

04;12

## Статистическая модель процесса ориентировки лидера молнии на наземные объекты

© М.М. Резинкина, В.В. Князев, В.И. Кравченко

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт „Молния“  
Национального технического университета „Харьковский политехнический институт“,  
61013 Харьков, Украина  
e-mail: marinar@kpi.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 12 января 2005 г.)

На основе анализа данных известных экспериментальных исследований процессов, происходящих при пробое длинных воздушных промежутков и при распространении лидерного канала молнии, предложена статистическая модель процесса ориентировки канала молнии на наземные объекты. Данная модель позволяет оценить вероятность перехвата молнии молниеотводом и прорыва на защищаемые объекты. Приведены примеры расчета зон вероятностей попадания молнии в молниеотвод, а также прилегающие к нему территории.

### Введение

В настоящее время зоны защиты молниеотводами объектов, высота которых не превышает 150 м, определяются согласно требованиям руководящих документов [1]. Однако существующие методы определения зон защиты молниеотводов не позволяют в полной мере учесть весь комплекс явлений, влияющих на процесс молниезащиты. Наличие ряда объектов, например стартовые ракетные комплексы, нефтехранилища, поражение которых молнией может привести к большим материальным потерям, а также техногенным катастрофам, вызывает необходимость разработки моделей, позволяющих более точно оценить вероятность прорыва на них молнии. Такие модели необходимы также при оценке эффективности новых средств молниезащиты.

Вследствие трудностей, с которыми приходится сталкиваться при исследовании молнии в естественных условиях, большое количество работ по данной тематике посвящено математическому и физическому моделированию процессов, сопровождающих развитие молний. В ряде работ, например [2–4], приводятся расчеты распределений электростатических полей в окрестности молниеотводов и других объектов в условиях грозовой обстановки. При расчетах, как правило, принимаются следующие уровни критической напряженности:  $E_c = 30 \text{ kV/cm}$  — напряженность появления короны,  $E_{cr}^- = 10 \text{ kV/cm}$  и  $E_{cr}^+ = 5 \text{ kV/cm}$  — напряженности, при которых происходит развитие отрицательного и положительного лидеров. В [5] предложена модель развития молнии, использующая фрактальный подход для описания стохастических процессов ее распространения в трех измерениях. Однако при этом не учитываются флуктуация таких важных параметров, как скорость распространения лидера, потенциал его головки, напряженность внешнего поля и др. Авторы не рассматривали также процессы попадания молнии в наземные объекты. В [6] описывается использование так называемой электрогеометрической модели молнии. Данная

модель предполагает наличие функциональной зависимости между максимальным уровнем амплитуды тока молнии и  $r$  — длиной, на которую происходит удлинение канала молнии при очередном продвижении ее ступени. При этом пространственная ориентация ступеней молнии определяется статистическим распределением, параметры которого зависят от расстояния до земли. Полагается, что полный канал разряда сформирован, когда какой-либо объект или земля располагаются от уже сформированного неполного канала пробоя на расстоянии, меньшем  $r$ . Ограниченностью такого подхода является неучет влияния распределения электрического поля на направление и скорость продвижения лидера молнии. Описана также двумерная фрактальная модель распространения ступенчатого лидера молнии к земле и развития от земли встречного лидера [7]. Ограничения на практическое использование данной модели накладывает ее преимущественно качественный характер. В [8] теория фракталов применена для описания процессов развития высоковольтных разрядов, направленных к ионосфере. В [9] приведены результаты математического моделирования с помощью теории фракталов места удара молнии в наземные объекты, молниеотводы и землю при различных полярностях молнии, различных углах ее приближения к земле, различной топологии поверхности земли, различном соотношении высоты и ширины зданий, а также наличии у них областей локального усиления электрического поля, например фронтонов. При этом вероятность пробоя определяется через напряженность электрического поля  $p \sim E^\eta$ . Однако методика выбора величины  $\eta$ , от которой существенно зависит характер развития канала молнии, в статье не оговорена.

Еще одна, основанная на теории фракталов стохастическая модель развития стримеров и лидера в длинных разрядных промежутках, описана в [10]. При разработке модели полагалось, что стримеры зарождаются случайным образом, причем скорость их распространения зависит от напряженности электрического поля. Вычислялось среднее время распространения всех стримеров

и считалось, что расти будут лишь те стримеры, время распространения которых не меньше этого среднего времени. Направление распространения лидера определялось как наиболее вероятное, причем данная вероятность зависела от уровня напряженности электрического поля. К недостаткам данной модели можно отнести то, что она выполнена в двумерной постановке, не ясны также условия на границах расчетной области и ее габариты. Согласно данным Э.М. Базеляна и Ю.П. Райзера, на работы которых ссылаются авторы данной модели, не только скорость стримера, но и скорость лидера зависит от разности между потенциалом головки и потенциалом в точке, куда он продвигается (см., например, [11]). В модели же скорость лидера полагается постоянной и равной  $10^4$  м/с, в то время как уровень приложенного напряжения, принимаемого равным напряжению лидерного канала, изменялся от 480 до 790 кВ. Не дано также четкое обоснование алгоритмов выбора величины временного шага при развитии стримеров и вероятности распространения лидера. Так, величина показателя в степенной зависимости вероятности пробоя от напряженности электрического поля не приводится. Не понятно также, как учтено время распространения лидера, которое существенно больше времени распространения стримеров. Физические процессы, описываемые в [10], а также приведенные авторами данные по их экспериментальной проверке имеют лишь косвенное отношение к процессам развития лидерного канала молнии, поскольку оперируют с длинами промежутков, на три порядка меньшими, чем для молнии, и на два-три порядка меньшими напряжениями.

Исходя из вышеизложенного, для решения проблем практической молниезащиты представляется целесообразным разработать математическую модель, описывающую стохастический процесс продвижения лидерного канала молнии на завершающем этапе его развития при приближении к земле. При этом необходимо учесть зависимость скорости продвижения канала лидера от напряженности электрического поля, характер распределения трехмерного поля в окрестности молниеотвода и защищаемых объектов, снижение сопротивления стримеров в сквозной фазе, величину сопротивления растеканию системы заземления исследуемых объектов.

В настоящее время в мире накоплено большое количество экспериментальных данных по электрофизическим характеристикам длинных искр и молний, а также зонам защиты одиночных молниеотводов. Эти данные были положены в основу разрабатываемой модели.

## 1. Известные экспериментальные данные, положенные в основу модели

Согласно [11], притяжение молнии к наземному объекту вызвано его влиянием на распределение электрического поля, то же относится к электрическому полю облака, которое ориентирует лидер, направляя его в

среднем вниз, к земле. Механизм действия столь слабых внешних полей ( $E_0 \sim 100$  В/см) на движение лидера молнии, напряженность поля которого составляет для положительного лидера не менее  $E_{cr}^+ = 5$  кВ/см и для отрицательного лидера не менее  $E_{cr}^- = 10$  кВ/см, объясняется там же следующим образом. Скорость лидера определяется разностью потенциалов лидерной головки  $U_h$  и внешнего поля  $U_0$  в месте ее нахождения. Огромный перепад

$$\Delta U = |U_h - U_0| \sim 10 - 100 \text{ MV}$$

на сравнительно короткой длине стримерной зоны и создает в ней нужное для развития стримеров, а за ними и лидера поле  $E_L \approx 5 - 10$  кВ/см  $\gg E_0$ . Авторы [11] полагают, что внешнее поле задает лидеру ускорение или замедление. Скорость лидера — это некая функция абсолютной величины перепада напряжения у головки  $v_L = f(\Delta U)$ , причем  $U_0$  в выражении для  $\Delta U$  является функцией радиус-вектора головки  $r$ . В [11] приведена эмпирическая формула, связывающая скорость лидера  $v_L$  и напряжение на его головке,

$$v_L \approx a \cdot U_h^{1/2}. \quad (1)$$

Поскольку  $V_0 \ll U_h$ , можно принять, что  $\Delta U \approx U_h$  и использовать аппроксимацию  $v_L \sim |\Delta U|^\gamma$  ( $\gamma = 1/2$ ). В результате получено выражение для ускорения лидера в виде [11]

$$\begin{aligned} \frac{dv_L}{dt} &= \pm \frac{dv_L}{d\Delta U} \left( -\frac{dU_h}{dt} + \frac{dU_0}{dr} \frac{dr}{dt} \right) \\ &= \pm \gamma \frac{v_L}{\Delta U} \left( -\frac{dU_h}{dt} - \mathbf{E}_0 \mathbf{v}_L \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где знак „плюс“ относится к отрицательному лидеру: а „минус“ — к положительному.

Второе слагаемое в (2) ведет к ускорению отрицательного лидера, если он движется в направлении, обратном вектору поля. По величине ускоряющее действие внешнего поля тем больше, чем выше его уровень и чем меньше угол между направлениями поля и скорости.

При мгновенном замыкании на землю линии, которой может быть представлен заряженный канал продвигавшегося к земле лидера, разрядный ток через замкнутый конец должен также достигать амплитудного значения мгновенно, причем амплитуда тока не зависит от величины активного сопротивления лидерного канала, а лишь от его волнового сопротивления. В действительности же ток главной стадии нарастает несколько микросекунд, а иногда и десятки микросекунд. Такое сравнительно медленное нарастание тока молнии авторы [11] объясняют свойствами коммутатора, в роли которого выступает стримерная зона нисходящего лидера. В соответствии с данным подходом скорость нарастания тока и длительность фронта импульса тока у земли определяются процессами не в канале бывшего лидера, а в его исчезающей стримерной зоне. Косвенным

подтверждением этого авторы [11] считают тот факт, что у положительных молний с более длинной, чем у отрицательных, того же напряжения стримерной зоной длительность фронта в несколько раз больше. Такого же мнения придерживается В.А. Раков, указывая, что процессы в сквозной фазе, формирующей фронт тока молнии, определяются импедансом плазменного переключателя у точки подсоединения молнии [12]. Таким образом, стримерная зона лидера, которая исполняет роль коммутатора, обладает конечным сопротивлением и сокращается в течение конечного времени. Крутизна фронта импульса тока определяется скоростью уменьшения сопротивления этого переходного звена между лидерным каналом и землей. Длительность же самого импульса определяется длиной канала, по которому распространяется волна главной стадии.

Согласно [11], в сквозной фазе, которая начинается при касании стримерной зоны электрода противоположной полярности (земли или заземленного объекта в случае молнии), заряды стримеров уходят из промежутка через его поверхность. При этом скорость стримеров по мере сокращения стримерной зоны резко возрастает. Этот крутой подъем тока, который длится несколько микросекунд, предшествует току главной стадии. Последняя начинается, когда электрода коснется лидерный канал.

В [13] анализируются процессы развития импульсного пробоя в длинных (до 29 м) промежутках стержень-плоскость при приложении к ним положительного напряжения. Там отмечается, что лидер состоит из отшнурованного плазменного канала и веерообразной стримерной зоны (зоны ионизации), занимающей некоторый объем перед каналом и питающей его. Канал выносит потенциал электрода и соответственно область высокой напряженности электрического поля в глубину промежутка, чем и обеспечивается развитие лидера. Скорость перемещения головки стримера на порядок больше скорости перемещения головки канала лидера. Авторы [13] выделяют два основных этапа развития пробоя в длинных промежутках. Первый этап — от момента возникновения короны до соприкосновения внешней границы стримерной зоны лидера с противоположным электродом. На втором (сквозном) этапе развития стримерная зона достигает противоположного электрода и по мере роста длины канала лидера ее длина сокращается. При этом плотность стримеров в стримерной зоне, скорости стримеров  $v_{st}$  и лидеров  $v_L$ , а также разрядный ток  $i_p$  растут по мере сокращения длины стримерной зоны (примерно на порядок по сравнению с ее началом), а сопротивление стримеров падает.

Погонное сопротивление по длине стримеров составляет порядка  $10^{12} \Omega/\text{m}$  [14]. Практически это означает, что в процессе пролета стримера по промежутку, длящегося  $10\text{--}20 \mu\text{s}$ , головка канала стримера теряет гальваническую связь с точкой старта. Погонное сопротивление лидера  $RP_L$  составляет  $10 \Omega/\text{m}$  [11]. Видимо, погонное сопротивление каналов разряда в сквозной

фазе  $RP_F$  представляет собой некоторую переходную величину между погонными сопротивлениями стримера и лидера. Оценку для  $RP_F$  можно сделать из следующих соображений. Согласно результатам экспериментальных исследований, описанных в [13], характер развития разряда начинается в сквозной фазе существенно зависит от величины внешнего сопротивления  $R_0$ , включенного в разрядную цепь между источником высокого напряжения и разрядным промежутком. Так, в условиях эксперимента, описанного в [13], при сравнительно небольшом  $R_0$  ( $R_0 < 10^3 \Omega$ ) значения скоростей и тока следующие:  $v_{st} = 5 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ ,  $v_L = 10^6 \text{ m/s}$ ,  $i_p = 10^3 \text{ A}$ , а длительность сквозной фазы не превышает десятка микросекунд. При большом внешнем сопротивлении  $R_0 > 10^5 \Omega$  сквозная фаза может быть растянута на тысячи микросекунд, а скорости стримеров и лидеров, а также разрядный ток могут уменьшаться до следующих значений:  $v_{st} = 10^5 \text{ m/s}$ ,  $v_L = 10^3 \text{ m/s}$ ,  $i_p = 1 \text{ A}$ . Таким образом, в сквозной фазе, когда начинается гальваническое замыкание разрядной цепи, включенные последовательно сопротивление стримерной зоны и внешнее сопротивление играют роль делителя напряжения. Видимо, при  $R_0 < 10^3 \Omega$  основная часть напряжения оказывается приложенной к разрядному промежутку, а при  $R_0 > 10^5 \Omega$  большая часть напряжения прикладывается к  $R_0$ , что приводит к замедлению разрядных процессов в сквозной фазе. Учитывая, что в данном эксперименте длина разрядного промежутка была порядка метров, для средней величины удельного сопротивления каналов стримеров в сквозной фазе может быть использована следующая оценка:  $RP_F^{av} \sim 10^4 \Omega/\text{m}$ .

## 2. Основные идеи и допущения, использованные при построении математической модели, описывающей процесс выбора лидером молнии расположенного на земле объекта

Поскольку большинство лидеров молнии переносит к земле отрицательный заряд (см., например, [15,16]), в дальнейшем речь будет идти об отрицательных молниях, хотя описанная ниже модель продвижения лидера может быть использована также применительно к положительным молниям. Согласно [17], при пробое длинных воздушных промежутков длина стримерной зоны примерно равна той высоте, с которой начинается ориентировка лидера на наземный электрод. Причем это относится как к положительным, так и к отрицательным лидерам. Применим тот же принцип к сверхдлинным искрам — молниям. В соответствии с имеющимися экспериментальными данными из-за большого сопротивления холодной плазмы стримерных каналов головка стримера теряет гальваническую связь с лидером, а множество стримеров образует стримерную зону, распределение электрического поля в которой близко к

равномерному из-за выравнивания поля избыточным зарядом, расположенном в многочисленных головках стримеров [13]. Будем полагать, что так называемый „последний удар“ (last stroke), т.е. последняя ступень движения лидерного канала молнии к земле и расположенным на ней объектам, начинается, когда стримерная зона доходит до них. Причем „последний удар“ представляет собой продвижение в сквозной фазе канала лидера через стримерную зону. Будем полагать также, что именно с этого момента начинается процесс ориентировки лидера молнии на наземные объекты, в которые впоследствии и ударит молния. Под длиной стримерной зоны понимается расстояние от головки лидера, на котором стримеры останавливаются [11,18]. Поскольку при развитии отрицательного лидера наименьшее значение градиента напряжения в стримерной зоне примерно равно  $E_L^- = 10 \text{ kV/cm}$ , высоту зоны ориентировки, равную начальной длине стримерной зоны в сквозной фазе, запишем как

$$L_{st0} \sim U_m/E_L^- \quad (3)$$

Для напряжений молнии  $U_m = 10\text{--}100 \text{ MV}$  высота зоны ориентировки составляет  $10\text{--}100 \text{ m}$ , что примерно согласуется с общепринятыми значениями для данной величины (см., например, [19]).

Через участки земли и заземленные объекты, к которым подключилась стримерная зона после начала сквозной фазы, начинает протекать ток

$$i_F = U_m/(RP_F L_{st} + R_R + R_G), \quad (4)$$

где  $i_F$  — разрядный ток в сквозной фазе,  $RP_F$  — удельное сопротивление каналов стримеров в сквозной фазе,  $R_R$  — сопротивление наземной части молниеотвода,  $R_G$  — сопротивление растеканию тока в земле,  $L_{st}$  — длина стримерной зоны.

В [13] отмечается, что в сквозной фазе развития лидера в длинных воздушных промежутках наблюдается сильное ветвление каналов, причем одновременно развивается несколько параллельных ветвей со своими головками. Будем полагать, что на финальной стадии продвижения молнии к земле имеет место одновременное развитие нескольких конкурирующих лидерных каналов, причем возвратный удар будет происходить по тому из них, который первым достигает узла с нулевым потенциалом. Учитывая, что диаметр канала лидеров на много порядков меньше их длины, а также расстояния между ними, не будем учитывать взаимное влияние электрических полей лидеров друг на друга.

Поскольку лидеры продвигаются в ионизированной стримерной зоне, а процесс их распространения носит стохастический характер, будем последовательно рассматривать все возможные направления распространения лидера. Причем для определения вероятности поражения молнией исследуемых объектов последовательно рассматривается приближение лидера к ним с различных расстояний в аксиальном и азимутальном направлениях, а также под различными углами к вертикальному

направлению. Лидер может иметь различную начальную скорость распространения  $v_{L0} = 10^5\text{--}10^6 \text{ m/s}$  (см., например, [11]), причем величины  $L_{st}$  и  $v_L$  определяются уровнем напряжения головки лидера  $U_m$  (см. (1), (3)), а значит, взаимосвязаны между собой. Таким образом, задаваясь определенным уровнем  $U_m$ , мы имеем определенные значения  $L_{st}$  и  $v_{L0}$ . Разделим данную задачу на две части: полевую и цепную и будем решать ее на каждом временном шаге. Нулевым моментом времени при моделировании будем полагать момент начала сквозной фазы, т.е. момент касания стримерной зоной заземленного узла.

Рассмотрим отдельно сценарий развития лидера в некотором из возможных интересующих нас направлений, например в кратчайшем направлении до молниеотвода или защищаемого объекта, имеющего пространственные координаты  $(x_P, y_P, z_P)$ . Обозначим начальные координаты головки лидера  $(x_L, y_L, z_L)$ . Обозначим начальное расстояние между лидером и рассматриваемым узлом

$$R_{PLO} = \sqrt{(x_P - x_L)^2 + (y_P - y_L)^2 + (z_P - z_L)^2}.$$

Разделив  $R_{PLO}$  на  $N_L$  частей, получим величину шага при численном моделировании процесса продвижений канала молнии  $\Delta d_L = R_{PLO}/N_L$ . Если скорость лидера полагается неизменной, длительность временного шага не меняется

$$\Delta t_i = \text{const} = R_{PLO}/v_L.$$

Если полагать, что движение лидерного канала описывается уравнением (2), т.е. рассматривается ускоренное движение, величину  $i$ -го шага по времени получим в виде

$$\Delta t_i = \left[ \sqrt{(4 \cdot v_L^2(i-1) + 8 \cdot a_i \cdot R_{PLO}) - 2 \cdot v_L(i-1)} \right] / 2a_i,$$

где  $v_L(i-1)$  — скорость лидера на  $(i-1)$ -м шаге,  $a_i$  — ускорение лидера на  $i$ -м шаге.

Тогда для  $n$ -го момента времени  $t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ , которому соответствует определенная конфигурация лидерного канала, рассчитывается распределение напряженности электрического поля. Затем по формуле (2) по вновь найденным величинам потенциалов и напряженностей в окружающем лидер пространстве определяется ускорение движения лидера в  $n$ -й момент времени  $a(n)$ , а по нему его новая скорость  $v(n)$  и новая длина уменьшившейся стримерной зоны  $L_{st}(n) = L_{st0} - n \cdot \Delta d_L$ , поскольку лидер переместился по направлению к рассматриваемому объекту на шаг  $\Delta d_L$ .

Затем выполняется расчет цепи. Полагается, что в сквозной фазе головка лидера подсоединена гальванически к рассматриваемому заземленному узлу через  $R_F = RP_F \cdot L_{st}$  — сопротивление соответствующего стримера из стримерной зоны. При определении разрядного тока учитывается снижение величины  $R_F$  вследствие того, что погонное сопротивление стримера

$RP_F$  обратно пропорционально протекающему через него току, а  $L_{st}$  уменьшается по мере роста лидера.

Согласно [20], зависимость сопротивления искры от тока и времени, предположенная Ромпе и Вайцелем, получена в предположении, что внутренняя энергия разряда полностью затрачивается на процессы ионизации, возбуждение молекул и нагрев электронного газа, а потери энергии на теплопроводность, излучение и расширение канала отсутствуют

$$RP(i, t) = 1 / \sqrt{2a_{RV}/p \int_0^t i^2 dt}, \quad (5)$$

где  $a_{RV}$  — коэффициент, равный для воздуха и азота  $(0.8-1) \text{ atm} \cdot \text{cm}^2/\text{sV}$  [20];  $p$  — давление.

При токе искры порядка нескольких килоампер и более на процесс роста проводимости начинает влиять расширение канала разряда [20]. В этом случае зависимость  $RP(i, t)$  может быть описана аналитически в соответствии с теорией С.И. Брагинского [21], развитой в работе [22],

$$RP(i, t) = 1 / \left[ k_b \cdot \int_0^t i^{2/3} dt \right], \quad (6)$$

где  $k_b = (4\pi\sigma^2/\rho_0\xi)^{1/3}$ ;  $\rho_0$  — плотность газа, в котором происходит разряд;  $\sigma$  — удельная проводимость канала разряда, равная для воздуха  $3 \cdot 10^2 \text{ S/cm}$ ;  $\xi$  — коэффициент ( $\xi = 4.5$ ) [20].

При выводе данной формулы полагалось, что проводимость канала достигает некоторого значения и затем остается постоянной, сопротивление же канала определяется только его расширением. В [23] приводится формула для удельного сопротивления искры, обобщающая выражения (5) и (6),

$$RP(i, t) = 1 / \left\{ k_n \left[ \int_0^t i^\gamma dt \right]^\delta \right\}, \quad (7)$$

где  $k_n, \gamma, \delta, C_1$  — параметры, равные для модели Ромпе–Вайцеля

$$k_n = \sqrt{2a/p}, \quad \gamma = 2, \quad \delta = 0.5, \quad (8)$$

для модели Брагинского

$$k_n = k_b, \quad \gamma = 2/3, \quad \delta = 1. \quad (9)$$

Таким образом, для тока сквозной фазы  $i_F < 10^3 \text{ A}$  при расчете сопротивления стримера в сквозной фазе используются коэффициенты (8) формулы (7), а при  $i_F > 10^3 \text{ A}$  — коэффициенты (9).

При работе модели полагается, что произошло подключение лидерного канала молнии к рассматриваемому узлу, если его коснулся канал лидера или удельное

сопротивление канала подсоединенного к нему стримера упало до величины

$$RP_F = k_F \cdot RP_L, \quad (10)$$

где  $RP_L = 10 \Omega/\text{m}$  — удельное сопротивление лидерного канала;  $k_F$  — коэффициент, который может варьироваться в пределах 1–10; в данном случае полагалось, что  $k_F = 10$ .

Будем полагать, что выполнение условия (10) можно рассматривать как условие превращения стримерного канала разряда в лидерный, поскольку именно низкая проводимость канала стримера определяет отсутствие его гальванической связи с лидерным каналом.

Для описания процесса выбора лидером молнии объекта для удара используем принцип минимальное время — максимальная вероятность. Этот принцип, а также его применение к описанию процессов молниезащиты известен (см., например, [24]). Будем полагать, что вероятность попадания молнии в некоторый узел обратно пропорциональна времени продвижения до него лидера.

Для  $k$ -го варианта сценария движения лидерного канала по описанному выше алгоритму, определяемого величиной  $L_R$  — первоначального расстояния от молниеотвода или объекта до канала лидера в радиальном направлении, углом отклонения лидера от вертикали  $\alpha$ , а также уровнем напряжения лидерного канала  $U_m$ , определяющего значения  $L_{st}$  и  $v_{L0}$ , рассчитывается полное время, необходимое для его подсоединения к  $i$ -му узлу  $t_{ik}$ . Разделим площадь  $S$ , попадание молнии в которую исследуется, на  $N$  частей площадью  $S/N$ . Будем полагать, что вероятность попадания молнии внутри  $S/N$  площадки одинакова и определяется вероятностью попадания молнии в ее средний узел. Для всех  $N$  рассматриваемых наземных узлов подсоединения молнии в данном численном эксперименте рассчитываются величины  $t_{ik}$ , из которых выбирается минимальная  $t_k = \{t_{ik}\}_{\min}$ . Полагается, что разряд молнии может произойти только в те  $M$  узлов, для которых время распространения лидера превышает  $t_k$  лишь в пределах  $\delta = 0.1$ . Величина  $\delta$  определяется разбросом средних величин пробивных напряжений многометровых воздушных промежутков с резко неоднородным полем (см., например, [11]). Для остальных  $(N-K)$  узлов вероятность попадания в них молнии полагается пренебрежимо малой. Таким образом, полагается, что

$$p_{ik} > 0, \text{ если } 1/t_{ik} \geq (1 - k_p) \cdot 1/t_k, \quad (11)$$

$$p_{ik} = 0, \text{ если } 1/t_{ik} < (1 - k_p) \cdot 1/t_k, \quad (12)$$

где  $k_p = \delta = 0.1$  — коэффициент.

Тогда для  $k$ -го эксперимента вероятность разряда молнии в  $i$ -й узел площадью  $S/N$  определяется следующим образом:

$$p_{ik} = (1/t_{ik}) / \sum_{j=1}^M (1/t_{jk}). \quad (13)$$

Проведя подобные расчеты для  $K$  возможных случаев начального расположения лидерного канала относительно рассматриваемых объектов, используя (13), определим вероятность разряда молнии в  $i$ -й узел как

$$p_i = \sum_{k=1}^K p_{ik}/K. \quad (14)$$

Таким образом, проводя численное моделирование по описанному выше алгоритму, можно рассчитать вероятность попадания молнии в исследуемый объект по формуле (14).

### 3. Примеры моделирования процесса выбора лидером молнии места удара

Одним из важнейших параметров молниезащиты является потенциал  $U_m$ , который лидер молнии приносит к земле. Величине  $U_m$  пропорционален ток главной стадии  $I_m$ , вызывающий наибольшие повреждения от удара молнии. Согласно [11], между  $I_m$  и  $U_m$  существует связь

$$U_m \approx Z_m \cdot I_m.$$

Исходя из данных [11],  $Z_m$  лежит в пределах  $Z_m \approx 800-1200 \Omega$ .

Величина тока молнии может быть измерена, поэтому существуют экспериментальные данные о распределении вероятностей появления молнии с определенной величиной разрядного тока. Согласно стандарту [25], с вероятностью 0.95 ток отрицательно заряженной молнии превышает 7 кА с вероятностью 0.995  $I_m \geq 2$  кА (данная величина получена в результате аппроксимации). Будем пользоваться этими значениями как базовыми при проверке адекватности расчета разработанной моделью радиусов зон защиты одиночных молниеотводов, которым соответствуют различные вероятности перехвата молнии. Согласно [1],  $R_M$  — радиус защищаемой зоны стержневого молниеотвода высотой  $h$  при вероятности перехвата  $p = 0.995$  примерно равен  $R_M \approx 1.1 h$ , а при  $p = 0.95$   $R_M = 1.5 h$ . Используем описанный выше алгоритм определения вероятностей удара молнии в различные участки прилегающей к молниеотводу территории для нахождения  $R_M$  при  $p = 0.995$  и 0.95. Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда канал лидера приближается к земле без отклонения лидера от вертикали ( $\alpha = 0^\circ$ ) при максимальном удалении от молниеотвода  $L_R = R_M$  (где  $L_R$  — первоначальное расстояние в радиальном направлении от молниеотвода до канала лидера). На поверхность земли, окружающую молниеотвод, была нанесена квадратная сетка, шаг которой  $\Delta = 5$  см выбирался равным средним габаритам сечения молниеотвода. Проведенные расчеты времен распространения лидера до всех узлов полученной сетки при  $R_M = 1.5 h$  показали, что при  $U_m \geq 8$  МВ

( $I_m \geq 6-10$  кА) вероятность попадания молнии в молниеотвод  $p_M$  равна 1, поскольку времена, необходимые для подсоединения лидера ко всем остальным узлам, превышали  $t_k$  более чем в 1.1 раза. При  $R_M = 1.6 h$  вероятность попадания в молниеотвод молнии с  $U_m \geq 8$  МВ меньше 1. Аналогичные расчеты, проведенные для  $R_M = 1.1 h$  при  $U_m \geq 2.5$  МВ ( $I_m \geq 2-3$  кА), показали, что  $p_M = 1$ , в то время как для  $R_M = 1.2 h$   $p_M < 1$ . На основании вышеизложенного можно заключить, что предложенная модель адекватно рассчитывает максимальные радиусы зоны защиты одиночного молниеотвода в зависимости от величины уровня вероятности перехвата ими молнии.

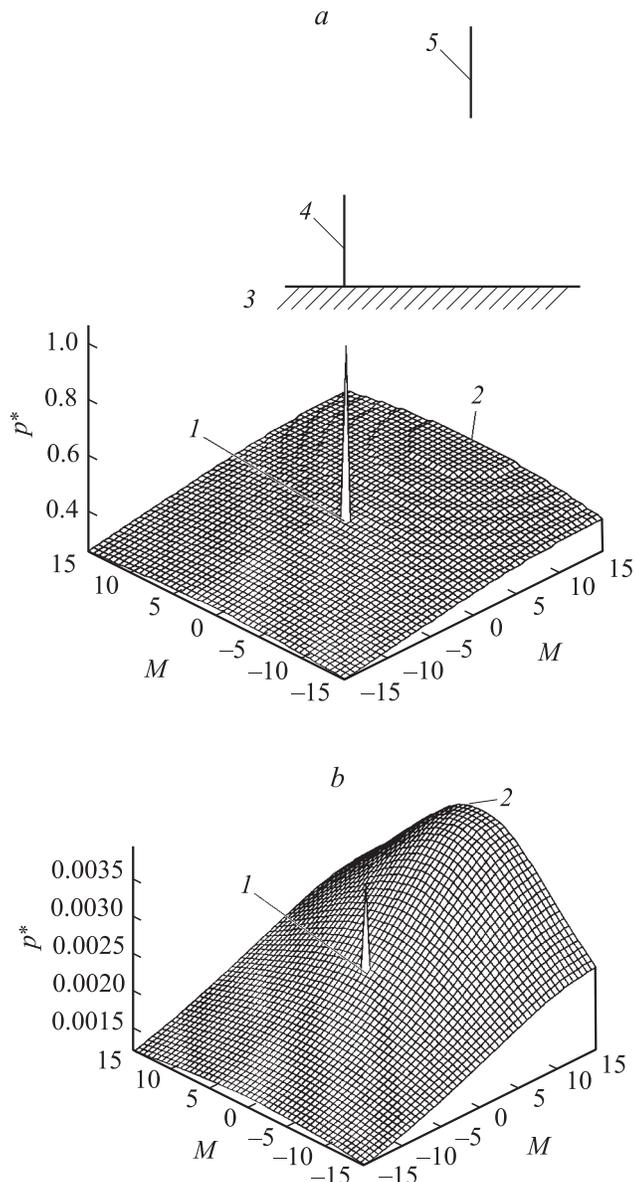
На рисунке приведены результаты численных расчетов с помощью компьютерной программы, основанной на описанной модели. При расчетах полагалось, что высота молниеотвода  $h = 10$  м, радиальное расстояние от молниеотвода до лидера молнии в момент начала ориентировки,  $L_R = 15$  м. На рисунке представлены распределения относительных вероятностей поражения молнией участков поверхности земли, прилегающей к молниеотводу,

$$p_i^* = (1/t_i) / \sum_{j=1}^M (1/t_j), \quad (15)$$

где  $t_i$  — время распространения лидера до узла  $i$ ;  $M$  — количество узлов, для которых  $1/t_i \geq (1 - k_p) \cdot 1/\{t_i\}_{\min}$ .

Причем такие вероятности рассчитывались для всех возможных узлов подсоединения молнии, включая и те, для которых условие  $1/t_i \geq (1 - k_p) \cdot 1/\{t_i\}_{\min}$  может не выполняться. В качестве же базового значения в знаменателе формулы (14) выбрана сумма величин, обратных времени продвижения канала лидера лишь в те  $M$  узлов, для которых  $1/t_i \geq (1 - k_p) \cdot 1/\{t_i\}_{\min}$ . Таким образом, относительная вероятность (15) отличается от абсолютных вероятностей (11), (12) тем, что никакие вероятности не зануляются. Это сделано для визуализации полученных результатов, облегчающей их сравнение и интерпретацию.

Рисунок, *a* соответствует случаю, когда лидер молнии имеет потенциал  $U_m = 50$  МВ, рисунок, *b* —  $U_m = 3$  МВ. На рисунке 1 — место на поверхности земли, где расположен молниеотвод, 2 — место, над которым начинается ориентировка лидера молнии. Как видно, при большом уровне потенциала лидерного канала относительная вероятность его попадания в молниеотвод в 5 и более раз превышает относительные вероятности попадания в окружающую его защищаемую зону. При снижении потенциала молнии до  $U_m = 10$  МВ отличия между относительной вероятностью попадания лидера в молниеотвод  $p_m^*$  и участки земли в защищаемой зоне  $p_z^*$  снижаются (см. рисунок, *b*). Полагается, что вероятность попадания молнии в молниеотвод в первом случае (рисунок, *a*) равна 1, поскольку времена продвижения лидера молнии во все узлы, расположенные на земле, более чем на 10% превосходят время его



Распределение вероятностей поражения молниеотвода и прилегающей к нему территории молнией с потенциалами  $U_m = 50$  (а),  $3 \text{ MV}$  (б). 1 — место, где расположен молниеотвод; 2 — место на поверхности земли, над которым начинается ориентировка лидера молнии; 3 — земля; 4 — молниеотвод; 5 — лидер молнии.

продвижения до молниеотвода. Во втором же случае (рисунок, б) время продвижения лидера до молниеотвода несколько больше (на 6%), чем минимальное время его продвижения до расположенного под ним участка на поверхности земли, поэтому полагается, что пробой в молниеотвод не произойдет. Появление молнии с уровнем напряжения  $U_m = 3 \text{ MV}$  (соответствующий уровень  $I_m \approx 2.5\text{--}3.75 \text{ kA}$ ) имеет вероятность 0.95 [25]. Вероятность же 0.995 соответствует меньшему радиусу зоны защиты молниеотвода —  $R_M \approx 1.1 \text{ h}$ . Таким образом, непопадание молнии в молниеотвод для  $R_M = 1.5 \text{ h}$

в случае  $U_m = 3 \text{ MV}$  соответствует экспериментально наблюдаемым данным, нашедшим отражение в нормирующих документах [1].

Как видно из результатов проведенных расчетов (см. рисунок), наибольшие трудности представляет перехват молнии, потенциал которой невелик. Так, сравнение частей а и б рисунка показывает, что по мере снижения величины потенциала молнии вероятность ее перехвата молниеотводом уменьшается.

Гипотеза о том, что ориентировка лидера молнии на наземный объект начинается после того, как его (объекта) достигнет стримерная зона молнии, позволяет объяснить столь большие уровни зон ориентировки отрицательных молний — 20–100 м. Расчеты показывают, что при таких расстояниях между наземным объектом и лидерным каналом молнии, несущим высокий потенциал, взаимодействие их электромагнитных полей пренебрежимо мало. Если же принять гипотезу, что после касания стримерной зоной объекта между ними начинается развитие канала лидерного разряда, сопротивление которого нелинейно по мере продвижения лидера к объекту и увеличения разрядного тока, „дистанционное“ управление лидера объектом получает аргументированное подтверждение. Данная гипотеза, на наш взгляд, может служить единственным объяснением встречи нисходящего лидера молнии и лидера, восходящего от объекта, потому что из-за малого радиуса действия электрических полей этих весьма тонких разрядных каналов их электромагнитное взаимодействие пренебрежимо мало.

## Выводы

1. Адекватность расчета с помощью предложенной модели максимальных радиусов зоны защиты одиночных молниеотводов от поражения лидером отрицательной молнии подтверждается совпадением полученных результатов с нормируемыми значениями для молниеотводов высотой ниже 150 м при двух уровнях вероятности перехвата ими молнии.

2. Данная модель может быть использована для расчетов по сравнительной оценке молниеотводов различных типов, например активных, а также определения вероятности прорыва молнии на исследуемые объекты различных пространственных конфигураций, в том числе высотой более 150 м.

3. Данная модель позволяет объяснить трудности, связанные с перехватом положительных молний, высота ориентировки которых существенно меньше, чем отрицательных.

4. С помощью данной модели могут быть определены расстояния между несколькими рядом стоящими молниеотводами, обеспечивающими зону защиты объекта с заданной, в том числе очень высокой, степенью надежности.

## Список литературы

- [1] РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [2] *Akyuz M., Cooray V.* // J. Electrostatics. 2003. N 51–52. P. 319–325.
- [3] *D'Alessandro F., Gumley J.R.* // 24<sup>th</sup> Intern. Conf. on Lightning Protection. Birmingham. 1998. P. 457–462.
- [4] *Rezinkina M.M.* // Ibid. P. 924–928.
- [5] *Mansell E., MacGorman D., Ziegler C., Straka J.* // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. N D9.
- [6] *Portela C.* // Proc. IEEE Intern. Symposium on EMC. Denver (Colorado, USA). 1998. Vol. 2. P. 1018–1023.
- [7] *Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д.* и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 48–53.
- [8] *Петров Н., Петрова Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 134–137.
- [9] *Petrov N.I., Petrova G.N., D'Alessandro F.* // IEEE Trans. on Diel. and Electr. Ins. 2003. Vol. 10. N 4. P. 641–654.
- [10] *Agoris D.P., Gharalambakov V.P., Pyrgioty E., Grzybowski S.* // 26<sup>th</sup> Intern. Conf. on Lightning Protection. Cracow, 2002. P. 270–274.
- [11] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
- [12] *Rakov V.A.* // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2001. Vol. 43. N 4. P. 654–661.
- [13] *Горин Б.Н., Шкилев А.В.* // Электричество. 1974. № 2. С. 29–38.
- [14] *Базелян Э.М., Ражанский И.М.* Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 164 с.
- [15] *Разевиг Д.В.* Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 316 с.
- [16] *Юман М.* Молния. М.: Мир, 1972. 327 с.
- [17] *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 223 с.
- [18] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // УФН. 2000. Т. 170. С. 753.
- [19] *Uman M., Rakov V.* // American Meteorological Society. 2002. December. P. 1809–1820.
- [20] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [21] *Брагинский С.И.* // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. Вып. 6. С. 1548–1557.
- [22] *Андреев С.И., Орлов Б.И.* // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 8. С. 1411–1418.
- [23] *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 100 с.
- [24] *Briet R.* // Intern. J. EMC<sup>TM</sup>, ITEM<sup>TM</sup>. 1997. P. 91.
- [25] CEI IEC 1312-1. International Standard „Protection against Lightning Electromagnetic Impulse“. Geneve: IEC, 1995. 81 p.