжении было произведено не менее 50 измерений. Представленные в таблицах значения среднеквадратичного отклонения (СКО), однозначно показывают существенно меньший разброс значений для стержня квадратного сечения по сравнению со стержнем с заостренной вершиной. Это свойство характерно для стержня любой длины в рассмотренных пределах. Не случайно, стержни квадратного сечения определены в качестве элементов разрядного промежутка для эталона величины высокого напряжения (стандарт IEC 60062).

Таблица 3

Результаты измерения частоты следования стримеров для заостренного стержня круглого сечения (диаметр 10 мм, коэффициент заостренности $k = 3$, высота 3,4 м)

U_0 , кВ	E_0 , $\text{кВ} \cdot \text{м}^{-1}$	Число стримеров в секунду, N	СКО
14,5	2,9	9,16	1,31
20	4	276	7,02
25	5	636	12,58
30	6	78	15,97
50	10	136,6	59,53
75	15	1460	145,60
100	20	2656	322,20
120	24	3940	523,70

Из представленных результатов видно, что у стержня с заостренной вершиной есть «мертвая» зона (в диапазоне от $6 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ до $10 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$). Эффект обуславливается точечным характером коронирующего элемента. Наличие такого эффекта объясняет упомянутое выше мнение авторов работы [5], что тупые молниеотводы более эффективны при перехвате молний, чем острые. Важно отметить, что для стержня квадратного сечения такой эффект не наблюдается.

Таблица 4

Результаты измерений частоты следования стримеров для квадратного стержня (12×12 мм², высота 3,4 м)

U_0 , кВ	E_0 , $\text{кВ} \cdot \text{м}^{-1}$	Число стримеров в секунду, N	СКО
47	9,4	14,7	1,40
60	12	116	4,81
75	15	258	4,74
100	20	1302	20,54
120	24	1720	23,85
150	30	3064	32,77
180	36	4930	93,15

Зависимость величина силы тока коронного разряда от напряженности электрического поля, для описанных выше стержней, представлена рис. 6. Из рис. 6 видно, что при напряженности электрического поля большей $15 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ сила тока с квадратного стержня

больше, чем с заостренного, не смотря на то, что число стримеров с заостренного стержня примерно в 2 раза больше (см. рис. 5). Причина такого факта обуславливается большим зарядом каждого стримера со стержня квадратного сечения.

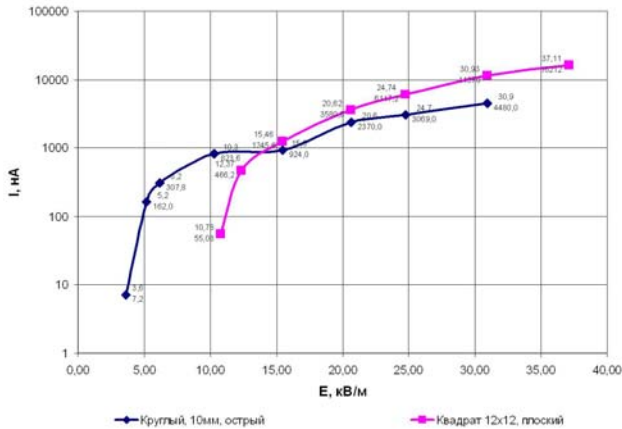


Рис. 6. Зависимость силы тока короны от напряженности электрического поля для заостренного (диаметр 10 мм, коэффициент заостренности $k = 3$) и квадратного стержней. Длина каждого стержня 3,4 м

Из представленных экспериментальных результатов следуют такие выводы:

- заостренный стержень (диаметр 10 мм, $k = 3$, высота 3,4 м) начинает реагировать с напряженности электрического поля $3 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$, а стержень квадратного сечения ($12\times 12 \text{ мм}^2$) той же высоты не ранее чем с $9 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$;

- коронный разряд с заостренного стержня в диапазоне напряженности E -поля от $6 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ до $10 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ прекращается, что в полной мере соответствует процитированному выше во введении результатам работы [5];

- при напряженности E -поля, превышающей $10 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ число стримеров с заостренного стержня примерно вдвое больше, чем с квадратного;

- среднее пиковое значение силы тока отдельного стримера выше для квадратного стержня, например, при напряженности $E \approx 10 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ это значение составляет 5 мА для заостренного стержня и 60 мА для квадратного стержня;

- значение среднеквадратичного отклонения, при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня меньше, чем для случая заостренного стержня.

Альтернативный метод измерения скорости стримера. Традиционным методом измерения скорости стримеров-лидеров является сверхскоростная видеосъемка. Для реализации этого метода требуется наличие сверхскоростной видеокамеры, например, типа FASTCAM SAS (с опцией до 10^6 кадров в секунду) и специального режима освещенности исследуемого разрядного промежутка. Ограничением реализации этого метода является не только высокая стоимость камеры, но и фиксированный сектор обзора, что затрудняет эффективное использование метода при исследовании длинных (более 3 м) разрядных промежутков.

Важным параметром предразрядных процессов есть скорость встречного стримера, формирующегося с заземленного объекта. Чем выше усредненное значение скорости, тем выше вероятность попадания молнии в объект. Известно [10], что скорость стримера зависит от напряженности электрического поля в разрядном промежутке. Так, в области, где напряженность E поля превышает $3\cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$, скорость стримера может достигать 10^7 м/с . Однако, такая напряженность, а, следовательно, и скорость, возможны только в стримерной зоне головки лидера молнии. В работе [10] указано, что измеренная средняя скорость лидера $3,36\cdot 10^5 \text{ м/с}$, минимальная – $8\cdot 10^4 \text{ м/с}$, а максимальная – $2,6\cdot 10^6 \text{ м/с}$. Доказано, что существует минимальная скорость стримера, равная в воздухе при нормальных условиях 10^3 м/с . При меньших значениях стример останавливается. Следовательно, диапазон изменения исследуемого параметра (скорости стримера-лидера) составляет более четырех порядков.

Известно [10], что волна ионизации формируется с вершины стержня и распространяется в межэлектродном промежутке по направлению к противоположному электроду. Как правило, в воздушных промежутках длиной до 5 м (характерных для большинства лабораторных условий), стример - лидер имеет одноканальную структуру без значительных ветвлений. Вокруг канала стримера формируется слабо проводящий чехол. Принятая в рамках модели стримера базируется на следующих допущениях:

- канал критического стримера одиночный (не ветвящийся);
- диаметр канала с учетом чехла постоянный;
- плотность зарядов в канале однородная.

При этих допущениях, длина стримера прямо пропорциональна заряду в канале (с учетом чехла). Интегральная величина заряда в канале пропорциональна току стримера и времени по формуле (4). Фактически, это площадь под кривой $I(t)$, представленной на осциллограмме (рис. 7)

$$Q = \int_0^T I(t) dt, \quad (4)$$

где Q – величина заряда в канале; T – время протекания процесса, $I(t)$ – зависимость силы тока от времени с начала процесса.

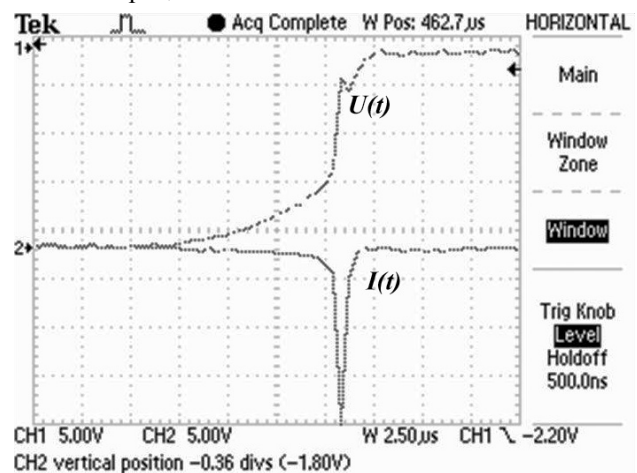


Рис. 7. Осциллограмма процесса распространения критического стримера

Обозначим длину канала стримера L_k . Очевидно, что в момент касания противоположного электрода L_k равна длине воздушного промежутка L , а заряд стримера имеет значение Q . Этот момент фиксируется по резкому провалу напряжения $U(t)$, приложенного к воздушному промежутку.

Следует отметить, что момент замыкания промежутка стримером нельзя определять по максимуму тока стримера, поскольку, максимальное значение силы тока достигается после замыкания промежутка и определяется величиной разрядного напряжения в разрядном контуре.

Следовательно, результат эксперимента дает такие исходные данные:

- общий заряд канала (Q);
- интервал времени (T), в течение которого стример пересек воздушный промежуток;
- длина воздушного промежутка (L).

По этим данным можно легко определить значение средней на промежутке скорости стримера по очевидной формуле (5).

$$V_A = LT^{-1}. \quad (5)$$

Для оценки мгновенных значений скорости стримера в различных точках пространства воздушного промежутка, воспользуемся указанными выше предположениями о характере распространения стримера. Канал стримера, в виде цилиндра длиной L , определенного радиуса (значение которого для рассматриваемой задачи не существенно) разбивается на N равновеликих частей. На каждом n -том участке величина заряда (Q_n) оценивается по формуле (6).

$$Q_n = Q/N. \quad (6)$$

Дальнейшие действия иллюстрирует рис. 8, на котором изображена типовая кривая $I(t)$ в увеличенном масштабе. Определяется площадь под кривой $I(t)$, дающая величину заряда Q . Эта площадь разбивается на N равновеликих частей. Алгоритм разбиения для некоторых частных случаев будет представлен далее. Отыскиваются соответствующие значения t_k . Скорость стримера (V_n) на любом, сколь угодно малом, участке определяется по формуле (7).

$$V_n = L(N \cdot \Delta t_n)^{-1}, \quad (7)$$

где Δt_n – величина n -ного интервала времени.

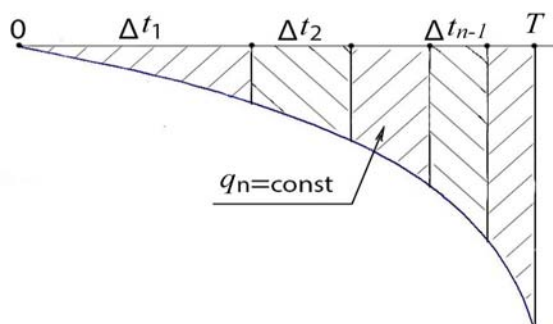


Рис. 8. Принцип разбиения площади под кривой

Результаты расчетной оценки. Рассмотрим частные случаи функциональной зависимости силы тока стримера от времени распространения. Если сила тока не зависит от времени, то стример распространяется

с постоянной скоростью. Такой вариант носит гипотетический характер, поскольку в экспериментах не наблюдается.

В качестве первого приближения, кривую зависимости $I(t)$ можно аппроксимировать прямой, проходящей под определенным углом наклона (k). В этом случае, функциональная зависимость силы тока от времени описывается формулой (8)

$$I(t) = k \cdot t. \quad (8)$$

После подстановки (8) в формулу (4), для общего заряда стримера получим (9)

$$Q = 0,5k \cdot T^2. \quad (9)$$

Момент времени (t_1) прохождения стримером первого отрезка (совпадает с интервалом времени) отыскивается по формуле (10)

$$t_1 = \frac{T}{\sqrt{N}}. \quad (10)$$

Для вычисления последующих значений t_n несложно получить рекуррентную формулу (11)

$$t_n^2 = \left(\frac{T^2}{N}\right) + t_{n-1}^2. \quad (11)$$

Характер кривой на осциллограмме (рис. 7, нижняя кривая) более точно можно описать экспоненциальной зависимостью. При этом, удобнее рассматривать зависимость в варианте инверсного времени, без учета знака, что позволяет ввести функцию (12):

$$I(t) = \exp(-\alpha \cdot t), \quad (12)$$

где α – коэффициент, определяющий скорость затухания функции.

Максимальное значение силы тока положим равным единице, поскольку его абсолютное значение не влияет на дальнейшие результаты. По кривой $I(t)$ без труда определяется значение параметра α . Для этого достаточно найти момент времени (t_e) при котором ток достигает значение 0,368. Параметр $\alpha = t_e^{-1}$.

Рекуррентное соотношение для отыскания значений времени (t_n) по предыдущему значению (t_{n-1}), описывается формулой (13).

$$t_n = -\left(\frac{1}{\alpha}\right) \cdot \left[\exp(-\alpha t_{n-1}) - \left(\frac{1}{N}(1 - \exp(-\alpha T))\right) \right]. \quad (13)$$

Это соотношение позволяет легко отыскать все значения t_n с любой заданной точностью, определяемой числом разбиений N . Следует еще раз указать, что в этом случае отсчет отрезков времени осуществляется от максимума силы тока к началу.

В представленном на рис. 7 примере, расстояние от вершины молниеприемника до верхнего потенциального электрода составляло 1,2 м. Время развития процесса прорастания стримера, определяемое как интервал от точки расхождения кривых до момента резкого уменьшения напряжения, составляет 9 мкс. Выбрано число интервалов равное 10. Значения соответствующих интервалов времени, рассчитаны с использованием формулы (13). На основании полученных данных, учитывая, что каждый отрезок длины стримера равен 0,12 м, найдена пространственная зависимость скорости, представленная графиком на рис. 9.

В рассмотренном примере скорость стримера изменялась от $1,8 \cdot 10^4$ м/с до $1,1 \cdot 10^6$ м/с. Среднее значение скорости стримера на воздушном промежутке составляет $1,3 \cdot 10^5$ м/с. Рассчитанные значения скорости стримера хорошо согласуются с данными, полученными другими методами [10].

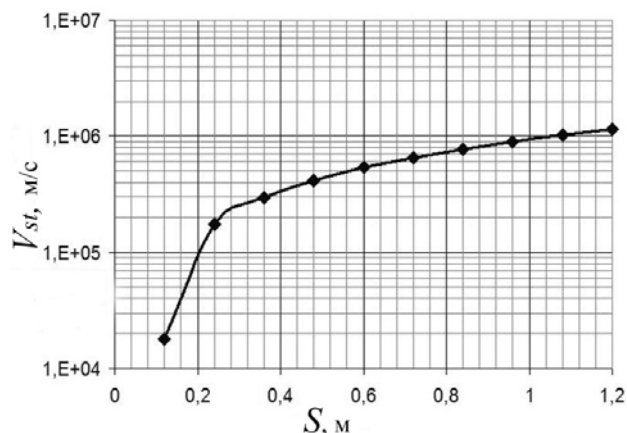


Рис. 9. График изменения скорости стримера от пройденного пути

Предложенный алгоритм можно описать так:

- определяется интегральное значение заряда Q (площадь под кривой зависимости $I(t)$);
- выбирается число разбиений, из соображений достаточной точности;
- отыскиваются значения интервалов времени, для которых площади под кривой равновеликие и равны N -ой части Q ;
- скорость на конкретном пространственном промежутке определяется как частное от деления длины промежутка на время его пересечения.

Метод может дополнить процедуру аттестации молниеприемников по стандарту [1].

Выводы. Экспериментально определены функциональные зависимости частоты следования стримеров с металлических стержней длиной 3,4 м круглого сечения с заостренной вершиной и квадратного сечения с плоской вершиной.

Установлено, что частота следования стримеров для случая стержня квадратного сечения имеет детерминированный характер: с ростом напряженности электрического поля частота следования монотонно возрастает с коэффициентом близким к $0,25 \text{ с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}$.

Значение СКО, при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня в несколько раз меньше, чем для случая заостренного стержня.

Установлено, что коронный разряд с заостренного стержня в диапазоне напряженности электрического поля от 6 кВ/м до 10 кВ/м прекращается, а частота следования с ростом напряженности достигает 6 кГц.

На основании полученных результатов исследования особенностей процесса формирования стримерной короны с вершины стержневого молниеприемника высотой более 1 м предлагается принять в качестве эталонного молниеприемника для проведения испытаний ESE терминалов в соответствии со стандартом [1] стержень квадратного сечения ($12 \times 12 \text{ мм}^2$) с плоской вершиной высотой 1 м.

Сертификацию молниеприемников ESE типа рекомендуется начинать со сравнительных испытаний со стандартным молниеприемником, путем размещения их обоих в рабочем объеме испытательного стенда и регистрации частоты разрядов в каждый из них при подаче на промежуток коммутационного импульса напряжения с длительностью фронта более 100 мкс.

Предложен метод оценки скорости продвижения критического стримера, основанный на синхронном измерении напряжения на разрядном промежутке и силы тока стримера с молниеприемника.

На основании совокупности полученных результатов, рекомендуется стандарт [1] не внедрять в качестве национального стандарта Украины до полного введения в требования стандарта научно обоснованных данных.

Результаты получены в рамках выполнения научно-исследовательской работы (ГР №0115U000611), которая выполнялась по заказу Министерства образования и науки Украины в 2015-2016 годах.

Автор благодарит П.Н. Мельникова и С.П. Шамова за помощь при проведении экспериментальных и теоретических исследований, а научного руководителя В.В. Князева – за ценные рекомендации и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NF C 17-102:2011 (Ed.2) Protection contre la foudre – Systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage. Union Technique de l'Electricité (UTE), 2011. 82 p.
2. Князев В.В., Лесной И.П., Чернухин А.Ю. Результаты исследования параметров активных молниеприемников и рассеивателей // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – №21. – С. 78-87.
3. Ortéga P., Heilbronner F., Rühling F., Diaz R., Rodière M. Charge-voltage relationship of the first impulse corona in long air gaps // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2005. – vol.38. – no.13. – pp. 2215-2226. doi: 10.1088/0022-3727/38/13/021.
4. Moore C.B., Rison W., Mathis J., Aulich G. Lightning rod improvement studies // Journal of Applied Meteorology. – 2000. vol.39. – no.5. – pp. 593-609. doi: 10.1175/1520-0450-39.5.593.
5. Базелян Э.М. Эффект объемного заряда короны в молниезащите // Труды IV Российской конференции по молниезащите. НПО «Стример»: Санкт-Петербург, 2014. – С. 1-16.
6. Чернухин А.Ю. Результаты измерения параметров импульсной короны со стержневых молниеприемников // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №50. – С. 155-160.
7. Чернухин А.Ю., Князев В.В. Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – №20. – С. 149-155.
8. Князев В.В., Чернухин А.Ю. Эффекты коронирования в условиях предразрядной обстановки // Труды IV Российской конференции по молниезащите. НПО «Стример»: Санкт-Петербург, 2014. – С. 62-70.
9. Резинкина М.М. Моделирование электрических полей при наличии стержней со скругленными вершинами // Журнал технической физики. – 2015. – Т.85. – №3. – С. 21-27. doi: 10.1134/S1063784215030238.
10. Lightning Protection / Edited by Vernon Cooray // Ins.Eng.Tech., London, UK. 2010. – 1070 p.

REFERENCES

1. NF C 17-102:2011 (Ed.2) Protection contre la foudre – Systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage. Union Technique de l'Electricité (UTE), 2011. 82 p.

2. Kniazev V.V., Lesnoi I.P., Chernukhin A.Iu. Investigation results of the ESE-terminal and dissipaters' parameters. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2008, no.21, pp. 78-87. (Rus).
3. Ortéga P., Heilbronner F., Rühling F., Díaz R., Rodière M. Charge-voltage relationship of the first impulse corona in long air gaps. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, vol.38, no.13, pp. 2215-2226. doi: 10.1088/0022-3727/38/13/021.
4. Moore C.B., Rison W., Mathis J., Aulich G. Lightning rod improvement studies. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, vol.39, no.5, pp. 593-609. doi: 10.1175/1520-0450-39.5.593.
5. Bazelian E.M. The effect of the space charge of the corona in lightning protection. *Trudy IV Rossiiskoi konferentsii po molnieszashchite* [Proceedings of the IV Russian Conference on Lightning Protection]. NPO «Strimer», Sankt-Peterburg, 2014, pp. 1-16. (Rus).
6. Chernukhin A.Iu. Parameters of pulse corona on metal rods in strength electric field. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50, pp. 155-160. (Rus).
7. Chernukhin A.Iu., Kniazev V.V. A features of streamer crown are from cored air terminals. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20, pp. 149-155. (Rus).
8. Kniazev V.V., Chernukhin A.Iu. Effects of corona in pre-discharge conditions. *Trudy IV Rossiiskoi konferentsii po molnieszashchite* [Proceedings of the IV Russian Conference on Lightning Protection]. NPO «Strimer», Sankt-Peterburg, 2014, pp.62-70. (Rus).
9. Rezinkina M.M. Simulation of electric fields in the presence of rods with rounded upper ends. *Technical Physics*, 2015, vol.60, no.3, pp. 337-343. doi: 10.1134/S1063784215030238.
10. Vernon Cooray. *Lightning Protection*. Ins.Eng.Tech., London, UK, 2010. 1070 p.

Поступила (received) 24.04.2017

Чернукhin Александр Юрьевич, м.н.с.,
 НИПКИ «Молния»
 Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
 тел/phone +38 057 7076292, e-mail: chernukhin@yahoo.com

A.Yu. Chernukhin

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

Influence of coronary discharge parameters on the efficiency of lightning protection system elements.

Purpose. Investigation of the formation of space charge in the region of the apex of lightning rod, under the action of the electric field of a thunderstorm cloud, to evaluate the efficiency of elements of lightning protection systems. **Methodology.** We have applied the mathematical simulation of electromagnetic field distribution on the top of metal rod by different forms. As a mathematical apparatus, we use the finite element method. We considered two forms of the rod section: round and square. The round (cylindrical) rod has a sharp apex. The square rod has a flat top. The experimental study investigates the features of corona discharge formation. A high-voltage test equipment is created an electric field. Experiments carried out using a configuration consisting a potential plate and vertical rod electrode on grounded plate. The electric field strength varied from 1 kV/m^{-1} to 100 kV/m^{-1} . This range corresponds to the thunderstorm condition. **Results.** We have obtained a correlation between the corona current and the strength of the electric field for various shapes of the rod top. The results of experimental studies confirmed the correctness of the conclusions of theoretical estimates. We show that the time parameters of streamer current pulses vary by no more than 30%, but a streamer charge increase to three time with increasing electric field strength. We proposed and applied a method for measuring the velocity of motion of a streamer in the discharge gap. As a result, it is established that the streamer speed is nonlinear in time. For a discharge gap of 1.2 m, the speed varies from $1.8 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ to $1.1 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. **Originality.** For the first time, we have carried out a complex of studies of corona discharge parameters from lightning protector rod to apply for the certification procedure of ESE terminals. **Practical value.** Based on the set of obtained results, it is obviously that the standard NF C 17-102:2011 will not be introduced as a national standard of Ukraine before full introduction of scientifically justified data will be include into the requirements of the standard. References 10, tables 4, figures 9.

Key words: rod lightning terminal, pulse corona, electric field intensity of thunderstorm cloud, corona current, streamer speed.