

М.М. РЕЗИНКИНА, д.т.н., в.н.с. ДУ «ІТІМ НАН України», г. Харьков

О.Л. РЕЗИНКИН, д.т.н., зав. каф. НТУ «ХПИ»

Е.Е. СВЕТЛИЧНАЯ, аспирант НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРИЕНТИРОВКЕ МОЛНИИ НА НАЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Описана модель электрофизических процессов при движении лидерного канала молнии на последнем этапе его продвижения к земле с учетом возможности возникновения встречной искры от наземных объектов.

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

Введение. Экспериментальные исследования процессов, связанных с продвижением лидерного канала молнии к земле и “выбором” места удара, представляют существенные трудности. Известны эксперименты по искусственному инициированию молний путем запуска в грозовое облако ракеты с заземленным токопроводящим тросом [1]. Однако параметры инициируемых в ходе данных экспериментов молний отличаются от естественных нисходящих молний [2, с. 150]. Подобные эксперименты не могут быть использованы для определения вероятного места удара, поскольку путь разряда молнии определяется локализацией троса, подсоединенного к ракете.

В настоящее время широкое распространение получило физическое и математическое моделирование процесса образования и развития канала молнии. Физическое моделирование, связанное с исследованием развития пробоя в длинных воздушных промежутках, наталкивается на ряд трудностей технического характера и не позволяет в полной мере отразить все процессы при продвижении молнии к наземным объектам. Поскольку электрофизические процессы при различной длине высоковольтной искры существенно отличаются, применение принципа масштабирования в данном случае не вполне корректно. Такая ситуация привела к появлению большого числа математических моделей, описывающих процессы удара молнии в наземные объекты [3,4]. Упрощенные модели - так называемый электрогеометрический метод и родственный ему Rolling Sphere Model - положены в основу нормирования зон защиты молниеотводов, например в США [5].

В то же время исследований, связанных с физическим и математическим моделированием восходящих разрядов от объектов на земле, по-прежнему недостаточно. Как показано в ряде публикаций [2,6,7], каналы разрядов, развивающихся от заземленных объектов в условиях грозовой обстановки, играют существенную роль при ориентировке лидерного канала молнии на наземные объекты. Так, во Франции действует нормативный документ [8],

предусматривающий испытания так называемых активных молниеотводов, принцип действия которых предположительно основан на генерировании встречных лидеров. Подобный стандарт введен и в Испании. Однако оговоренные в этих документах испытания не позволяют в полной мере учесть электрофизические процессы, сопровождающие возникновение и продвижение восходящих лидеров, и оценить отличия защитных свойств различных молниеотводов в условиях грозовой обстановки.

Данная статья посвящена описанию модели электрофизических процессов при продвижении лидерного канала молнии к земле с учетом возможности развития встречных искровых разрядов от наземных объектов.

Экспериментальные данные о лидерном канале молнии, используемые при определении вероятности поражения исследуемой зоны. Существующие нормативные документы [9, 10] предусматривают определение вероятности поражения объектов молнией. Однако подходы к оценке риска поражения молнией объекта, описанные, например в [10], являются упрощенными и не позволяют учитывать различие вероятности прорыва на объекты молний, лидеры которых несут к земле различные потенциалы.

Согласно существующим данным, около 90 % разрядов молний, развивающихся от облака к земле, имеют отрицательную полярность (см. например [11, с. 5]). Экспериментальные исследования показывают, что напряженность электрического поля (ЭП), необходимая для развития лидера отрицательной полярности, составляет около $E_{st-} \sim 10^6$ V/m, положительной - $E_{st+} \sim 0.5 \cdot 10^6$ V/m (см. например [6, с. 91]), условие начала электрического пробоя в воздухе при нормальных условиях – достижение напряженности ЭП $E_c \sim 3 \cdot 10^6$ V/m (см. например [12, с. 48]). Согласно [6, с. 139], из энергетических соображений, лидерный канал не может возникнуть, если превышение потенциала его головки над потенциалом внешнего ЭП в месте ее нахождения меньше, чем $U_c \sim 300 - 400$ kV.

На основе анализа экспериментов по пробую длинных воздушных промежутков авторами [13, с. 83] делается вывод, что как для отрицательных, так и для положительных лидеров высота, с которой происходит их ориентировка на заземленные объекты, примерно равна длине стримерной зоны, поскольку направление канала лидера обуславливается теми ветвями стримерной зоны, которые раньше соприкоснулись с заземленными участками. Используем тот же подход применительно к разряду молнии для построения алгоритма модели ориентировки ее лидерного канала на наземные объекты с учетом возможности развития от них встречного лидера. Будем полагать, что процесс ориентировки нисходящего лидерного канала молнии происходит, когда его стримерная зона касается одного из заземленных объектов или участка земли. При этом начинается так называемая сквозная фаза развития разряда. При касании стримерной зоны поверхности земли в этой зоне достигается напряженность ЭП E_{st-} [13, с. 74] и, поскольку выполняется условие $E_{st+} < E_{st-}$, становится возможным развитие встречных положительных лидеров. Таким образом, если условия возникновения разряда от заземленного

объекта выполнены, и напряженность ЭП в некоторой окрестности объекта превышает E_c , то от данного объекта будет развиваться встречный восходящий разряд по направлению к нисходящему лидеру молнии. Из аналитического решения распределения ЭП для проводящего шара в однородном поле известно, что на его поверхности напряженность увеличивается до 3-х раз. Поэтому, можно полагать, что при касании стримерной зоной отдельно расположенных стержневых объектов типа молниеотводов условия возникновения встречных лидеров будут заведомо достигаться.

Рассмотрим, в чем состоит отличие распространения лидерного канала молнии до наступления сквозной фазы и в сквозной фазе. Согласно экспериментальным данным, скорость лидера в сквозной фазе существенно возрастает: от $(2 - 5) \cdot 10^4$ м/с в момент соприкосновения стримерной зоны с заземленным участком до 10^6 м/с (см. например [7, с. 239]). Там же приведено соотношение, связывающее ток лидера i_L и его скорость v_L :

$$v_L = k_v \cdot i_L^{0.5},$$

где $k_v = 4 \cdot 10^4$ м/(с·А^{0.5}).

Одним из подтверждений взаимосвязи тока лидера и его скорости является наблюдаемое в экспериментах существенное замедление лидерного канала, скорость движения которого в сквозной фазе оставалась такой же, как в начальной – порядка 10^4 м/с, если в разрядную цепь подключалось сопротивление 10^6 Ом и более [7, с. 239].

В сквозной фазе наблюдается резкое (на порядок и более) увеличение тока в канале пробоя [12, с. 56]. Согласно [12, с. 101], в сквозной фазе в дополнение к току смещения:

$$i_{LC} = C_L \cdot \phi_L \cdot v_L, \quad (1)$$

где C_L , ϕ_L - погонная емкость и потенциал лидерной головки соответственно

возникает также ток переноса, вызванный поступлением стримерных головок, и ток проводимости по стримерам, пересекающим разрядный промежуток между каналом лидера и заземленной областью. В [12, с. 50] приводятся следующие экспериментальные данные: за 25 мкс развития лидерного канала в сквозной фазе было зафиксировано порядка $2.5 \cdot 10^5$ стримерных головок, средний заряд каждой из которых составлял порядка $6 \cdot 10^{-10}$ С, причем, скорость движения стримеров могла превышать 10^7 м/с, длина стримеров L_S примерно равна: $L_S \sim U_m/E_{cr}$ (где U_m - потенциал лидерного канала молнии). Следует учитывать, что ток проводимости стримеров пренебрежимо мал из-за их чрезвычайно высокого сопротивления [12, с. 102]: погонная проводимость стримера в холодном воздухе имеет порядок 10^{-10} С·см [13, с. 70].

Таким образом, можно полагать, что ток лидера в сквозной фазе определяется током переноса стримерных головок, а значит, прямо пропорционален скорости стримеров [12, с. 102]:

$$i_{TH} = C_L \cdot \phi_L \cdot v_S, \quad (2)$$

где C_L - эквивалентная погонная емкость лидера в сквозной фазе; v_2 - скорость стримеров.

Величина C_L может быть рассчитана по значению потенциала на головке канала лидера длиной L_L и радиусом r_L в предположении, что заряд равномерно распределен вдоль его оси (см. например [12, с. 155]):

$$C_L = (4\pi\epsilon_0\epsilon) / \ln(L_L / r_L) \quad (3)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость газа, в котором происходит разряд; $\epsilon_0=0.885 \cdot 10^{-11}$ F/m.

По оценкам авторов [7, с. 102] радиус стримерной головки составляет порядка 1 mm (при длинах стримеров свыше 1 m [7, с. 171]), такое же значение согласно [7, с. 253] имеет “термический” радиус лидера; скорость стримера v_S равна $10^6 - 10^7$ m/s [7, с. 104] и не может быть меньше 10^5 m/s [7, с. 174]. Согласно [12, с. 49], r_L изменятся в процессе роста лидера от 0.1 mm до 2 mm. Тогда из (3) получим, что эквивалентная погонная емкость лидера в сквозной фазе практически равна погонной емкости лидера в начальной фазе и составляет порядка 10 – 30 pF/m.

Из экспериментальных исследований известно, что скорость стримера v_S примерно на порядок превышает скорость лидера (см. например [7, с. 267]). Из сопоставления (1) и (2) видно, что ток в сквозной фазе возрастает по сравнению с током в предыдущих фазах развития лидера примерно как отношение скорости стримера к скорости лидера, т.е. на порядок, что наблюдается в эксперименте [12, с. 103].

Статистическое моделирование “выбора” молнией места удара с учетом развития восходящих лидеров от заземленных объектов. Для того чтобы учесть статистический разброс величины тока молнии, а также зависящих от него уровней ее потенциала и высоты ориентировки на наземные объекты, необходимо провести серию расчетов, учтя все возможные места развития лидерного канала молнии.

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 [14]).

При моделировании процесса “выбора” лидерным каналом молнии места удара важным параметром является его потенциал U_m . Величина U_m пропорциональна I_m , причем согласно [6, с. 172, 185] между I_m и U_m существует связь: $U_m \approx k_U \cdot I_m \cdot Z$ ($k_U \sim 1.7$, $Z \sim 500$ Ohm). Тогда, полагая, что $l_S = U_m / E_{st}$, получим:

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

где I_m [kA]; l_S [m].

Подобно тому, как это было сделано в [4], для учета всех возможных вариантов удара молнии в исследуемую территорию (“область на земле”), разобьем ее площадь (S_G) квадратной сеткой с шагом Δ : в результате получим K_G ячеек площадью $S_{Gk} = S_G / K_G = \Delta^2$. 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 (“область ударов”), 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 [13, с. 66] на основе анализа экспериментальных данных показано, что среднее квадратичное отклонение разброса пробивных напряжений для разрядных промежутков длиной 2 – 30 m мало зависит от их длины и близко к 6 – 7 %. Исходя из этих данных, примем, что разброс времен развития разряда составляет $\epsilon_S = 7\% / 100\% = 0.07$. Будем полагать, что разряд молнии заданного потенциала U_i из j -ого узла “области ударов” может произойти только в те узлы “области на земле”, длительность продвижения к которым лидерного канала $t_{k,j}^i$ не превышает $(1 + \epsilon_S)$ от минимального времени продвижения конструирующих лидеров во все ячейки “области на земле” в данном численном эксперименте. Поражение же всех остальных ячеек в данном численном эксперименте будем считать невозможным, и вероятность этого события для данных ячеек полагаем равной нулю. 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 [16] совпадают в пределах 5-25 %.

Заключение. Описана 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.

Список литературы: 1. *Rakov V.A.* // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. 2010. Vol.4. No.1. P. 80-85. 2. *Cooray V.* Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. 3. *Петров Н., Петрова Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 134—137. 4. *Резицкина М.М.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 5. С. 1—7. 5. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 P. 6. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с. 7. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Из-дво МФТИ, 1997. 320 с. 8. French Standard: Protection of structures and open areas against lightning using ESE air terminals. French Standard NF C 17 102, 1995. 65 p. 9. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 24 с. 10. IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. Geneva: IEC, 2010. 84 p. 11. *Uman M.A.* The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. 12. *Базелян Э.М., Ражанский И.М.* Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с. 13. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 222 с. 14. IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. Geneva: IEC, 2010. 67 p. 15. *Cooray V.,*

Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. P. 296–306. **16.** Акопян А.А. // Труды ВЭИ. 1940. Вып. 36. С. 94—159.

Bibliography (transliterated): **1.** Rakov V.A. // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. 2010. Vol.4. No.1. R. 80-85. **2.** Cooray V. Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. **3.** Petrov N., Petrova G. // ZhTF. 1999. T. 69. Vyp. **4.** S. 134—137. **4.** Rezinkina M.M. // ZhTF. 2008. T. 78. № 5. S. 1—7. **5.** NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. **6.** Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molnii i molniezashhity. M.: Fizmatlit, 2001. 319 s. **7.** Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoj razrjad. M.: Iz-dvo MFTI, 1997. 320 s. **8.** French Standard: Protection of structures and open areas against lightning using ESE air terminals. French Standard NF C 17 102, 1995. 65 p. **9.** RD 34.21.122-87. Instrukcija po ustrojstvu molniezashhity zdanij i sooruzhenij. M.: Jenergoatomizdat, 1989. 24 s. **10.** IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. Geneva: IEC, 2010. 84 p. **11.** Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. **12.** Bazeljan Je.M., Razhanskij I.M. Iskrovoj razrjad v vozduhe. Novosibirsk: Nauka, 1988. 165 s. **13.** Bazeljan Je.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashhity. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 222 s. **14.** IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. Geneva: IEC, 2010. 67 p. **15.** Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. R. 296–306. **16.** Akopjan A.A. // Trudy VJel. 1940. Vyp. 36. С. 94—159.

Поступила (received) 09.02.2014