

**М.М. РЕЗИНКИНА**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ИТПМ НАН Украины, Харьков;  
**О.Л. РЕЗИНКИН**, д-р техн. наук, зав. каф., НТУ «ХПИ»;  
**Е.Е. СВЕТЛИЧНАЯ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ МОЛНИИ НА НАЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВСТРЕЧНОЙ ИСКРЫ**

Предложена статистическая модель электрофизических процессов при «выборе» лидерным каналом молнии объектов для удара на земле с учетом возможности распространения от них встречной искры. Соответствие данной модели рассматриваемым процессам подтверждено путем сравнения результатов расчета вероятности места поражения высоковольтным разрядом земли и находящихся на ней объектов с известными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** молния; лидерный канал, пробой, математическое моделирование.

**Введение.** В связи со сложностью экспериментального исследования процессов, связанных с «выбором» лидерным каналом молнии места удара на земле, в настоящее время разработано большое число математических моделей, описывающих данные процессы [1-3]. Самые известные из них, достаточно простые и наглядные - так называемый электрогеометрический метод и родственный ему Rolling Sphere Model, положены в основу нормирования зон защиты молниеотводов, например в США [4]. Данные методы косвенно подразумевают наличие восходящего лидера от наземных объектов. Однако целенаправленных исследований, связанных с физическим и математическим моделированием восходящих разрядов от объектов на земле, недостаточно. Как показано в ряде публикаций [5,6], каналы разрядов, развивающихся от заземленных объектов в условиях грозовой обстановки, играют существенную роль при ориентировке лидерного канала молнии на наземные объекты. Так, во Франции и в Испании действуют нормативные документы, предусматривающие испытания так называемых активных молниеотводов, принцип действия которых предположительно основан на генерировании встречных лидеров. Однако оговоренные в этих документах испытания не позволяют в полной мере учесть электрофизические процессы, сопровождающие возникновение и продвижение восходящих лидеров, и оценить преимущества и недостатки различных молниеотводов в условиях грозовой обстановки.

Данная статья посвящена описанию статистической модели электрофизических процессов при продвижении лидерного канала молнии к наземным объектам и «выбора» ею места поражения с учетом возможности развития

встречных искровых разрядов от наземных объектов. Приводится также сравнение результатов статистического моделирования и экспериментальных данных, положенных в основу действующих в Украине и бывшем СССР нормативных документов по молниезащите.

### Основная часть

Статистическое моделирование «выбора» молнией места удара с учетом возможности развития восходящей искры от заземленных объектов. При статистическом моделировании места удара молнии необходимо провести ряд математических экспериментов, проварьировав все возможные зоны, откуда могут продвигаться лидерные каналы молнии. При этом нужно учесть разброс величин тока молнии, а также уровней ее потенциала и высоты ориентировки на наземные объекты.

Величина максимума тока возвратного удара главной стадии молнии  $I_m$  может быть измерена, и поэтому существуют систематизированные экспериментальные данные о распределении вероятностей появления молнии с определенной величиной разрядного тока (см. например [7]).

В [8, с. 51] указывается, что высота ориентировки молнии на наземные объекты ( $l_S$ ) определяется исходя из условия достижения  $E_{cr}$  «критического электрического поля», необходимого для пробоя промежутка. Там же отмечается, что  $E_{cr}$  должно быть больше или равно  $0.5 \cdot 10^6$  В/м для отрицательных лидеров и  $0.3 \cdot 10^6$  В/м для положительных.

В [9, с. 176] величина  $E_{cr}$  определяется как находящаяся между напряженностью ЭП, необходимой для развития отрицательных стримеров -  $E_{st-}$  и положительных стримеров -  $E_{st+}$ . Однако в ряде публикаций (см. например [5,6,10,11]) напряженность ЭП, необходимая для развития отрицательного стримера, полагается равной  $E_{st-}$ .

В большинстве литературных источников, а также в нормативных документах (см. например [7-9]) зависимость между  $I_m$  и  $l_S$  представляют в виде:

$$l_S = a \cdot I_m^b, \quad (1)$$

где  $I_m$  [кА],  $l_S$  [м];  $a$ ,  $b$  – коэффициенты.

Величины коэффициентов в (1) в различных источниках полагаются равными:  $a$  от 1.9 до 10,  $b$  – от 0.65 до 0.9 (см. например [9, с. 181; 8, с. 53]).

При моделировании процесса «выбора» лидерным каналом молнии места удара важным параметром является его потенциал  $U_m$ . Величина  $U_m$  пропорциональна  $I_m$ , причем согласно [5, с. 172, 185] между  $I_m$  и  $U_m$  существует связь:  $U_m \approx k_U \cdot I_m \cdot Z$  ( $k_U \sim 1.7$ ,  $Z \sim 500$  Ом). Тогда, полагая, что  $l_S = U_m / E_{st-}$ , получим:

$$l_S \sim 0.8 \cdot I_m,$$

где  $I_m$  [кА];  $l_S$  [м].

Сходный подход к определению величины расстояний, с которых начинается ориентировка отрицательных лидеров молнии, используется в [12]:

$$I_S = 1.9 \cdot I_m^{0.9},$$

где  $I_m$  [кА];  $I_S$  [м], хотя при этом напряженность ЭП в промежутке «лидер – земля» полагалась равной  $E_{st+}$ .

Подобно тому, как это было сделано в [3], для учета всех возможных вариантов удара молнии в исследуемую территорию («область на земле» – см. 1, рис. 1), разобьем ее площадь ( $S_G$ ) квадратной сеткой с шагом  $\Delta$ : в результате получим  $K_G$  ячеек площадью  $S_{Gk} = S_G / K_G = \Delta^2$ .

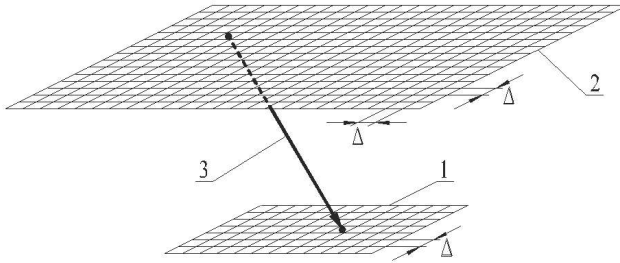


Рисунок 1 – Расчетная система: 1 – «область на земле», 2 – «грозовое облако», 3 – лидерный канал молнии

Будем полагать, что вероятность поражения ячейки обратно пропорциональна времени продвижения лидерного канала молнии до соответствующего ей узла. Поскольку молнии могут ударять в «область на земле» с большей площади, находящейся над ней («грозовое облако» – см. 2, рис. 1), для моделирования всех возможных мест старта нисходящих лидеров молнии увеличим  $S_G$  на  $M$  ячеек, получив в результате  $K_S$  ячеек и соответствующих им узлов ( $K_S > K_G$ ). Будем полагать, что вероятность попадания молнии одинакова в пределах  $k$ -ой ячейки расчетной сетки и пропорциональна ее площади  $S_{Gk}$ .

В [11, с. 66] на основе анализа экспериментальных данных показано, что среднее квадратичное отклонение разброса пробивных напряжений для разрядных промежутков длиной 2 – 30 м мало зависит от их длины и близко к 6 – 7 %. Там же отмечается, что факторами, влияющим на появление разброса, могут относиться вариации момента возникновения лидера, скорости его развития, длины стримеров, напряженности в лидерной и стримерной зонах. Исходя из этих данных, примем, что разброс времен развития разряда составляет  $\varepsilon_S = 0.07$ . Будем полагать, что разряд молнии заданного потенциала  $U_i$  из  $j$ -ого узла «грозового облака» может произойти только в те  $K_j^i$  узлов «области на земле», длительность продвижения к которым лидерного канала  $t_{k,j}^i$  не превышает более чем в  $(1 + \varepsilon_S)$  раз минимальное время продвижения конкурирующих разрядных каналов во все ячейки «области на земле» в данном численном эксперименте:  $t_{k,j}^i \leq (1 + \varepsilon_S) \cdot t_{j_{\min}}^i$  (где  $t_{j_{\min}}^i = \min\{t_{k,j}^i\}$ ). Поражение же всех остальных ячеек в данном численном эксперименте будем

считать невозможным, и вероятность этого события для данных ячеек полагаем равной нулю. Здесь узлы «области на земле», в которые может произойти прорыв молнии, имеют индекс « $k$ »; всего таких узлов для данного численного эксперимента, моделирующего удар молнии с потенциалом  $U_i$  из узла  $j$ , может быть  $K_j^i$ .

Учитывая, что в данном численном эксперименте может быть только один удар молнии, будем понимать под  $P_{k,j}^i$  - плотностью вероятности прорыва молнии в  $k$ -ый узел «области на земле», долю ударов в него молнии из всех возможных ячеек «грозового облака» в данном численном эксперименте. Будем исходить из предположения, что величина  $P_{k,j}^i$  обратно пропорциональна времени распространения до нее лидера молнии:  $P_{k,j}^i \sim 1/t_{k,j}^i$  и зависит от количества и площади ячеек, вероятность поражения которых в данном численном эксперименте отлична от нуля. Например, если из расчета получилось, что времена движения лидерного канала молнии в каждый из  $K_j^i$  узлов одинаковы, то одинаковы и плотности вероятности поражения каждого из этих узлов.

Пронормируем коэффициент, пропорциональный вероятности прорыва молнии в узел ( $KP_{k,j}^i$ ), так, чтобы он равнялся 1 для узлов, время распространения до которых в данном численном эксперименте минимально ( $t_{j\min}^i$ ), а для узлов, время распространения до которых более чем в  $(1+\varepsilon_s)$  раз превышает  $t_{j\min}^i$  – он равнялся нулю:

$$KP_{k,j}^i = 1 - \frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i - 1/[t_{j\min}^i \cdot (1 + \varepsilon_s)]} = 1 - \frac{1 + \varepsilon_s}{\varepsilon_s} \cdot \frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i}. \quad (2)$$

Для того чтобы учесть зависимость вероятности поражения молнией узла «области на земле» от общего количества и площади ячеек, которые могут быть поражены в данном численном эксперименте, запишем  $P_{k,j}^i$  в виде:

$$P_{k,j}^i = KP_{k,j}^i \cdot K_j. \quad (3)$$

Коэффициент  $K_j$  получим из условия равенства единице вероятности поражения одного из  $K_G$  узлов «области на земле» в данном численном эксперименте:

$$\sum_{k=1}^{K_G} P_{k,j}^i = K_j \cdot \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i = 1.$$

Тогда

$$K_j = 1 / \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i. \quad (4)$$

Пусть, например, расчеты показали, что при распространении молнии из

$j$ -ого узла «грозового облака» длительность продвижения в два узла «области на земле» существенно (на порядок и более) меньше, чем для всех остальных узлов (например, координаты этих узлов соответствуют координатам молниеотводов), причем,  $t_{k1,j}^i = t_{j\min}^i$ ,  $t_{k2,j}^i = (1/0.95) \cdot t_{k1,j}^i = 1.0526 \cdot t_{k1,j}^i$ . Тогда из (2) получим:  $KP_{k1,j}^i = 1$ ,  $KP_{k2,j}^i = 0.236$ . Подставив эти значения в (4):

$$K_j = 1 / \sum_{k=1}^2 KP_{kj}^i \approx 0.81. \text{ Окончательно рассчитаем вероятности поражения}$$

молнией каждого молниеотвода в данном численном эксперименте, подставив полученные значения в (3):  $P_{k1,j}^i = KP_{k1,j}^i \cdot K_j \approx 0.81$ ,  $P_{k2,j}^i \approx 0.19$ . Таким образом, суммарная вероятность данного события равна 1:  $P_{k1,j}^i + P_{k2,j}^i = 0.81 + 0.19$ .

Зная  $P_j$  — вероятность появления молнии с током, меньшим  $I_i$  (см. например [7]), просуммировав все  $P_{k,j}^i$  от ударов молний с амплитудами  $I_i$ , лидеры которых берут начало из  $j$ -ых ячеек «грозового облака», получим выражение для прогнозируемого числа ударов молнии в  $k$ -ый узел «области на земле» в виде:

$$N_k = 10^{-6} \cdot N_m \cdot \sum_{i=1}^M \{ (P_{i+1} - P_i) \cdot \sum_{j=1}^J [\Delta^2 \cdot P_{k,j}^i] \},$$

где  $M$  — число интервалов, на которое разбит диапазон изменения тока молнии, причем  $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$ ;  $N_m$  — среднегодовое число ударов молнии в  $1 \text{ km}^2$  земной поверхности в данной географической зоне (см. например [5,8]);  $\Delta^2$  — площадь ячейки в  $\text{m}^2$ .

Время продвижения нисходящего лидерного канала от  $j$ -ого узла «грозового облака» до  $i$ -ого узла «области на земле» рассчитывается следующим образом:

$$t_{k,j}^i = (L_{k,j} - l_s^i) / v_{0L\downarrow}^i + l_s^i / (v_{L\downarrow}^i + v_{L\uparrow}^i), \quad (5)$$

где  $L_{k,j}$  — расстояние между  $i$ -м узлом «области на земле» и  $j$ -м узлом «грозового облака» в начале процесса движения из него лидерного канала молнии;  $l_s^i$  — высота ориентировки молнии с потенциалом  $U_i$ , лидерный канал которой движется из  $j$ -ого узла «грозового облака»;  $v_{0L\downarrow}^i$ ,  $v_{L\downarrow}^i$  — соответственно скорости нисходящих лидерных каналов молнии с потенциалом  $U_i$  до и после начала сквозной фазы;  $v_{L\uparrow}^i$  — скорость восходящей искры от наземных объектов для молнии с потенциалом  $U_i$ .

В том случае, когда условия возникновения и развития восходящего лидера не выполняются,  $v_{L\uparrow}^i$  в (5) полагается равной нулю.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных по месту разряда в длинных воздушных промежутках. Для сравнения результатов расчета вероятностных мест поражения высоковольтным разрядом при наличии и отсутствии встречной искры от заземленных объектов рассмотрим системы, описанные в [13]. Несмотря на то, что данные исследования были выполнены более 70 лет назад, они по-прежнему представляют ценность, хотя бы потому, что именно они положены в основу до сих пор действующего в России и странах СНГ нормативного документа [14], регламентирующего зоны защиты молниеотводов. Почти все эксперименты, результаты которых приведены в [13], были проведены при приложении к имитирующему лидерный канал молнии высоковольтному электроду напряжения положительной полярности. Для обоснования такого подхода в [13] приводятся сравнительные данные о местах пробоя при подаче на высоковольтный электрод импульсного напряжения положительной и отрицательной полярности при одних и тех же остальных параметрах системы. В этих экспериментах (схема представлена на выноске к рис. 2, а) высоковольтный стержневой электрод (1) располагался над заземленной плоскостью (2) на расстоянии  $L = 1.6$  м от нее, а также на расстоянии  $L$  от заземленных объектов, имитирующих молниеотвод (3) и защищаемый объект (4). Как следует из экспериментов, при приложении к высоковольтному электроду 1 напряжения положительной полярности (см. [13, фиг. 1, а]), примерно  $N_2 = 80$  % разрядов поражает плоскость,  $N_3 = 8$  % – электрод 3 и  $N_4 = 12$  % – электрод 4.

Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие данные:  $N_2 = 76$  %, электрод 3 –  $N_3 = 10$  %, электрод 4 –  $N_4 = 14$  % (см. рис. 2, а).

При моделировании полагалось, что встречная искра от заземленных объектов развиваться не будет, поскольку для развития лидера отрицательной полярности требуется напряженность ЭП, существенно (до 2-х раз) превышающая напряженность в стримерном канале нисходящего лидера положительной полярности.

При приложении к высоковольтному электроду напряжения отрицательной полярности, когда от объекта 3 может развиваться встречная искра, примерно  $N_3 = 85$  % разрядов поражает электрод 3 и  $N_2 = 15$  % – плоскость (см. [19, фиг. 1, б]). Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие результаты: электрод 3 –  $N_3 = 84$  %, плоскость под высоковольтным электродом (2) –  $N_2 = 16$  % (см. рис. 2, б). При моделировании полагалось, что от заземленного объекта 3 будет развиваться встречная искра, поскольку для развития лидера положительной полярности требуется напряженность ЭП, в 2 раза меньшая, чем напряженность в стримерном канале нисходящего лидера отрицательной полярности. Причем, уровень пробивной напряженности  $E_c = 3 \cdot 10^6$  В/м достигается на вершине объекта 3 и не достигается на вершине объекта 4, поскольку он находится в зоне ослабленного ЭП из-за наличия объекта 3. Как следует из [13], в экспе-

рименте встречная искра тоже развивается только от объекта 3.

При моделировании полагалось, что к электроду 1 прикладывалось положительное напряжение  $U = +0.7 \text{ MV}$  или отрицательное напряжение  $U = -1.4 \text{ MV}$ . Скорость стримеров задавалась равной  $10^6 \text{ m/s}$ , погонная емкость лидера в сквозной фазе –  $10 \text{ pF/m}$ . Скорость положительных нисходящих лидеров до начала сквозной фазы полагалась равной  $v_{0L\downarrow}^i = 10^6 \text{ m/s}$ , скорость отрицательных нисходящих лидеров  $v_{0L\downarrow}^i = 1.5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ , скорость положительных восходящих лидеров  $v_{s\uparrow}^i = 0.3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ . При этом ток в сквозной фазе получился при расчетах равным  $7 \text{ A}$  при приложении напряжения положительной полярности и  $14 \text{ A}$  при приложении напряжения отрицательной полярности.

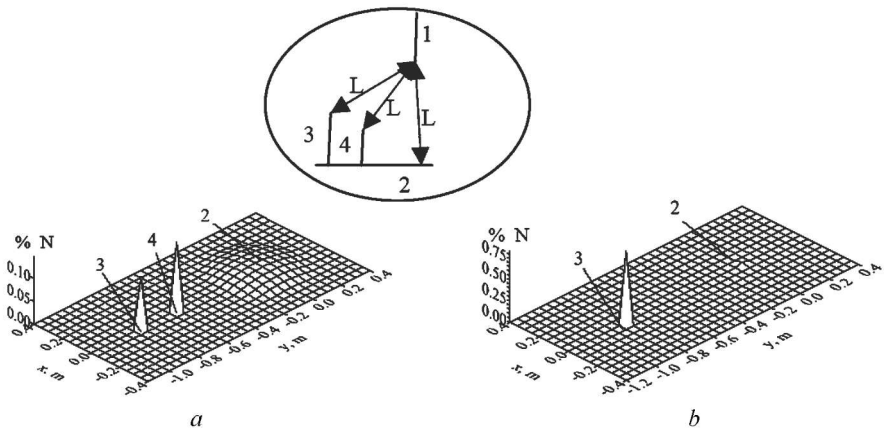


Рисунок 2 – Рассчитанные распределения прогнозируемого процентного распределения числа попаданий нисходящих разрядов в расположенные на земле (2) объекты (3,4) при приложении к высоковольтному электроду (1) напряжения: *a* – положительной полярности; *b* – отрицательной полярности. На выноске показана рассматриваемая система.

Таким образом, использование описанной модели позволило рассчитать вероятности места пробоя при приложении к промежутку «высоковольтный стержень – два стержня на заземленной плоскости» импульсов положительной и отрицательной полярности. Данные моделирования и эксперимента [13] совпадают в пределах  $5 - 25 \%$ .

**Заклучение.** Предложена статистическая модель для определения вероятности удара молнии в объекты на земле с учетом их высоты и габаритов, а также возможности развития от них встречной искры. Данная модель основана на анализе имеющихся литературных данных о параметрах молний, а

также электрофизических процессах при пробое длинных воздушных промежутков. Предложенная модель была использована для расчета вероятности места удара длинной искры при приложении к высоковольтному электроду напряжения положительной и отрицательной полярности. Сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными показало их совпадение в пределах 4 – 25 %.

**Список литературы:** 1. Петров Н., Петрова Г. // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. Вып. 4. – С. 134–137. 2. Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д., Плешков О.И. // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. Вып. 4. – С. 48-53. 3. Резинкина М.М. // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. № 5. – С. 1-7. 4. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. – 108 P. 5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с. 6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с. 7. IEC 62305-2. International standard «Protection against lightning – Part 2: Risk management». – Geneva: IEC, 2010. – 84 p. 8. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 240 p. 9. Cooray V. Lightning Protection. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1036 p. 10. Базелян Э.М., Разжанский И.М. Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 165 с. 11. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 222 с. 12. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. // Electrostatics. – 2007. – № 65. – P. 296-306. 13. Акопян А.А. // Труды ВЭИ. – 1940. – Вып. 36. – С. 94-159. 14. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 24 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Petrov H., Petrova G. ZhTF. 1999 T. 69. Vyp. 4, s. 134-137. Print. 2. Dulzon A.A., Lopatin V.V., Noskov M.D., Pleshkou O.I ZhTF.. 1999 T. 69 Vyp 4. s. 48-53. Print. 3. Rezinkina M.M. ZhTF. 2008. T. 78. № 5. S. 1-7. Print. 4. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 P. Print. 5. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molnii i molniezashhity. Moscow: Fizmatlit, 2001. 319 s. Print. 6. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoj razrjad. Moscow: Iz-dvo MFTI, 1997. 320 s. Print. 7. IEC 62305-2. International standard «Protection against lightning – Part 2: Risk management». Geneva: IEC, 2010. 84 p. Print. 8. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. Print. 9. Cooray V. Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. Print. 10. Bazeljan Je.M., Razhanskij I.M. Iskrovoj razrjad v vozduhu. Novosibirsk: Nauka, 1988. 165 s. Print. 11. Bazeljan Je.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashhity. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 222 s. Print. 12. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. P. 296–306. Print. 13. Akopjan A.A. Trudy VJeI. 1940. Vyp. 36. s. 94-159. Print. 14. RD 34.21.122-87. Instrukcija po ustrojstvu molniezashhity zdaniij i sooruzhenij. Moscow: Jenergoatomizdat, 1989. 24 s. Print.

*Поступила (received) 22.09.2014*