

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ МОЛНИЕЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Е.И.Сокол**<sup>1</sup>, член-корреспондент НАН Украины, **М.М.Резинкина**<sup>2\*</sup>, докт.техн.наук,  
**О.Л.Резинкин**<sup>1\*\*</sup>, докт.техн.наук, **О.Г.Гриб**<sup>1</sup>, докт.техн.наук, **Е.Е.Светличная**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина,

<sup>2</sup> – Гос. учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины»,  
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.

e-mail: [marinar2@mail.ru](mailto:marinar2@mail.ru).

*Предложена статистическая модель, описывающая электрофизические процессы на последнем этапе продвижения лидерного канала молнии к земле с учетом возможности распространения встречной искры от наземных объектов. В основу данной модели положены экспериментальные данные о скорости движения лидерного канала молнии, напряженностях электрического поля, необходимых для развития лидерных каналов отрицательной и положительной полярностей, погонной проводимости лидерного и стримерного каналов и др. Соот-ветствие данной модели рассматриваемым процессам подтверждено с помощью сравнения результатов расчета вероятностей мест поражения высоковольтным разрядом земли и находящихся на ней объектов с известными экспериментальными данными. Библ. 15, рис. 2.*

**Ключевые слова:** лидерный канал молнии, электрофизические процессы, статистическая модель, вероятность поражения молнией, молниеотвод.

**Введение.** Экспериментальные исследования процессов, связанных с продвижением лидерного канала молнии к земле и “выбором” места удара, представляют существенные трудности. В настоящее время проводятся эксперименты по искусственному инициированию молний путем запуска ракет, увлекающих за собой заземленный токопроводящий трос в грозовое облако [12]. Однако параметры инициируемых в ходе данных экспериментов молний отличаются от параметров естественных нисходящих молний [7, с. 150]. Подобные эксперименты не могут быть использованы для определения вероятного места удара, поскольку путь разряда молнии определяется локализацией троса, подсоединенного к ракете.

Учитывая вышеизложенное, широкое распространение получило физическое и математическое моделирование процесса образования и развития канала молнии с целью нахождения вероятностей мест поражения наземных объектов. 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 ограничено. Такая ситуация привела к разработке математических моделей, описывающих процессы удара молнии в наземные объекты. Упрощенные модели – так называемый электрогеометрический метод и родствен-ный ему Rolling Sphere Model – положены в основу нормирования зон защиты молниеотводов, на-пример, в США [11].

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 (например, [4]), 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, предусматривающий испытания так на-зываемых активных молниеотводов, принцип действия которых предположительно основан на гене-рировании встречных лидеров. Подобный стандарт введен и в Испании. Однако оговоренные в этих документах испытания не позволяют в полной мере учесть электрофизические процессы, сопровож-дающие возникновение и продвижение восходящих лидеров, и оценить различия защитных свойств различных молниеотводов в условиях грозовой обстановки.

Целью данной статьи является описание 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.

**Экспериментальные данные о лидерном канале молнии, используемые при определении вероятности поражения исследуемой зоны.** Существующие нормативные документы [6, 9] предусматривают определение вероятности поражения объектов молнией. Однако подходы к оценке риска поражения молнией объекта, описанные, например, в [9], являются упрощенными и не позволяют учитывать различие вероятности прорыва на объекты молний, лидеры которых несут к земле различные потенциалы.

Согласно существующим данным, в средних широтах большая часть разрядов молний, развивающихся от облака к земле, имеют отрицательную полярность [4]. Экспериментальные исследования показывают, что напряженность электрического поля (ЭП), требуемая для развития лидера отрицательной полярности, составляет около  $E_{st-} \approx 10^6$  В/м, положительной –  $E_{st+} \approx 0.5 \cdot 10^6$  В/м [4], условие начала электрического пробоя в воздухе при нормальных условиях – достижение напряженности ЭП  $E_c \approx 3 \cdot 10^6$  В/м [4]. Согласно [4] (из энергетических соображений) лидерный канал не может возникнуть, если превышение потенциала его головки над потенциалом внешнего ЭП в месте ее нахождения меньше, чем  $U_{cr} \approx 300-400$  кВ.

На основе анализа экспериментов по пробое длинных воздушных промежутков авторами [5] 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  $E_{st-}$  [5] и, поскольку выполняется условие  $E_{st+} < E_{st-}$ , становится возможным развитие встречных положительных лидеров. Таким образом, если условия возникновения разряда от заземленного объекта выполнены, т.е. напряженность ЭП в окрестности объекта превышает  $E_c$ , то от данного объекта будет развиваться встречный восходящий разряд по направлению к нисходящему лидеру молнии. Из аналитического решения для проводящего шара в однородном электрическом поле известно, что на его поверхности напряженность ЭП увеличивается до трех раз. Поскольку  $E_c \approx 3 \cdot E_{st-}$  и  $E_{st+} \approx 2 \cdot E_{st-}$ , можно полагать, что при касании стримерной зоной отдельно расположенных стержневых объектов типа молниеотводов, на вершинах которых превышение напряженности ЭП будет больше, чем на вершине шара, условия возникновения встречных лидеров будут заведомо выполняться.

Рассмотрим, в чем состоит отличие характера 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 [5]. 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<sup>0.5</sup>).

Одним из подтверждений взаимосвязи между током лидера и его скоростью является наблюдаемое в экспериментах существенное замедление лидерного канала, скорость движения которого в сквозной фазе не увеличивалась, а оставалась такой же, как в начальной – порядка  $10^4$  м/с, если в разрядную цепь подключали сопротивление  $10^6$  Ом и более, в результате чего ток через разрядный промежуток существенно уменьшался [5].

В сквозной фазе наблюдается резкое (на порядок и более) увеличение тока в канале пробоя [3]. По мнению авторов [3] в сквозной фазе в дополнение к току смещения

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

где  $C_L$ ,  $\Phi_L$  – 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 [3] 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 по-

рядка  $6 \cdot 10^{-10}$  Кл, причем, скорость движения стримеров могла превышать  $10^7$  м/с, длина стримеров  $L_S$  примерно равна  $L_S \approx U_m / E_{cr}$  (где  $U_m$  – потенциал лидерного канала молнии). Следует учитывать, что ток проводимости стримеров пренебрежимо мал из-за их чрезвычайно высокого сопротивления [3]: согласно [2], погонная проводимость стримера в холодном воздухе имеет порядок  $10^{-10}$  См·см.

Таким образом, можно полагать, что ток лидера в сквозной фазе определяется током переноса стримерных головок, а значит, прямо пропорционален скорости стримеров [3]

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

где  $C_L$  – эквивалентная погонная емкость лидера в сквозной фазе;  $v_S$  – 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 [3]

$$C_L = 4\pi\epsilon_0\epsilon \ln^{-1}(L_L / r_L), \quad (3)$$

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

По оценкам авторов [5] радиус стримерной головки составляет порядка 1 мм (при длинах стримеров свыше 1 м), такое же значение согласно [5] имеет “термический” радиус лидера; скорость стримера  $v_S$  равна  $10^6$ – $10^7$  м/с и не может быть меньше  $10^5$  м/с. Согласно [3],  $r_L$  изменятся в процессе роста лидера от 0.1 мм до 2 мм. 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 пФ/м.

Из экспериментальных исследований известно, что скорость стримера  $v_S$  примерно на порядок превышает скорость лидера [5]. Сопоставляя (1) и (2), видим, 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 [3].

Согласно [7], средняя скорость ступенчатых нисходящих отрицательных лидеров в соответствии с данными различных авторов находится в пределах  $1.3 \cdot 10^5$  –  $3.36 \cdot 10^5$  м/с, минимальная зафиксированная скорость –  $6 \cdot 10^4$  м/с, максимальная –  $2.6 \cdot 10^6$  м/с. В [7] приводятся также экспериментальные данные об уровнях скорости восходящих лидеров от находящихся на земле объектов: от  $10^4$  м/с до  $1.4 \cdot 10^6$  м/с и результаты одновременного измерения скоростей нисходящих и восходящих лидеров, показывающие, что эти скорости коррелируют между собой.

**Статистическое моделирование “выбора” молнией места удара с учетом возможности развития восходящей искры 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, поэтому существуют систематизированные экспериментальные данные о распределении вероятностей появления молнии с определенной величиной разрядного тока [10].

В [15] 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 [7] 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 [2–5] напряженность ЭП, необходимая для развития отрицательного стримера, полагается равной  $E_{st-}$ .

В большинстве литературных источников, а также в нормативных документах [4, 10, 15] зависимость между  $I_m$  и  $l_S$  представляют в виде

$$l_S = a \cdot I_m^b, \quad (4)$$

где  $I_m$  [кА],  $l_S$  [м];  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, величины которых в различных источниках полагаются равными:  $a$  – от 1.9 до 10,  $b$  – от 0.65 до 0.9 [7, 15].

При моделировании процесса “выбора” лидерным каналом молнии места удара важным параметром является его потенциал  $U_m$ .

Величина  $U_m$  пропорциональна  $I_m$ , причем согласно [4]  $U_m \approx k_U \cdot I_m \cdot Z$  ( $k_U \approx 1.7$ ,  $Z \approx 500$  Ом). Тогда, полагая, что  $l_S = U_m / E_{st-}$ , получим

$$l_S \approx 0.8 \cdot I_m. \quad (5)$$

Аналогичный подход к определению величины расстояний, с которых начинается ориентировка отрицательных лидеров молнии, используется в [8]:  $l_S = 1.9 \cdot I_m^{0.9}$ , где  $I_m$  [кА];  $l_S$  [м], хотя при этом напряженность ЭП в промежутке “лидер – земля” полагалась равной  $E_{st+}$ .

Подобно тому, как это было сделано в [13,14], для учета всех возможных вариантов удара молнии в исследуемую территорию (“область на земле” – 1 на рис. 1) разобьем ее площадь ( $S_G$ ) квадратной сеткой с шагом  $\Delta$ : в результате получим  $K_G$  ячеек площадью  $S_{Gk} = S_G / K_G = \Delta^2$ . Будем полагать,

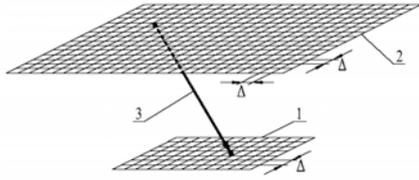


Рис. 1.

что вероятность поражения ячейки обратно пропорциональна времени продвижения лидерного канала молнии до соответствующего ей узла. Каждому узлу ставится в соответствие определенная высота, равная высоте расположенного в данном месте исследуемой территории объекта (например, здания или молниеотвода). Это позволяет учесть при моделировании уменьшение расстояния от нисходящего лидерного канала молнии до отдельных частей объекта, имеющих ненулевую высоту, а значит более раннее начало процессов развития встречных искровых каналов между ними.

Каждый возвышающийся объект, например, холм, здание или расположенный в открытом пространстве трансформатор, разбивается расчетной сеткой, что позволяет учесть влияние высоты отдельных частей объекта и его габаритов на прогнозируемое количество его поражений молнией путем суммирования прогнозируемых ударов во все принадлежащие ему узлы. Наличие впадин, тип грунта, его влажность, а также наличие водных поверхностей в данной модели не учитываются. Поскольку молнии могут ударять в “область на земле” с большей площади, находящейся над ней (“грозовое облако” – 2 на рис. 1), для моделирования всех возможных мест старта нисходящих лидеров молнии увеличим  $S_G$  на  $M_k$  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  $S_{Gk}$ , за исключением молниеотводов, прогнозируемое число попаданий в которые не зависит от площади ячеек.

В [2] 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 к факторам, влияющим на появление разброса, могут относиться вариации момента возникновения лидера, скорости его развития, длины стримеров, напряженности в лидерной и стримерной зонах. Поскольку в основу описываемой модели пробоя положена гипотеза о том, что вероятность поражения узла обратно пропорциональна времени продвижения до него лидерного канала молнии, будем полагать, что разброс пробивных напряжений определяется разбросом данных времен. Исходя из этого, примем, что разброс времен развития разряда такой же, как разброс пробивных напряжений, и 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 “ $k$ ”. Обозначим  $K_j^i$  количество таких узлов для данного численного эксперимента, моделирующего удар молнии с потенциалом  $U_i$  из узла  $j$ .

Учитывая, что в данном численном эксперименте может быть только один удар молнии, будем понимать под  $P_{k,j}^i$  плотность 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 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 отличаются не более чем на  $\varepsilon_S$ , то плотности вероятности поражения каждого из этих узлов одинаковы.

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

$$KP_{k,j}^i = 1 - \text{Int}\left\{\frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i - 1/[t_{j\min}^i \cdot (1 + \varepsilon_S)]}\right\} = 1 - \frac{1 + \varepsilon_S}{\varepsilon_S} \cdot \text{Int}\left\{\frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i}\right\}, \quad (6)$$

где Int соответствует операции усечения числа до его целой части, например,  $\text{Int}(1.2)=1$ ,  $\text{Int}(0.2)=0$ .

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

$$P_{k,j}^i = KP_{k,j}^i \cdot K_j. \quad (7)$$

Коэффициент  $K_j$  получим из условия равенства единице вероятности поражения одного или нескольких из  $K_G$  узлов “области на земле” в данном численном эксперименте

$$\sum_{k=1}^{K_G} P_{k,j}^i = K_j \cdot \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i = 1. \quad (8)$$

Тогда

$$K_j = 1 / \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i. \quad (9)$$

Зная, что  $P_i$  – вероятность появления молнии с током, меньшим  $I_i$  (например, [10]), 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

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

где  $N_m$  – среднегодовое число ударов молнии в 1 км<sup>2</sup> земной поверхности в данной географической зоне (например, [4,15]);  $M$  – число интервалов, на которое разбит диапазон изменения тока молнии, причем  $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$ ;  $K_S$  – число ячеек в области “грозовое облако” (рис. 1);  $\Delta^2$  – площадь ячейки, м<sup>2</sup>.

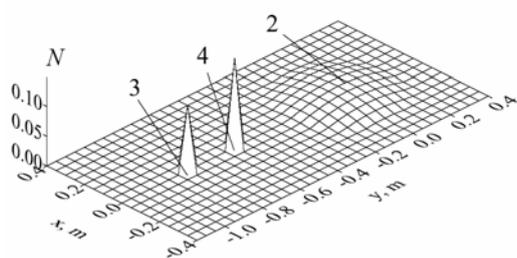
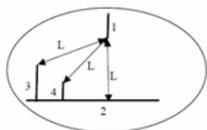
Время продвижения нисходящего лидерного канала от  $j$ -ого узла “грозового облака” до  $i$ -ого узла “области на земле” рассчитывается следующим образом:

$$t_{k,j}^i = (L_{k,j} - l_S^i) / v_{0L\downarrow}^i + l_S^i / (v_{L\downarrow}^i + v_{L\uparrow}^i), \quad (11)$$

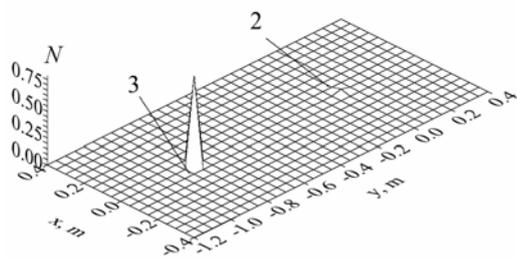
где  $L_{k,j}$  – расстояние между  $i$ -м узлом “области на земле” и  $j$ -м узлом “грозового облака” в начале процесса движения из него лидерного канала молнии;  $l_S^i$  – высота ориентировки молнии с потенциалом  $U_i$ , лидерный канал которой движется из  $j$ -ого узла “грозового облака”;  $v_{0L\downarrow}^i$ ,  $v_{L\downarrow}^i$  – соответственно скорости нисходящих лидерных каналов молнии с потенциалом  $U_i$  до и после начала сквозной фазы;  $v_{S\uparrow}^i$  – скорость восходящей искры от наземных объектов для молнии с потенциалом  $U_i$ . В том случае, когда условия возникновения и развития восходящего лидера не выполняются,  $v_{S\uparrow}^i$  в (11) полагается равной нулю. Эти условия выполняются, когда стримерная зона лидерного канала молнии касается рассматриваемого узла.

**Сравнение экспериментальных и расчетных данных по месту разряда в длинных воздушных промежутках.** Для сравнения вероятности поражения высоковольтным разрядом рассматриваемых заземленных объектов, когда условия развития от них встречной искры выполняются или не выполняются, рассмотрим системы, описанные в [1]. Несмотря на то, что данные исследования были выполнены 75 лет назад, они по-прежнему представляют ценность, ведь именно на их основе

разработана «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений» [6] – нормативный документ, регламентирующий зоны защиты молниеотводов, и до сих пор используемый в странах СНГ. Молниеотводы, параметры которых выбирались на основе [6], прошли многократную и многолетнюю проверку. Еще одним аргументом для использования данных [1] для сравнения с результатами расчетов вероятности места пробоя является то, что в [1] описаны экспериментальные исследования при приложении к одной и той же электродной системе напряжения положительной и отрицательной полярности. Это позволяет проверить адекватность описания предложенной моделью процессов пробоя при наличии и отсутствии встречной искры от заземленных объектов. Подобных исследований, имеющих столь же большие объемы выборки, найти не удалось.



a)



b)

рис. 2.

Почти все эксперименты, результаты которых приведены в [1], были проведены при приложении к имитирующему лидерный канал молнии высоковольтному электроду напряжения положительной полярности. Для обоснования такого подхода в [1] приводятся сравнительные данные о местах пробоя при подаче на высоковольтный электрод импульсного напряжения положительной и отрицательной полярностей 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 ([1, фиг. 1, а]) примерно 80 % всех разрядов поражает плоскость:  $\sum N_2 \approx 0.80$ , для электрода 3 –  $N_3 \approx 0.08$  и для электрода 4 –  $N_4 \approx 0.12$  (где  $N_2$ ,  $\sum N_2$  – доли попадания высоковольтных разрядов в ячейки на заземленной плоскости и во все ячейки на заземленной плоскости соответственно,  $N_3$ ,  $N_4$  – доли попадания высоковольтных разрядов в 3-й и 4-й заземленные электроды соответственно). При определении  $\sum N_2$  суммировались все вероятные пробои во все ячейки плоскости, поэтому, несмотря на то, что  $N$  на рис. 2, а для отдельных ячеек плоскости меньше, чем для стержневых молниеотводов, суммарная вероятность пробоев на плоскость существенно больше ( $\sum N_2 > N_3$ ,  $\sum N_2 > N_4$ ). Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие данные: плоскость –  $\sum N_2 = 0.76$ , электрод 3 –  $N_3 = 0.10$ , электрод 4 –  $N_4 = 0.14$  (рис. 2, а).

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

Из экспериментов следует, что при приложении к высоковольтному электроду напряжения отрицательной полярности, когда от объекта 3 может развиваться встречная искра, примерно  $N_3 \approx 0.85$  разрядов поражает электрод 3 и  $\sum N_2 \approx 0.15$  – плоскость ([1, фиг. 1, б]). Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие результаты: электрод 3 –  $N_3 = 0.84$ , плоскость под высоковольтным электродом 2 –  $\sum N_2 = 0.16$  (рис. 2, б). При моделировании полагалось, что от заземленного объекта 3 будет развиваться встречная искра положительной полярности, поскольку для ее развития 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 ЭП, ослабленного из-за наличия объекта 3. Как следует из [1], в эксперименте встречная искра тоже развивается только от объекта 3.

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

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 [1] совпадают в пределах  $5 - 25$  %.

### **Заключение.**

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 процессов 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 полярностей. Сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными показало их совпадение в пределах  $5 - 25$  %.

1. Акоюн А.А. Исследование защитного действия молниеотводов // Труды ВЭИ. – 1940. – Вып. 36. – С. 4 – 159.
2. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 222 с.
3. Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 165 с.
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с.
5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – Москва: Из-дво МФТИ, 1997. – 320 с.
6. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 24 с.
7. Cooray V. Lightning Protection. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1036 p.
8. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. The lightning striking distance – Revisited // J. Electrostatics. – 2007. – No 65. – Pp. 296–306.
9. IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. – Geneva: IEC, 2010. – 84 p.
10. IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. – Geneva: IEC, 2010. – 67 p.
11. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. – 108 p.
12. Rakov V.A. Parameters of Rocket-Triggered Lightning // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 4. – No 1. – Pp. 80–85.
13. Rezinkina M.M., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. Mathematical Description of Leader Channel Propagation for Selection of Model Experiment Parameters and Lightning Guard System // Technical physics. – 2007. – Vol. 52. – No 8. – Pp. 1006–1010.
14. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects // Technical physics. – 2008. – Vol. 53. – No 5. – Pp. 533–539.
15. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 240 p.

УДК 621.316.98

### **СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ УРАЖЕННЯ БЛИСКАВКОЮ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Є.І.Сокол<sup>1</sup>, член-корреспондент НАН України, М.М.Резинкіна<sup>2</sup>, докт.техн.наук, О.Л.Резинкін<sup>1</sup>, докт.техн.наук, О.Г.Гриб<sup>1</sup>, докт.техн.наук, О.Є. Світлична<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна.

<sup>2</sup> Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України»,  
вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна. e-mail: [marinar2@mail.ru](mailto:marinar2@mail.ru).

Запропоновано статистичну модель, що описує електрофізичні процеси на останньому етапі просування лідерного каналу блискавки до землі з урахуванням можливості появи зустрічної іскри від наземних об'єктів. В основу даної моделі покладено експериментальні дані про швидкість руху лідерного каналу блискавки, напруженості електричного поля, необхідні для розвитку лідерних каналів негативної та позитивної полярностей, погонну провідність лідерного та стримерного каналів та ін. Відповідність даної моделі розглянутим процесам підтверджено за допомогою порівняння результатів розрахунку імовірностей місць ураження високовольтним розрядом землі та розташованих на ній об'єктів з відомими експериментальними даними. Бібл. 15, рис. 2.

**Ключові слова:** лідерний канал блискавки, електрофізичні процеси, статистична модель, імовірність ураження блискавкою, блискавковідвід.

## STATISTICAL MODEL FOR DETERMINATION OF PROBABILITY OF LIGHTNING STROKES TO GROUND OBJECTS

E.I. Sokol<sup>1</sup>, M.M. Rezinkina<sup>2</sup>, O.L. Rezinkin<sup>1</sup>, O.G. Gryb<sup>1</sup>, E.E. Svetlichnaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Frunze st., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine,

<sup>2</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine»,  
Industrialna st., 19, Kharkiv, 61106, Ukraine. e-mail: [marinar2@mail.ru](mailto:marinar2@mail.ru).

A statistical model describing the electrical physical processes in the last stage of propagation of lightning leader channel to the ground, taking into account the possibility of appearance the ascending sparks from ground objects has been proposed. Experimental data on the speed of the lightning leader channel, the electric field strengths necessary for development of leader channels of negative and positive polarity, specific linear conductivity of the leader and streamer channels, etc. are laid in the basis of the model. Compliance of this model with the investigated process has been validated by comparison of the results of calculation of probabilities of places of high-voltage discharge strikes to the earth and located on it objects with known experimental data. References 15, figures 2.

**Key words:** leader channel of lightning, electrical physical processes, statistical model, probability of lightning stroke, lightning rod.

1. Akopian A.A. Investigation of the protective action of lightning rods // Trudy Vsesoiuznogo Elektrotekhnicheskogo Instituta. – 1940. – Vol. 36. – Pp. 94–159. (Rus)
2. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Physical and engineering foundations of lightning protection. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. – 222 p. (Rus)
3. Bazelyan E.M., Rojansky I.M. Spark discharge in the air. – Novosibirsk: Nauka, 1988. – 165 p. (Rus)
4. Bazelyan E.M., Raizer Yu. P. Physics of lightning and lightning protection. – Moskva: Fizmatlit, 2001. – 319 p. (Rus)
5. Bazelyan E.M., Raizer, Yu.P. Spark discharge. – Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Fizicheskogo Tekhnicheskogo Instituta, 1997. – 320 p. (Rus)
6. RD 34.21.122-87. Manual for lightning protection of buildings and structures. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 24 p. (Rus)
7. Cooray V. Lightning Protection. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1036 p.
8. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. The lightning striking distance – Revisited // J. Electrostatics. – 2007. – No 65. – Pp. 296–306.
9. IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. – Geneva: IEC, 2010. – 84 p.
10. IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. – Geneva: IEC, 2010. – 67 p.
11. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. – 108 p.
12. Rakov V.A. Parameters of Rocket-Triggered Lightning // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 4. – No 1. – Pp. 80–85.
13. Rezinkina M.M., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. Mathematical Description of Leader Channel Propagation for Selection of Model Experiment Parameters and Lightning Guard System // Technical physics. – 2007. – Vol. 52. – No 8. – Pp. 1006–1010.
14. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects // Technical physics. – 2008. – Vol. 53. – No 5. – Pp. 533–539.
15. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 240 p.

Надійшла 27.11.15  
Остаточний варіант 24.12.15