

**А.Ю. ЧЕРНУХИН**, мл. науч. сотр., аспирант, НТУ «ХПИ»;  
**В.В. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## ОСОБЕННОСТИ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ СО СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕПРИЕМНИКОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований стримерной короны со стержневых молниеприемников, в предгрозовый период. На основании статистической обработки результатов установлена эмпирическая зависимость количества одиночных стримеров в коронном разряде от напряженности электрического поля, в котором находится молниеприемник. Доказано существенное отличие в характере зависимости для стержня квадратного сечения с плоской вершиной и стержня кругового сечения с заостренной вершиной.

**Ключевые слова:** предгрозовые условия, стримерная корона, число единичных стримеров, напряженность электрического поля, стержневой молниеприемник.

**Введение.** Предметом исследования, результаты которого представлены далее, являются электрофизические процессы, сопровождающие коронный разряд в воздухе с металлических стержней, находящихся в постоянном электрическом поле. Известно [1], что при некоторых условиях коронный разряд, несмотря на постоянство напряжения, горит в виде периодических импульсов тока с частотами повторения до  $10^4$  Гц, если коронирует анод, и  $10^6$  Гц, если коронирует катод. В работе [1] также приведены конкретные результаты для случаев стержня над плоскостью при обеих полярностях стержня. Эти данные были приняты нами в качестве отправной точки, и они таковы:

– для положительного острия радиусом  $r = 0,17$  мм на расстоянии  $d = 3,1$  см от плоского катода корона появляется при напряжении  $V_k \approx 5$  кВ и вплоть до напряжения  $V_1 \approx 9,3$  кВ имеет импульсный характер. У краев интервала частота повторения мала, а в середине достигает максимальной величины 6,5 кГц. Средний ток нарастает до 1 мкА при  $V_1$ . Подобные импульсы автор [1] называет «вспышечной короной». (физика процесса обусловлена возникновением стимеров, поэтому, такую корону целесообразно называть «стримерной») В интервале от  $V_1$  до  $V_2 \approx 16$  кВ импульсов нет. Идет стационарный ток, который нарастает от 1 до 10 мкА при  $V_2$ . Начиная от  $V_2$  и до напряжения искрового пробоя всего промежутка  $V_n \approx 29$  кВ разряд снова протекает в форме импульсов. Частота их монотонно возрастает от малой величины до 4,5 кГц. Нарастающий с  $V$  средний ток достигает в предпробойной стадии 100 мкА. Ток между импульсами вспышечной короны падает не до нуля, он обладает и постоянной составляющей;

– для отрицательного острия с идентичной геометрией в некотором интервале напряжений и средних токов, начиная с точки зажигания  $V_k$ , ток име-

© А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, 2015

ет импульсный характер. Частота импульсов больше, чем в положительной короне, достигает 100 кГц при силе тока 20 мкА, а сами импульсы короче ( $10^7$  с). Пиковый ток достигает 10 мА. Импульсы имеют регулярный характер. При повышении напряжения импульсы исчезают, и стационарная корона существует вплоть до искрового пробоя промежутка.

В современной литературе активно обсуждается влияние объемного заряда короны на эффективность молниезащиты [2 - 4]. В тоже время, особенности процесса коронирования со стержневых молниеприемников в предгрозовой обстановке недостаточно экспериментально исследованы. Авторами в работах [5 - 7] предпринята попытка изучить эти особенности в условиях приближенных к естественным. В рамках данной статьи представлены результаты, касающиеся зависимости характеристик стримерной короны со стержневого молниеприемника от напряженности электрического поля, в котором он находится. В определенном смысле, эти результаты являются дополнением к результатам работы [7].

### **Основная часть**

**Цель работы:** экспериментальное исследование частоты возникновения одиночных стримеров для стержневого молниеприемника в зависимости от напряженности электрического поля.

**Результаты экспериментальных 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 критическом значении напряженности электрического поля возникают стримерные вспышки. Определение критического значения напряженности электрического поля, при котором возникают стримерные вспышки, и характер их поведения при изменении уровня напряженности электрического поля представлены в работе [7].

Моделирование исследуемого процесса осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», описанном в работе [5]. 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. Рассмотрен вариант, когда нижняя плоскость, на которой устанавливается стержень, заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подавалось высокое напряжение (ВН) отрицательной полярности. Расстояние (S) между плоскостями было фиксированным равным 5 м. Соответственно, с изменением подаваемого напряжения (до 180 кВ), изменялось значение напряженности электрического поля в промежутке (до 36 кВ/м). Стержень устанавливался на нижней заземленной плоскости на изоляционной подставке и был присоединен к плоскости через сопротивление шунта ( $R_{ш} = 75$  Ом). С помощью

шунта и осциллографа регистрировался ток, протекающий в исследуемом промежутке. На второй канал осциллографа подавалось напряжение с омического делителя, установленного непосредственно на выходе ПВУ. Коэффициент деления примененного делителя равен  $10^4$ . Чувствительность схемы измерения силы тока короны определяется величиной сопротивления шунта 75 Ом.

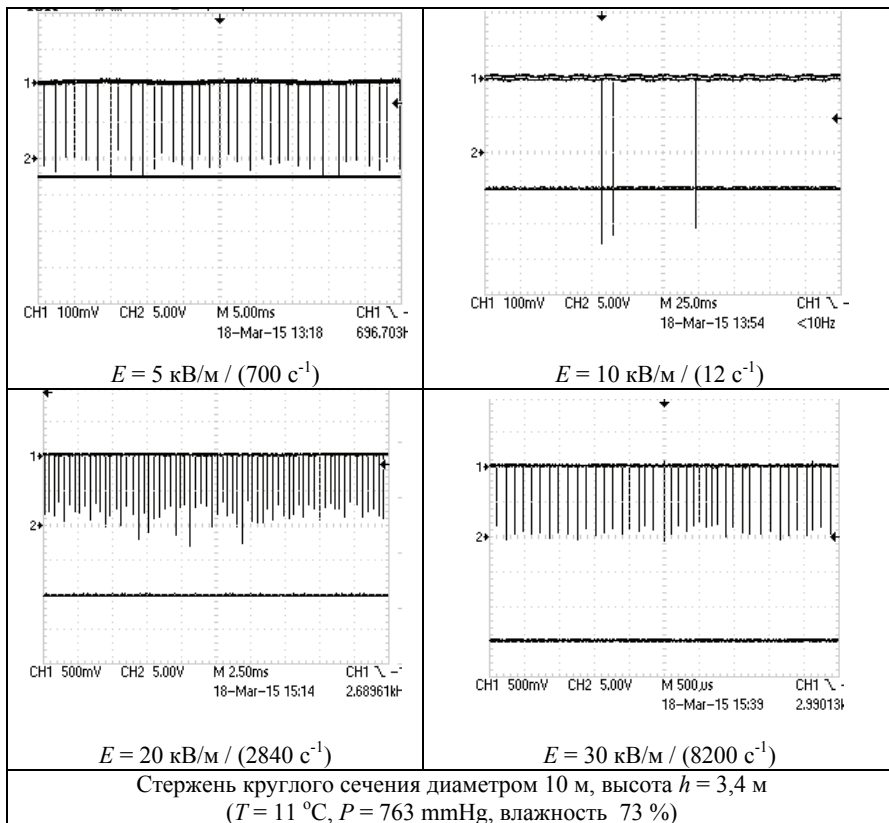


Рисунок 1 – Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля для заостренного стержня

Учитывая статистический характер процессов коронирования, для каждой исследуемой совокупности параметров проводилось не менее 10 последовательных измерений. Что обеспечило возможность осуществить усреднение результатов и оценить величину их разброса. Для иллюстрации результатов на рис. 1 и 2 представлены типовые осциллограммы стримерной короны для случаев кругового стержня (диаметром 10 мм) с заостренной вершиной и

стержня квадратного сечения с плоской вершиной, соответственно. В скобках возле значений напряженности  $E$  поля указано рассчитанная частота следования для конкретной осциллограммы.

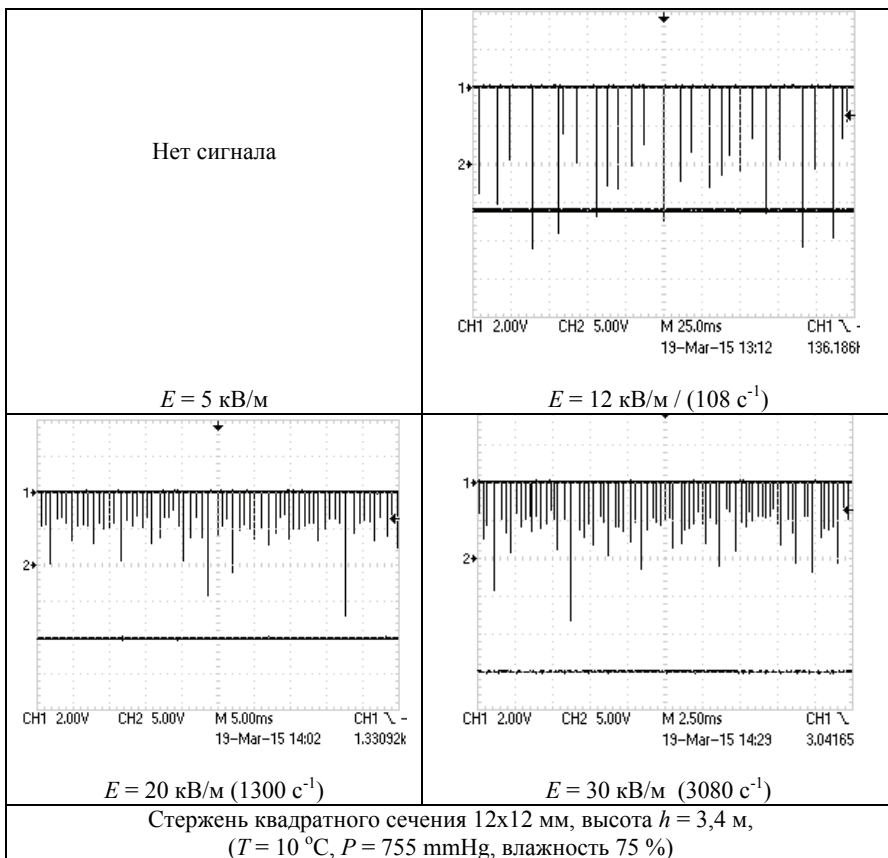


Рисунок 2 – Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля для квадратного стержня

Зависимости среднего арифметического числа стримерных вспышек от напряженности электрического поля для исследуемых вариантов стержней представлены на рис. 3. Результаты статистической обработки полученных в ходе экспериментов данных представлены в табл. 1 и 2, соответственно для заостренного и квадратного стержней. Следует отметить, что форма тока единичного стримера для всех рассмотренных случаев практически не изменялась. Изменение касалось только пикового значения импульса. Из представленных рисунков и таблиц можно сделать такие умозаключения:

Таблица 1 – Результаты измерений частоты следования для заостренного стержня

| $U_{зар.}$ , кВ | $E$ , кВ/м | Среднее арифм. $N$ , 1/с | 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 |
| 150             | 30         | 6720                     | 627,66 |

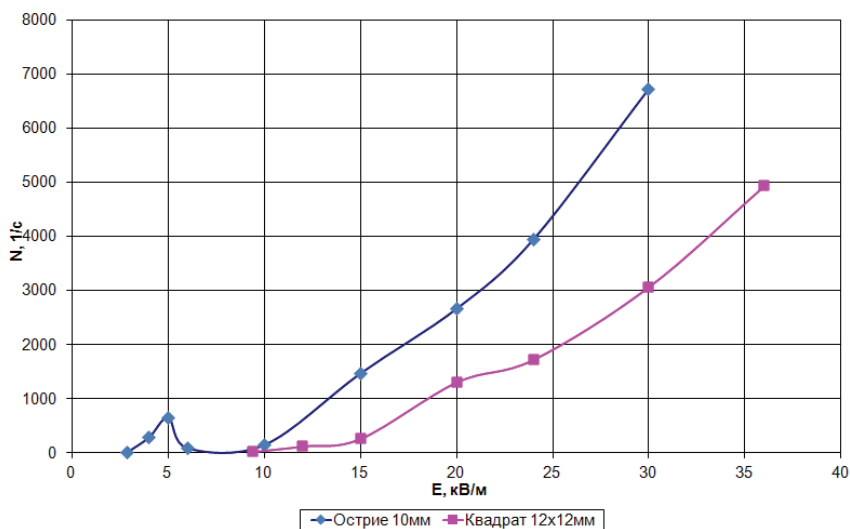


Рисунок 3 – Зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля

Таблица 2 – Результаты измерений частоты следования для квадратного стержня

| $U_{зар.}$ , кВ | $E$ , кВ/м | Среднее арифм., $c^{-1}$ | 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 |

– заостренный стержень начинает реагировать с напряженности электрического поля 3 кВ/м, а стержень квадратного сечения не ранее чем с 9 кВ/м;

– коронный разряд с заостренного стержня в диапазоне  $E$  от 6-10 кВ/м прекращается, что в полной мере соответствует процитированным выше во введении результатам работы [1];

– при напряженности  $E$  превышающей 10 кВ/м 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  $E \approx 10$  кВ/м это значение составляет 5 мА для заостренного стержня и 60 мА для квадратного стержня. По мере увеличения напряженности  $E$  это различие уменьшается, так при  $E \approx 30$  кВ/м, пиковое значения импульса силы тока составляет 13 мА и 26 мА, соответственно;

– значение среднеквадратичного отклонения (СКО), при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня на порядок меньше, чем для случая заостренного стержня.

Полученные результаты планируется использовать при создании индикатора грозовой активности.

## **Выводы**

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  $E$  частота следования монотонно возрастает с коэффициентом близким к  $0,25 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$  м.

Значение среднеквадратичного отклонения (СКО), при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня на порядок 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, что в полной мере соответствует процитированным выше во введении результатам работы [1].

Несмотря на существенное отличие между проведенными опытами в рамках этой работы и теми, что описаны в работе [1], наблюдается не только хорошее качественное, но и количественное совпадение результатов.

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

**Список литературы:** 1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер . – 1987. 2. Базелян Э.М. Эффект объемного заряда короны в молниезащите / Э.М. Базелян // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2014. – С. 8-23. 3. Lightning protection / Ed. By Vernon Coorey // IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010, P.1070. 4. Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе / Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, А.С. Субботский и др. // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 11. – С. 21-28. 5. Князев В.В. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – Вып. 21. – С. 111-117. 6. Чернухин А.Ю. Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ «ХПИ» Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2013. – Вып. 60. – С. 122-127. 7. Чернухин А.Ю. параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле / А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ «ХПИ» Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – Вып. 50. – С. 155-160.

**Bibliography (transliterated):** 1. Rajzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada. Yu.P. Rajzer. 1987 Print. 2. Bazelyan E.M. Effekt ob#emnogo zaryada korony v molniezaschite. E.M. Bazelyan. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj konferencii po molniezaschite. Sankt Petersburg: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2014. 8-23 Print. 3. Lightning protection. Ed. By Vernon Coorey. IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010, P.1070 Print. 4. Stishkov Yu.K. Eksperimental'noe issledovanie impul'snogo koronnogo razryada v vozduhe. Yu.K. Stishkov, A.V. Samusenko, A.S. Subbotskij i dr. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2010. Vol. 80.11. 21-28 Print. 5. Knyazev V.V. Harakteristiki strimernoj korony pri postoyannom napryazhenii na molniepriemnikah s razlichnymi formami verшин i poperechnyh sechenij. V.V. Knyazev, P.N. Mel'nikov, A.Yu. Chernuhin. Vestnik NTU «KhPI». Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2012. Vol. 21. 111-117 Print. 6. Chernuhin A.Yu. Kvazistaticheskoe razvitie koronnogo razryada s molniepriemnikov. A.Yu. Chernuhin, V.V. Knyazev, P.N. Mel'nikov. Vestnik NTU «KhPI» Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2013. Vol. 60. 122-127 Print. 7. Chernuhin A.Yu. parametry impul'snoj korony na metallicheskih stержnyah v sil'nom elektricheskom pole. A.Yu. Chernuhin. Vestnik NTU «KhPI» Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2014. Vol. 50. 155-160 Print.

*Поступила в редколлегию 15.04.2015*