

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, зав.отд., НТУ «ХПИ»;

**П.Н.МЕЛЬНИКОВ**, науч.сотр., НТУ «ХПИ»;

**А.Ю.ЧЕРНУХИН**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ НА МОЛНИЕПРИЕМНИКАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ВЕРШИН И ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ**

У роботі представлені результати експериментального дослідження процесу виникнення стримерних спалахів зі стержнів, що мають різні характеристики. Визначені значення критичної напруженості електричного поля, при якій виникають стримерні спалахи. Встановлено, що мінімальне значення критичної напруженості електричного поля характерне для квадратного стержня із стороною 12 мм. Такий стержень рекомендується якості зразкового при проведенні атестації блискавоприймачів.

The results of experimental research of the process of streamer flashes origin from the bars having different characteristics are presented in this paper. The values of critical tension of electric-field, there are streamer flashes at that, are certain. It is set that the minimum value of critical tension of electric-field is characteristic for a square bar with a side 12 mm. Such bar is recommended as a standard one during realization of air terminal attestation.

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса возникновения стримерных вспышек со стержней, имеющих различные характеристики. Определены значения критической напряженности электрического поля, при которой возникают стримерные вспышки. Установлено, что минимальное значение критической напряженности электрического поля характерно для квадратного стержня со стороной 12 мм. Такой стержень рекомендуется в качестве образцового при проведении аттестации молниеприемников.

### **Введение**

Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. В Украине требования к таким системам регламентируются стандартом ДСТУ Б В.2.5-38:2008 [1], который введен в действие с 01.01.2009, в замен руководящего документа РД 34.21.122-87 [2]. К сожалению, стандарт [1] не отражает в полной мере современные достижения в этой области, изложенные в группе стандартов Международной электротехнической комиссии IEC 62305:2011 [3-6].

В отличие от упомянутых выше систем, которые условно можно назвать «пассивными», в мире предпринимаются настойчивые попытки создания «активных» устройств, обеспечивающих существенное увеличение размеров зоны защиты, по сравнению с зоной защиты классического стержневого молниеприемника Франклина (СМ). Принцип действия таких устройств основан на концепции ускоренного создания стримера, встречного к каналу

молнии. Эти устройства названы «Early streamer emission air terminals» (ESE молниеприемники). Правила проектирования систем молниезащиты, в которых используются ESE молниеприемники, регламентируются стандартом Франции [7]. Этот стандарт имплементирован рядом Европейских стран, в том числе Испанией, Болгарией, Латвией. Основные элементы учета защитных свойств ESE молниеприемников включены в соответствующую инструкцию в Казахстане [8]. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников прямо пропорционален времени опережения, и определяется по следующей формуле [7]:

$$R = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)},$$

где  $R$  – радиус зоны защиты, м;  $h$  – высота вершины молниеприемника,  $h > 5$  м;  $D$  – расстояние поражения (20, 45, 60 м);  $\Delta L = V \cdot \Delta T$ ;  $\Delta T$  – время опережения, мкс;  $V = 1$  м/мкс – средняя скорость встречного стримера.

Методика определения времени опережения регламентируется стандартом Франции NF C 17-102: 1995 [7]. Поскольку этот стандарт не является легко доступным, с основными положениями методики можно познакомиться в работах [9, 10].

Однако, эта методика не получила всеобщего признания, поскольку, физические принципы и численные значения величин, положенные в основу стандарта Франции, вызывают критику со стороны значительной части ученых, работающих в области высоких напряжений. Основные возражения, которые отмечают противники стандарта, следующие:

- нет научного обоснования экстраполяции результатов лабораторных испытаний на реальные условия;
- скорость восходящего лидера по мере удлинения канала увеличивается от 0,12 м/мкс до 0,65 м/мкс, но не достигает значения 1 м/мкс;
- скорость стримера может превышать значение 1 м/мкс, однако, стример не может прорасти на десятки метров.
- не приведены аргументы в пользу выбранного значения стандартизованной длительности фронта импульса 650 мкс;
- начальные коронные процессы практически не влияют на значение разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках;
- нет научно организованных натуральных испытаний, подтверждающих правоту сторонников ESE.

Не смотря на сопротивление научной общественности, ESE молниеприемники широко используются во всем мире при создании систем молниезащиты. Безусловно, на сегодняшний день, это, в значительной мере, обуславливается стремлением людей к новизне, и желанием иметь красивое, пусть и дорогое, устройство, а не частокол из металлических стержней и тросов. В результате, возникло очевидное противоречие. Поэтому, научное обоснование физических основ действия ESE молниеприемников или доказательство их малой эффективности, является актуальной задачей.

Следует отметить, что разработчики стандарта [7] внимательно отслеживают новые идеи, которые могут повысить достоверность оценки защитных свойств ESE молниеприемников. Например, в работе [10], была обоснована необходимость оценки не только среднего значения времени опережения, но и дисперсии кривой распределения. В новой редакции стандарта [7], вышедшей в 2011 г., уже введена такая норма. Также, в новой редакции стандарта указывается, что время опережения, которое может приниматься в расчетах, не должно превышать 60 мкс.

Авторы настоящей статьи предлагают при классификации молниеприемников дополнительно использовать значения следующих параметров тока стримерной короны:

- критическое значение напряженности постоянного электрического поля ( $E_{кр}$ ) при котором возникают стримерные вспышки;
- пиковое значение тока стримерной короны ( $I_k$ ), который стекает с молниеприемника, при размещении его на штатной высоте в электро-статическом поле грозового облака при выбранном значении напряженности поля;
- величина заряда ( $Q_m$ ), который стекает с молниеприемника, при подаче на него импульсного напряжения, характеристики которого зависят от усредненных параметров прорастающего лидера молнии.

Предлагается отыскать закономерности между значениями этих параметров и напряжением пробоя длинного воздушного промежутка.

В рамках данной статьи, представлены результаты исследования влияния формы стержня, его поперечного размера и геометрии вершины на критическое значение напряженности постоянного электрического поля  $E_{кр}$  при которой возникает стримерная вспышка.

### **Методика исследований**

При приближении грозового облака, за счет сопутствующего электрического поля, на молниеприемнике индуцируется электрический заряд, что обуславливает повышение напряженности поля на конце молниеприемника и появление коронного разряда. При некотором значении напряженности электрического поля на фоне «тихой» короны, ток которой составляет не более сотен микроампер, возникают стримерные вспышки, которые характеризуются 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, является важным параметром исследуемой задачи. Моделирование этого процесса осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

Исследования проведены на стержневых молниеприемниках, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 x 6,56 м, верхняя – 3,63 x 5,22 м. Схема ис-

пытательного комплекса при проведении измерений тока короны приведена на рис. 1.

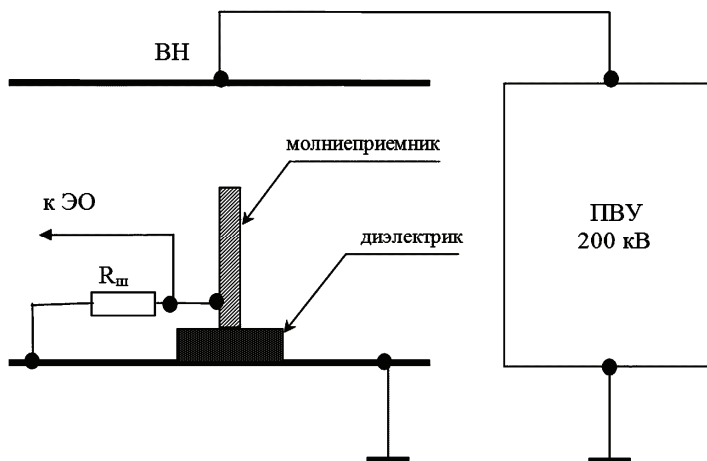


Рисунок 1 – Схема испытательного комплекса

Таблица 1 – Характеристики стержневых молниеприемников

№ стержня	Наименование	Материал	Размеры поперечного сечения, мм	Вершина стержня
1	квадрат	сталь	12	плоская
2	квадрат	сталь	16	плоская
3	шестигранник	сталь	12	плоская
4	шестигранник	сталь	19	плоская
5	круг	сталь	Ø12	плоская
6	круг	сталь	Ø22	плоская
7	круг	Д16	Ø10	плоская
8	круг	Д16	Ø20	плоская
9	круг	Д16	Ø10	конус
10	круг	Д16	Ø20	конус

В процессе испытаний нижняя плоскость была заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подавалось высокое напряжение (ВН) обеих полярностей от ПВУ-200. Расстояние между плоскостями (Н) 2,20 м. Величина воздушного промежутка между вершиной стержня и верхней, потенциальной, плоскостью 1,30 м.

Стержневые молниеприемники имели одинаковую длину 0,75 м, и размещались на изолирующей подставке. Ток в цепи регистрировался при помощи резистивного шунта ( $R_{ш}$ ) 50 Ом и электронного осциллографа

ТЕКТРОНИХ TDS 1012 (ЭО), соединенных коаксиальным радиочастотным кабелем типа РК-50 длиной 30 м.

Исследования проведены на десяти вариантах стержней, отличающихся формой сечения, размерами и формой вершины. Варьируемые характеристики стержневых молниеприемников представлены в табл. 1.

При плавном поднятии напряжения фиксировался момент появления импульса стримерной вспышки на экране осциллографа. Чувствительность измерительной системы позволяла регистрировать сигнал, уровень которого превышает 5 мВ, что соответствует величине силы тока более 0,1 мА. В качестве примеров, на рисунках 2 и 3 представлены осциллограммы характерных всплесков тока короны (стримерных вспышек) для молниеприемника №5 круглого сечения диаметром 12 мм, с плоской вершиной. Корона возникла при напряжении 92 кВ, амплитуда единичного всплеска составляет 46,5 мА.

На рис. 2, а представлен единичный стример, а на рис. 2, б осциллограмма последовательности стримеров в течении 1 с при критическом значении напряжения. На рис. 3, а представлена осциллограмма сканирования за 1 с при напряжении 100 кВ, и на рис. 3, б осциллограмма сканирования за 1 с при напряжении 140 кВ.

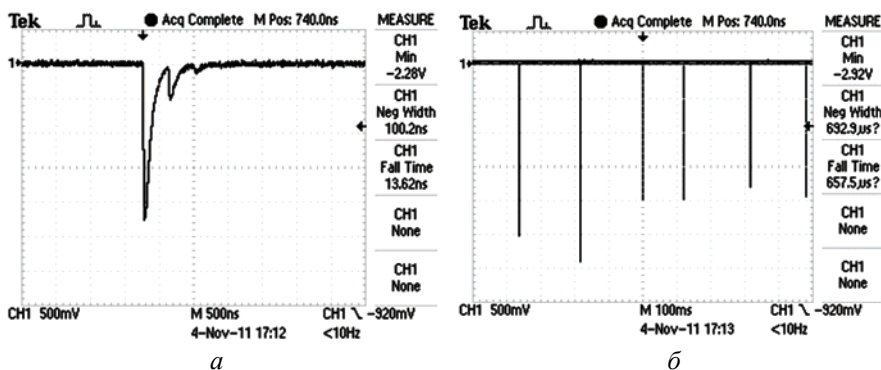


Рисунок 2 – Характерные осциллограммы стримерных вспышек

Аналогичные осциллограммы были получены для всех образцов молниеприемников, указанных в табл. 1. Результаты измерений для варианта отрицательной полярности потенциального полеобразующего электрода представлены в табл. 2.

Анализ представленных в таблице 2 результатов показывает, что для стержней с конусообразной вершиной возникновение стримерных вспышек наблюдается при напряженности электрического поля около 10 кВ/м. При этом, сила тока составляет единицы миллиампер. Известно [11], что перейти в лидерную стадию потенциально способны только те стримеры, сила тока

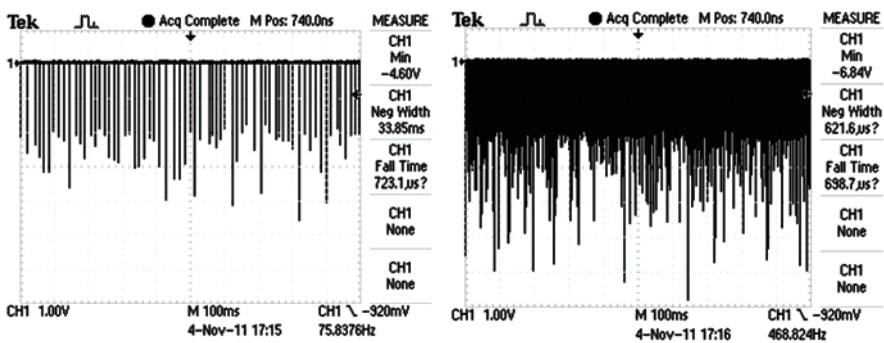


Рисунок 3 – Осциллограммы развившейся короны

Таблица 2 – Результаты измерения характеристик стационарной короны

№ стержня	Напряжение на потенциальном электроде, $U_{кр}$ , кВ	Амплитуда силы тока единичного всплеска, мА	Падение напряжения на шунте, В	$E_{кр}$ , кВ/м
1	78	<b>26,8</b>	1,34	<b>35,45</b>
2	84	27,2	1,36	38,18
3	80	28	1,4	36,36
4	96	30,4	1,52	43,64
5	92	45,6	2,28	41,82
6	122	52,8	2,64	55,45
7	80	38,4	1,92	36,36
8	112	48,4	2,42	50,91
9	20	1,72	0,086	9,09
10	24	3,12	0,156	10,91

Примечание:  $E_{кр} = U_{кр} / H$

которых достигает десятков миллиампер. Безусловно, по мере увеличения напряженности электрического поля стримерные вспышки, возникающие с образцов 9 и 10, смогут достигнуть требуемых значений силы тока. Однако, как было показано в работе [10], такие молниеприемники имеют весьма размытую гистограмму времени опережения. Напротив, для образцов 1-8, имеющих плоскую вершину, за счет развитой линии образования короны, начальные стримерные вспышки удовлетворяют указанному выше условию, и могут с меньшей дисперсией преобразовываться лидер. Из всех исследованных образцов минимальное значение напряженности критического электрического поля (35,45 кВ/м) соответствует образцу № 1. Именно такой вариант стержневого молниеприемника рекомендован в работе [12] в качестве стандартного образца при проведении испытаний по стандарту Франции [1]. В указанной работе [12] рассмотрена математическая модель процесса, реали-

зованного в рамках настоящих экспериментальных исследований. Показано, что среди стержней, с поперечным сечением в форме круга, квадрата, шестиугольника и восьмиугольника, наибольшее значение напряженности электрического поля на поверхности имеет стержень квадратного сечения. Причем, чем меньше размер сечения, тем выше напряженность. Однако, с учетом требований к элементам молниезащиты, сечение молниеприемника должно быть более 140 мм<sup>2</sup>. Всем указанным требованиям удовлетворяет образец №1, что полностью подтверждено описанными экспериментальными исследованиями.

### **Выводы:**

1. Начальные коронные процессы, связанные с условиями образования стримерных вспышек, которые способны перейти в лидерную фазу, могут влиять на значение разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках.

2. Экспериментально подтверждено, что в качестве образцового молниеприемника следует признать стальной стержень квадратного сечения размером 12 x 12 мм<sup>2</sup>, с плоской вершиной. Длина стержня может быть выбрана любой. Однако, исходя из реальных возможностей большинства высоковольтных лабораторий мира, целесообразно ее принять равной 1,0 м.

3. Авторы приглашают всех заинтересованных в комплексном решении поставленных задач к сотрудничеству, путем обмена данными, согласования планов расчетных и экспериментальных исследований. Контакт можно установить по адресу электронной почты: [knyaz2@i.ua](mailto:knyaz2@i.ua).

**Список литературы:** 1. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006 NEC). Введ. 01.01.2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 3. IEC 62305-1:2011. Protection against lightning. Part 1. General principles. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 68 p. 4. IEC 62305-2:2011. Protection against lightning. Part 2. Risk management. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 110 p. 5. IEC 62305-3:2011. Protection against lightning. Part 3. Physical damage to structures and life hazard. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 154 p. 6. IEC 62305-4:2006. Protection against lightning. Part 4. Electrical and electronic systems within structures. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2006. – 101 p. 7. NF C 17-102: 1995. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 8. СН РК 2.04-29-2005. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – Астана: 2006. – 32 с. 9. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П. Тестирование активных молниеприемников // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 1. – С. 80-88. 10. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П. и др. Результаты исследования параметров активных молниеприемников и рассеивателей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2008. – Вып. 21. – С. 78-87. 11. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. 12. Князев В.В., Горюшкин А.Э., Скобиков А.Ю. Результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля по поверхности стержневого молниеприемника // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2011. – Вып. 49. – С. 77-85.

*Поступила в редколлегию 07.03.2012.*