
**ДИАГНОСТИКА
ПЛАЗМЫ**

УДК 537.528

МЕХАНИЗМ ОРИЕНТИРОВКИ И ПАРАМЕТРЫ МОЛНИИ В МОЛНИЕЗАЩИТЕ

© 2019 г. Э. М. Базелян*

АО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”, Москва, Россия

** e-mail: bazelyan@eninnet.ru*

Поступила в редакцию 21.08.2018 г.

После доработки 20.09.2018 г.

Принята в печать 20.09.2018 г.

Рассмотрены детали процесса формирования нисходящей молнии и ориентировки канала нисходящего лидера, необходимые для решения прикладных задач в области молниезащиты. Показана необходимость учета механизма формирования биполярного лидера в электрическом поле грозового облака, при котором грозовая ячейка не может рассматриваться как проводящий заряженный электрод; потенциал, несущий каналом нисходящего лидера, определяется местом старта молнии и ее траекторией, влияние заряда грозовой ячейки проявляется в существенно меньшей степени. Предложен алгоритм расчета высоты ориентировки молнии, погонного заряда ее канала и радиуса стягивания, исходя из значения тока главной стадии. Утверждается, что измерения тока молнии на высотных сооружениях, практикуемые в настоящее время, не могут служить основанием для оценки частоты опасных ударов молнии в сооружения ординарной высоты. Предложена структура полевых исследований молнии, позволяющая накопить требуемую статистику ее токов за обозримый срок при реальных материальных затратах. Доказана необходимость исследования механизма конкурирующего развития встречных разрядов от наземных электродов и предлагается их методика.

DOI: 10.1134/S0367292119020045

В физике газового разряда не так много проблем, которые не получили достоверного решения почти за век исследований. Оценка надежности защиты от удара молнии одна из них. Начало было оптимистичным. Выяснив, что молния — это всего лишь сверхдлинная искра, казалось естественным организовать модельные лабораторные исследования, уменьшив масштаб молниеотводов и защищаемых объектов соответственно с размерами используемого лабораторного разрядного промежутка. Нечто подобное делается до сих пор [1, 2], хотя уже давно установлено принципиальное нарушение законов подобия в многометровом искровом разряде [3]. Результаты экспериментов оказались зависимыми от длины промежутка, полярности импульса напряжения и от его временных параметров. В лучшем случае можно было надеяться на определение качественных закономерностей процесса ориентировки молнии, но никак не на количественную оценку надежности работы молниеотводов, нужную практике.

Не слишком много дал и опыт эксплуатации различных молниезащитных систем. Сколько-нибудь надежные данные получены только для воздушных линий электропередачи высокого напряжения, но, к сожалению, диапазон их высот

достаточно ограничен, а организовать систематические наблюдения за сосредоточенными сооружениями различной высоты пока не удалось. Так была создана благоприятная атмосфера для разработки теоретических расчетных моделей, претендующих на инженерную оценку числа ударов молнии в различные объекты и надежности их защиты молниеотводами. Некоторые модели получили настолько широкое распространение, что были включены в национальные и международные нормативные документы по молниезащите (см., например, стандарт МЭК 62305). Они продолжают использоваться в проектных расчетах, не взирая не только на отсутствие обоснованной физической аргументации, но даже на явное нарушение давно установленных закономерностей и опыта эксплуатации.

Сложившееся положение послужило основанием для еще одной попытки анализа современных представлений о процессе ориентировки молнии, выполненной в этой статье, чтобы сформировать обоснованную оценку известных методологических разработок и получить представления о возможности создания достоверной расчетной модели процесса ориентировки молнии на базе тех фактических данных о ее параметрах, которыми специалисты располагают сегодня.

ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

Для инициирования разряда в электрическом поле грозового облака его напряженность в какой-то области, как минимум, должна превысить порог ионизации воздуха. При обследовании облаков столь сильное поле не удалось обнаружить. Максимальные измеренные значения оказались меньше требуемых в пределах порядка величины [4]. Это значит, что местом старта молнии является кратковременное локальное усиление поля либо в результате какой-то механически организованной концентрации заряженных частиц, либо вследствие поляризации проводящего образования. Строго обоснованных представлений на этот счет пока не существует. К счастью, механизм зарождения лидера молнии не представляет особой значимости для формирования представлений о процессе ее ориентировки у поверхности земли.

Принципиально важно, что заряженную грозовую ячейку нельзя представлять в виде проводящего электрода, который отдает свой электрический заряд каналу лидера формирующейся молнии. Скорее, ячейка является совокупностью разобщенных электрически заряженных гидрометеоров, не имеющих сколько-нибудь значимой проводящей связи между собой. Подобная связь вообще не требуется для формирования молнии. Более того, молния может стартовать от какого-то иницирующего элемента (неизвестной пока природы) вне грозовой ячейки. При этом ее развитие должно осуществляться в виде взаимосвязанного формирования двух лидеров противоположной полярности. Гипотеза такого рода на качественном уровне была впервые развита в [5]. Ее количественное оформление выполнено в [6]. Убедительным подтверждением гипотезы являются многочисленные возбуждения молний авиалайнерами при их пролете в окрестности грозового фронта без проникновения за его внешнюю границу.

В подобной ситуации неправомерно утверждение, что лидер молнии за вычетом напряжения на своем канале транспортирует к земле потенциал из точки своего старта. В реальности картина иная. Потенциал головки движущегося к земле нисходящего лидера задается распределением электрического поля по всей длине сформированных биполярных лидерных образований. Он может существенно отличаться от потенциала в месте старта даже при идеальной проводимости лидерной плазмы. Это следует из известной теоремы Гринберга, утверждающей, что потенциал уединенного не связанного с другими электродами проводника l в поле $U(x)$ в предположении об

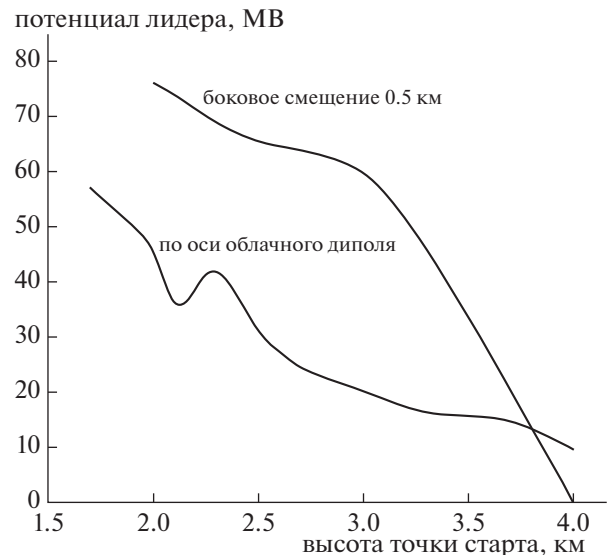


Рис. 1. Динамика изменения потенциала, доставленного к земле нисходящим лидером, в зависимости от высоты точки старта молнии.

его неизменной погонной емкости определяется криволинейным интегралом

$$U_0 = \frac{1}{l} \int_l U(x) dx.$$

Строгое численное решение позволяет вычислить потенциал для проводника любых размеров и конфигурации в поле от произвольно расположенных зарядов. При этом в расчетную модель можно ввести зависимость скорости удлинения каждого из каналов биполярного лидера в зависимости от разности потенциалов $\Delta U_1 = U_0 - U(x_1)$ и $\Delta U_2 = U_0 - U(x_2)$ в месте размещения его головок с координатами x_1 и x_2 и таким образом оценить реальную зависимость потенциала, транспортируемого к земле нисходящим лидером, от заряда грозового облака, места инициирования молнии и траектории ее движения. Типичный результат подобных оценок представлен на рис. 1. Использована дипольная модель грозового облака с зарядом 15 Кл, который равномерно размещен по заряженным сферическим ячейкам радиусом 500 м. Центр отрицательной ячейки расположен на высоте 3000 м, положительной — на высоте 6000 м. Предполагалось, что разнополярные идеально проводящие лидеры распространяются вертикально по оси диполя, либо с горизонтальным смещением от нее на 500 м.

Компьютерное моделирование выявило очень существенное влияние на потенциал нисходящего лидера высоты старта и его траектории. В рассмотренных условиях при потенциале в нижней точке отрицательно заряженной облачной ячейки около 220 МВ к земле было доставлено не

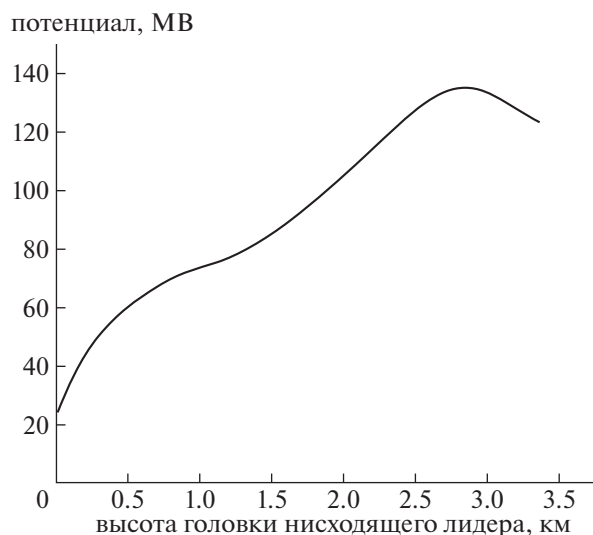


Рис. 2. Динамика изменения потенциала нисходящего лидера при его движении к земле.

больше 80 МВ, а минимальное значение потенциала нисходящего лидера оказалось даже близким к нулю. Результат более, чем принципиальный, поскольку потенциал лидера определяет и высоту ориентировки молнии, и амплитуду ее тока в главной стадии разряда (returnstroke в английской терминологии). Есть основания считать, что статистика токов молнии, охватывающая два порядка величины, предопределяется не столь же широким диапазоном вариации заряда грозowych ячеек, но случайным разбросом точек инициирования, траекторий и ветвлений ее канала.

Важным обстоятельством является достаточно быстрое изменение потенциала на последних сотнях метров приближения к земле нисходящего лидера. В условиях расчета, представленного на рис. 2, когда молния стартовала на высоте 3500 м в точке, смещенной от оси диполя на 500 м, потенциал лидера изменился более, чем в 2.5 раза при перемещении головки нисходящего лидера с высоты 500 м до земли. Это как раз тот диапазон высот, на котором осуществляется процесс ориентировки для типичных объектов.

Практически все расчетные модели связывают процесс ориентировки нисходящего лидера с электрическим полем в окрестности вершины наземного сооружения. При этом далеко не всегда учитывается тот факт, что электростатическое распределение поля в грозовой обстановке очень существенно искажается объемным зарядом, который внедряется элементами встречного разряда от наземных сооружений, в том числе от молниеотвода и защищаемого сооружения. При типичном времени релаксации электрического поля между разрядами молнии не менее десятков

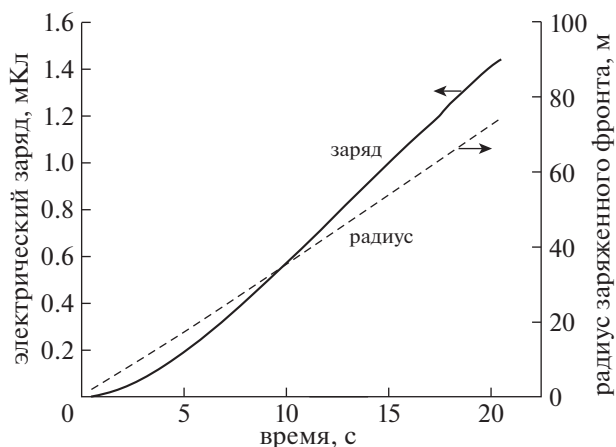


Рис. 3. Формирование короны от стержневого электрода высотой 50 м и радиусом 2 см. В электрическом поле грозowego облака, линейно нарастающем до 20 кВ/м за 20 с.

секунд [7] встречный разряд формируется в виде бесстримерной короны с током микроамперного уровня. Ее характеристики детально исследованы в [8, 9]. Показано, что внедренный заряд, как правило, на порядок величины и более превышает тот, что был бы наведен на поверхности заземленного сооружения тем же электрическим полем в отсутствие короны. Как пример на рис. 3 показана динамика роста объемного заряда короны, формирующейся от стержневого молниеотвода высотой 50 м и радиусом 2 см в электрическом поле атмосферы, когда оно линейно нарастало до 20 кВ/м за 20 с. В отсутствие короны наведенный на стержне заряд составил бы около 0.1 мКл, тогда как реально внедренный в атмосферу в 15 раз больше, причем, он достаточно удален от коронирующей вершины электрода. Как можно видеть из расчетных данных рис. 3, радиус фронта объемного заряда к моменту времени 20 с успел продвинуться к грозовому облаку на 75 м.

Нужно отметить, что характеристики коронного разряда мало чувствительны к радиусу коронирующей вершины, если электрическое поле в атмосфере многократно превышает порог зажигания короны [10].

Фоторазвертки лабораторной многометровой искры, выполненные при помощи ЭОП с усилением света, всегда регистрируют стримерную зону перед головкой лидера длиной в несколько метров. Столь качественных регистраций нисходящего лидера молнии пока не существует. Тем не менее, развиты расчетные модели, которые связывают процесс ориентировки молнии с детерминированным распространением ее канала внутри стримерной зоны, достигшей поверхности наземного сооружения. Косвенную оценку длины стримерной зоны можно выполнить, ис-

ходя из достаточно надежной информации об электрическом поле E_{st} , поддерживающем развитие длинных стримеров. Для анодонаправленного стримера, свойственного отрицательному нисходящему лидеру, $E_{st} \approx 1000$ кВ/м [11]. Требуемое для оценки значение потенциала его лидерной головки U_{tip} дает гипотеза нейтрализации заряда лидера при ее контакте с заземленной поверхностью, согласно которой ток молнии формируется в волновом процессе нейтрализации этого заряда, подобно тому, как это представлено, например, в [6]. В зависимости от соотношения волнового сопротивления канала молнии и сопротивления цепи, связывающего его с землей, эквивалентное сопротивление в цепи тока молнии I_M определяется как $Z_{эkv} = U_{tip}/I_M \approx 500\text{--}1000$ Ом [12]. Это значит, что для средней по силе молнии с током 30 кА потенциал головки нисходящего лидера находится в пределах 15–30 МВ, а длина ее стримерной зоны близка к 15–30 м – расстояние слишком малое, чтобы объяснить на его основе фактические данные о стягивании молний к наземным сооружениям различной высоты.

Хорошо известна и кажется привлекательной гипотеза Голда [13] об инициировании ориентировки развитием от заземленных сооружений каналов встречных лидеров. Они хорошо фиксируются на фоторазвертках многометровых искровых каналов в лаборатории и у молний. К сожалению, число последних явно недостаточно для статистической обработки. Обращение же к модельным лабораторным экспериментам не привело к однозначному заключению, поскольку в обследованных промежутках длиной до 10 м моменты контакта стримерной зоны с заземленной поверхностью и возникновения от нее встречного лидера трудно разделить. Тем не менее, условия инициирования встречного лидера продолжают привлекать к себе заслуженное внимание и подвергались детальному численному моделированию [14].

Установлено, что встречный разряд начинается с формирования уже упоминавшейся бесстримерной короны на вершинах заземленных сооружений различной высоты, в том числе на ветках деревьев, кустарника и даже травы, везде, где существуют протяженные проводящие элементы малого радиуса кривизны r_0 , локально усиливающие электрическое поле атмосферы E_0 приблизительно в $h/(2r_0)$ раз при высоте элемента h . Для возбуждения встречного лидера необходим переход короны в стримерную форму, для чего ее ток должен превысить некоторое критическое значение. Для электродов сферической геометрии ра-

диуса r_0 величина критического тока оценивается как [15]

$$i_{cr} = 8\pi\epsilon_0\mu_i r_0 E_{cor}^2, \quad (1)$$

где E_{cor} – порог зажигания короны, а μ_i – подвижность основного сорта коронных ионов. Формула позволяет оценить и условия возбуждения стримерной вспышки в промежутке, еще свободном от объемного заряда короны, если учесть, что начальный коронный ток от уединенного сферического заземленного электрода, размещенного на высоте h в поле атмосферы E_0 , определяется как

$$i_{cor} = 4\pi\epsilon_0 r_0 \frac{dE_0}{dt}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что для этой цели необходимо выполнение неравенства

$$h \left(\frac{dE_0}{dt} \right)_{cr} > 2\mu_i E_{cor}^2, \quad (3)$$

правая часть которого близка к 5×10^9 В/с. Поскольку поле грозового облака нарастает за время порядка 10 с и более, а его значение у поверхности земли в грозовой обстановке заведомо меньше 100 кВ/м, начальное возбуждение встречного разряда в стримерной форме исключено для объектов любой практически значимой высоты. Появление стримерной вспышки возможно только в электрическом поле приближающегося к земле со скоростью v_L лидера нисходящей молнии, которое при вертикальном соосном развитии нарастает со скоростью

$$\frac{dE_L}{dt} \approx \frac{\tau_L v_L}{2\pi\epsilon_0 h_{tip}^2}. \quad (4)$$

Здесь h_{tip} – высота головки канала нисходящей молнии, который предполагается равномерно заряженным. Характерно, что критическая скорость роста поля, определяемая (3), не зависит от радиуса вершины рассматриваемого электрода, что ставит под очень серьезное сомнение гипотезу о связи результата ориентировки молнии с величиной заряда, электростатически наведенного на рассматриваемом заземленном электроде [16, 17].

Методика компьютерного моделирования короны в электрическом поле атмосферы, развитая в [9], в равной степени может быть распространена на электроды не только сферической, но и цилиндрической геометрии, что позволяет при любой их высоте найти условия перехода встречного разряда в стримерную при воздействии суммарного поля грозового облака и лидера нисходящей молнии с учетом влияния объемного заряда, сформированного предшествующей бесстримерной короны.

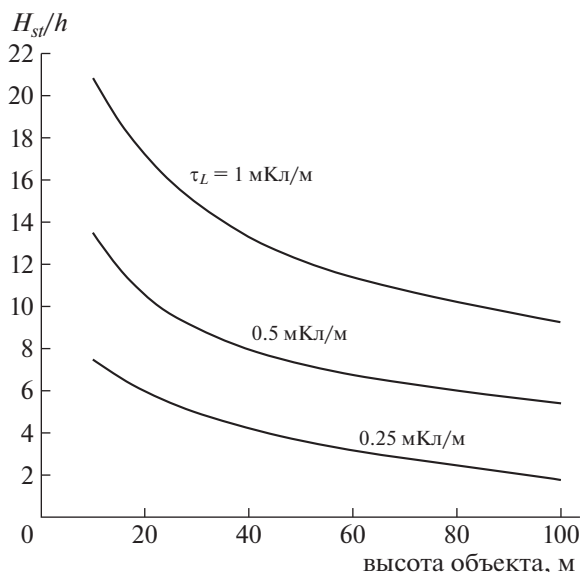


Рис. 4. Расчетные значения высоты головки лидера нисходящей молнии в момент старта стримерной вспышки от стержневых электродов различной высоты.

На рис. 4 как пример представлены результаты таких расчетов для стержневого молниеотвода радиусом 2 см различной высоты h , смещенного в радиальном направлении на расстояние $r = 3h$. Принято, что до старта нисходящей молнии коронный заряд у вершины стержня формируется в течение 20 с при монотонном линейном росте поля грозового облака до 30 кВ/м. Принятые в качестве исходных данных значения погонного заряда лидера нисходящей молнии указаны на расчетных кривых. Как можно видеть величина отношения H_{st}/h не остается постоянной, но сильно меняет свое значение в зависимости как от погонного заряда нисходящего лидера, так и от высоты заземленного стержневого электрода.

Зарождению встречного лидера требует обязательного прогрева основания стримерной вспышки, так называемого стебля (stem в английской терминологии). Именно там в результате перегретой неустойчивости ток стягивается в канал малого радиуса, становясь начальным элементом зарождающегося лидера. Лабораторные эксперименты и численная оценка показали, что энерговклад в стебель стримерной вспышки оказывается достаточным, если напряжение перед вершиной заземленного электрода на длине около 1 м превысит 400 кВ [6]. Как правило, это условие выполняется автоматически в момент перехода встречного разряда в стримерную форму за счет интенсивного усиления электрического поля в атмосфере зарядом приближающегося лидера нисходящей молнии. По той же причине внешнее электрическое поле атмосферы превы-

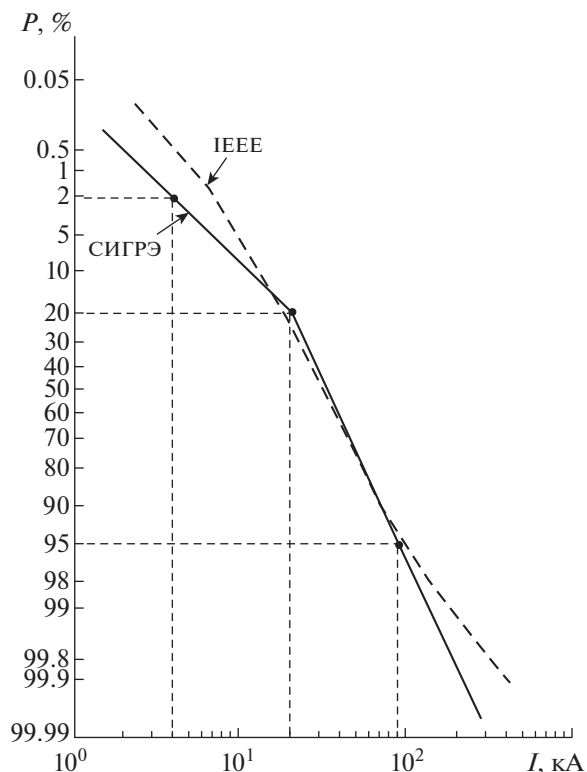


Рис. 5. Статистика токов молнии.

шает среднее продольное поле в канале стартовавшего встречного лидера, обеспечивая тем самым его развитие в слое объемного заряда короны и предопределяя точку удара молнии.

Параметры молнии, необходимые для решения прикладных задач

Здесь трудно претендовать на изобилие экспериментальных данных. Их обобщение выполненное в докладе СИГРЭ в 2013 г. (WorkingGroup C4.407 Rep. № 549), показывает, что с наибольшей достоверностью можно ориентироваться на ток главной стадии молнии, который измерялся при ее ударе в наземные сооружения. В общей сложности статистика ограничена несколькими сотнями прямых осциллографических измерений, по которым построены кривые распределения токов различной амплитуды (рис. 5). На большее рассчитывать не приходится.

Для расчета электрического поля нужно знать конкретную траекторию лидера молнии и распределение заряда по его каналу, что недоступно современным методикам измерений. Приходится поэтому ориентироваться на численные модельные оценки, которые должны исходить из статистики токов молнии — единственного скольконибудь надежно измеренного параметра. Связь тока молнии с потенциалом головки канала нис-

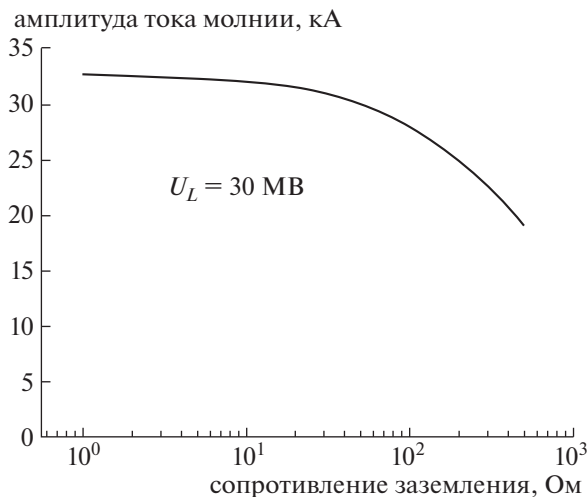


Рис. 6. Расчетная зависимость амплитуды тока молнии от сопротивления заземления пораженного объекта при потенциале нисходящего лидера 30 МВ (средний по силе разряд).

ходящего лидера дает модель главной стадии, в которой канал лидера, коснувшегося заземленной поверхности, рассматривается как длинная линия с усредненными распределенными значениями погонной емкости и индуктивности и резко нелинейным погонным сопротивлением. Это сопротивление убывает по мере разогрева плазменного канала волной тока, распространяющейся от земли к облаку [6]. Численный расчет по такой модели позволяет установить качественную связь между амплитудой регистрируемого тока и потенциалом головки нисходящего лидера при различных значениях сопротивления заземления. При практически значимых величинах последнего амплитудное значение тока меняется слабо (рис. 6), что и позволяет ориентироваться на его усредненное значение.

Вычисленная по расчетной модели функциональная связь между током молнии и потенциалом головки его канала (рис. 7) удовлетворительно аппроксимируется полиномом 2-й степени

$$U_L = 3.6858 + 0.7282I_M - 0.000818I_M^2 \text{ [МВ]}, \quad (5)$$

куда ток молнии должен вводиться в килоамперах.

Оценка параметров, характеризующих ориентировку молнии

Используя найденную зависимость между током молнии и потенциалом головки ее канала, можно попытаться вычислить основные параметры, характеризующие процесс ориентировки молнии — уже упоминавшуюся высоту ориентировки H_o и радиус стягивания молний к сосредото-

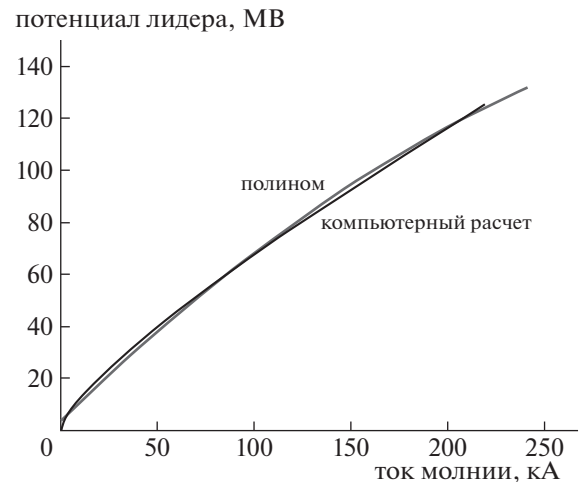


Рис. 7. Расчетная функциональная связь между амплитудой тока молнии и потенциалом ее нисходящего лидера.

точному объекту высотой h . При задании высоты ориентировки H_o в самом первом грубом приближении предполагалась ее линейная зависимость от потенциала лидера молнии U_L . При этом использовалось выражение

$$H_o = h(1 + A \cdot U_L) \quad (6)$$

поскольку высота ориентировки для канала нисходящего лидера, несущего минимально возможный потенциал, не может быть меньше высоты пораженного объекта h . Что же касается радиуса стягивания молний R_{at} , то для его оценки в первом приближении пригоден принцип равных расстояний от головки канала молнии, достигшего высоты ориентировки, до поверхности земли и до установленного на ней объекта высотой h (принцип эквидистантности)

$$\frac{R_{at}}{h} = \sqrt{\frac{2H_o}{h} - 1}. \quad (7)$$

Практическое использование соотношений (5)–(7) требует оценки неизвестной константы A . Для этой цели можно привлечь еще один параметр, известный из опыта эксплуатации, — так называемый эффективный радиус стягивания молний к сосредоточенным объектам высотой h . В большинстве практических руководств, в т.ч. и отечественных, этот параметр определяется по ежегодному суммарному числу ударов молний N_M как

$$R_\Sigma = \sqrt{\frac{N_M}{\pi n_M}} \approx 3h, \quad (8)$$

где n_M — нормированная для места дислокации объекта ежегодная плотность ударов молнии в единицу невозмущенной поверхности земли.

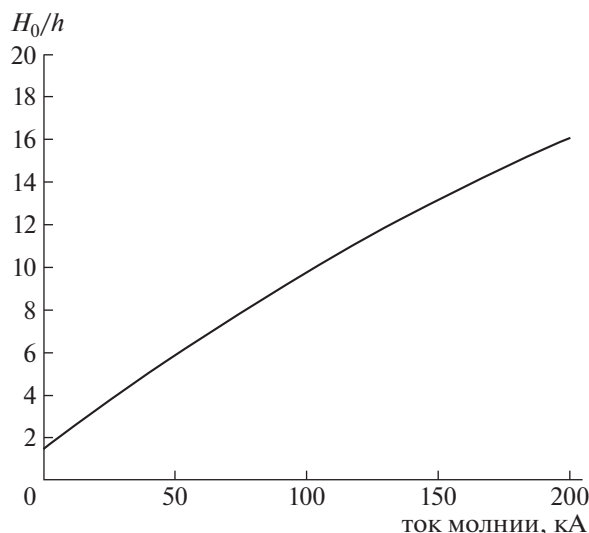


Рис. 8. Высота ориентировки в зависимости от амплитуды тока первого компонента отрицательной молнии.

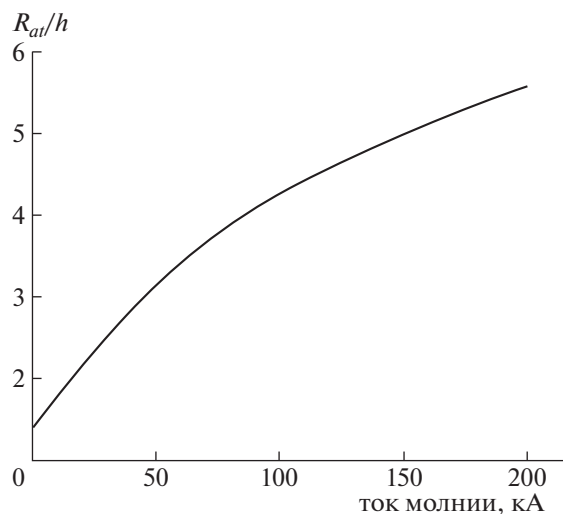


Рис. 9. Зависимость приведенного значения эффективного радиуса стягивания молний от амплитудного значения их тока.

Формальное вычисление R_Σ по (6)–(7) требует интегрирования по всему известному диапазону токов молнии с учетом их статистических весов

$$R_\Sigma/h = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} R_{at}(I)F(I)dI. \quad (9)$$

Здесь $I_{\min}$ и $I_{\max}$ — минимальное и максимальное значение тока молнии, $F(I)$ — плотность вероятности тока амплитудой I . Для определения интеграла (9) использовалась статистика токов молнии, представленная на рис. 5, поскольку иной просто не существует.

Результат подобной обработки с учетом $R_\Sigma = 3h$ привел к значению $A \approx 0.128$ м/МВ, которое и было использовано далее для построения зависимости высоты ориентировки от тока молнии, представленной на рис. 8. Знание высоты ориентировки позволяет найти эффективный радиус стягивания R_{at} молний с конкретным заданным током. Для объектов конфигурация которых близка к стержневой, для этой цели пригодно выражение (7). Подстановка в него значений H_0/h , заимствованных из расчетных данных рис. 8, дает зависимость $R_{at}/h = f(I_M)$, представленную на рис. 9.

Принципиально важно, что определение зависимости $R_{at}/h = f(I_M)$ строилось на формальных соотношениях без привлечения каких-либо физических закономерностей развития встречного разряда. Оценки опирались только на статистику токов молний и экспериментально оцененное обобщенное значение эффективного радиуса стягивания к сосредоточенным наземным сооружениям. Существует однако принципиально

иной подход к оценке этой функциональной связи, расчетная модель которого целиком основана на физической картине встречного разряда. Сопоставление двух этих подходов заслуживает внимания.

В физической модели основным параметром становится погонный заряд канала лидера нисходящей молнии, поскольку именно под его влиянием быстро усиливается электрическое поле у земной поверхности и осуществляется изменение формы встречного разряда у вершины наземного сооружения, приводя в итоге к рождению встречного лидера. Для современной компьютерной техники расчет погонного заряда по длине нисходящего лидера не представляет проблем, если известна конкретная траектория канала, радиус чехла заряда в его окрестности, наличие ветвлений и их размеры, электрическое грозовое поле атмосферы. К сожалению, все перечисленные параметры меняются от разряда к разряду и не поддаются статистическому учету. Поэтому, ориентируясь на оценку усредненного значения радиуса стягивания молний, целесообразно отказаться от использования параметров какой-то конкретной молнии и рассматривать элементарную расчетную модель с вертикальным каналом без ветвлений, используя для нее понятие усредненной погонной емкости нисходящего лидера. Как известно, для уединенного протяженного электрода заряд на единицу длины связан с геометрическими размерами через логарифмическую функцию, определяющую погонную емкость электрода

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(l/r_e)}, \quad (10)$$

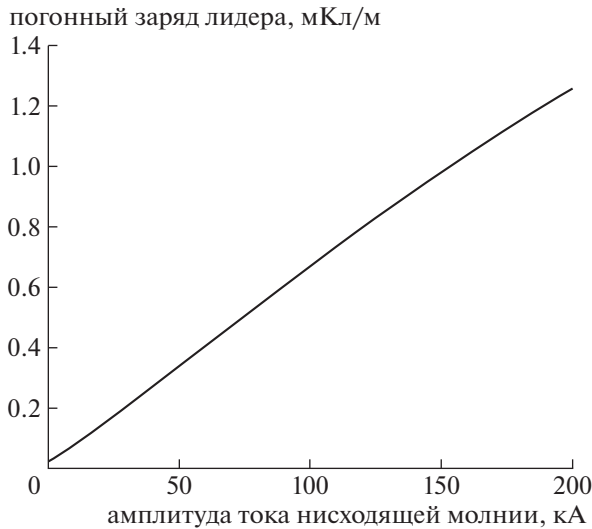


Рис. 10. Расчетные значения погонного заряда лидера нисходящей молнии в зависимости от амплитудного значения тока ее главной стадии.

где l и r_e — длина и радиус протяженного электрода, причем, в данном случае под радиусом надо понимать радиус чехла вокруг плазменного канала лидера, заполненного объемным зарядом. Количественная оценка может быть выполнена на основе следующих соображений:

— для связи между током главной стадии молнии и погонным зарядом ее нисходящего лидера важна длина канала не более $l \approx 1000$ м, на которой “размещается” фронт волны тока главной стадии молнии;

— радиус чехла заряда определяется расстоянием, на котором электрическое поле удерживается на уровне порога ионизации воздуха E_i и, следовательно,

$$r_e \approx \frac{\tau_L}{2\pi\epsilon_0 E_i}. \quad (11)$$

С другой стороны,

$$\tau_L = C_0 U_L = \frac{2\pi\epsilon_0 U_L}{\ln(l/r_e)}, \quad (12)$$

где U_L — потенциал нисходящего лидера. Из (11) и (12) следует

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{IE_i \ln(l/r_e)}{U_L}}. \quad (13)$$

Известно, что ток молнии функционально связан с потенциалом, который транспортирует к земле нисходящий лидер. Значимость этой связи не слишком существенна для оценки погонной емкости, поскольку потенциал U_L находится под знаком логарифма. Поэтому в первом приближе-

нии можно пренебречь зависимостью от r_e , положив $\ln(l/r_e) \approx 7$ ($l/r_e \sim 1000$). С учетом этого обстоятельства при $E_i \approx 3$ МВ/м и $l \sim 1000$ м

$$C_0 \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2 \times 10^{10}}{U_L}}, \quad (14)$$

где U_L — [В].

В практически значимом диапазоне токов молнии амплитудой до 200 кА потенциал U_L согласно модельным расчетам, представленным на рис. 7, меняется приблизительно от 10 до 120 МВ, что приводит к изменению погонной емкости канала нисходящего лидера в пределах всего 7.3–10.8 пкФ/м. По этой причине основным фактором, определяющим погонный заряд лидера нисходящей молнии, является потенциал его канала, меняющийся в зависимости от мощности молниевых разрядов в пределах порядка величины. Что же касается диапазона вариации заряда лидера нисходящей молнии, то здесь согласно (12) следует указать границы от ~ 50 мКл до ~ 1 мКл (рис. 10). Характерно, что нижняя граница близка к уровню значений, непосредственно измеряемых в сверхдлинных лабораторных промежутках, а верхняя и ранее фигурировала в некоторых теоретических построениях, например в [18].

Результаты расчетов, представленные ниже, выполнены для сосредоточенных сооружений (стержневой молниеотвод, опора ВЛ) высотой 30 м, которая достаточно типична для гражданского строительства и линий электропередачи высокого напряжения. Предполагалось, что молния стартует на высоте 3000 м от поверхности земли и движется к земле вертикально со средней скоростью 2×10^5 м/с. Электрическое поле грозового облака принято линейно нарастающим у невозмущенной поверхности земли до 20 кВ/м в течение 10 с (весьма быстрая скорость релаксации грозового поля согласно [7]). Следует отметить, что величина поля грозового облака и темп его изменения во времени слабо влияли на результат оценки высоты ориентировки, равно как и высота точки старта нисходящего лидера молнии.

На рис. 11 для примера показана расчетная динамика роста тока коронного разряда от электрода радиусом 2 см в электрическом поле грозового облака. Как и следовало ожидать, максимальная величина коронного тока была здесь на 2 порядка меньше критического значения, определяющего согласно (1) переход короны в стримерную форму, необходимую для зарождения встречного лидера. Критический ток достигим только при усилении электрического поля зарядом приближающегося к земле лидера нисходящей молнии (рис. 12). Проверка показала, что к моменту перехода короны в стримерную форму электрическое поле

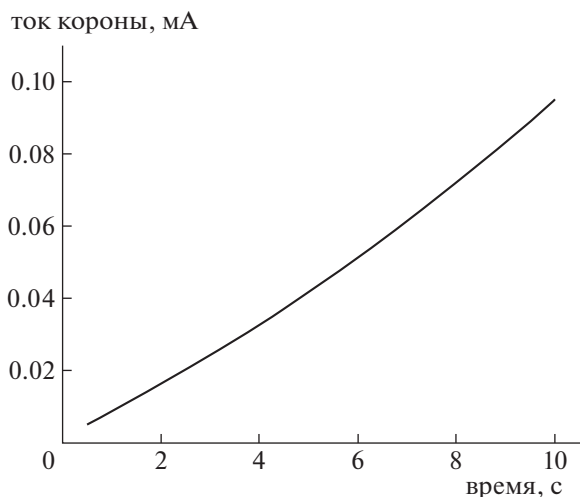


Рис. 11. Динамика роста коронного тока в грозном электрическом поле.

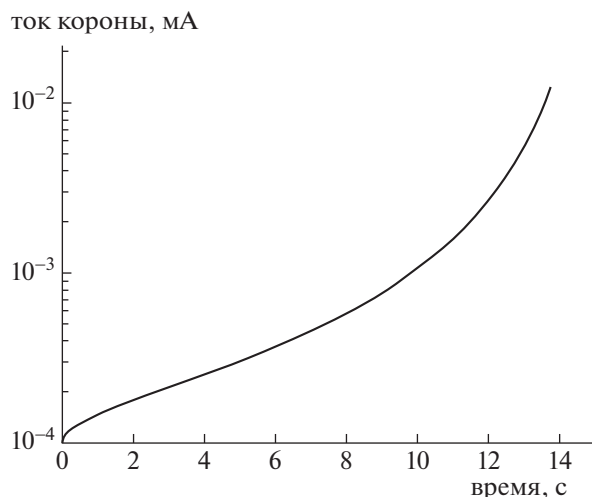


Рис. 12. Динамика роста коронного тока в поле нисходящего лидера молнии. Погонный заряд лидера 0.5 мКл/м, отсчет времени с момента старта нисходящего лидера.

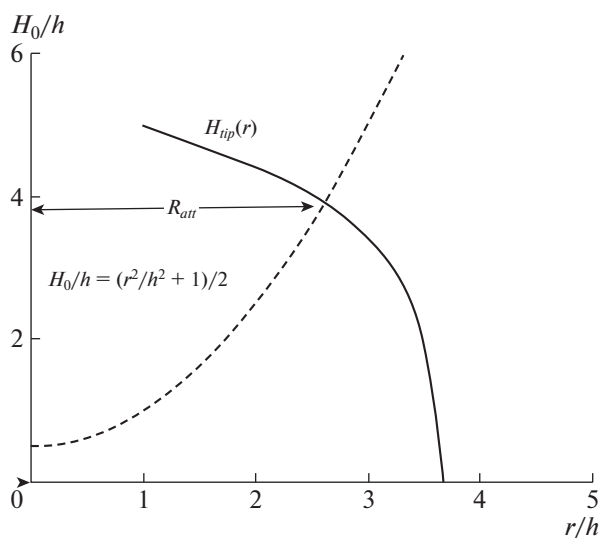


Рис. 13. Зависимость высоты ориентировки нисходящего лидера с погонным зарядом 0.2 мКл/м от его радиального смещения относительно стержневого электрода высотой 30 м.

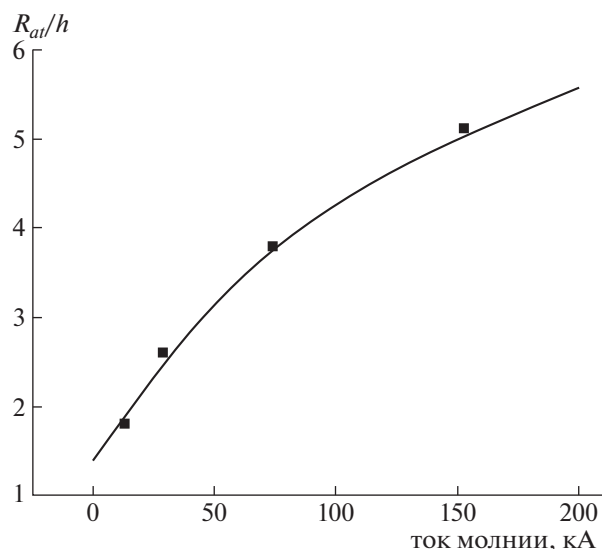


Рис. 14. Сравнение значений эффективного радиуса стягивания, вычисленных независимыми методами.

всегда обеспечивало выполнение условия $\Delta U_{cr} = 400$ кВ, при котором в стебле стримерной вспышки зарождается встречный лидер, знаменующий, как предполагается, начало процесса ориентировки.

На рис. 13 представлена типичная расчетная зависимость высоты ориентировки нисходящей молнии от ее радиального смещения относительно рассматриваемого наземного сооружения и выполнено построение, необходимое для определения радиуса стягивания R_{att} по принципу экви-

дистантности. Аналогичные операции были выполнены и для других погонных зарядов нисходящей молнии. Полученные таким образом значения нанесены на полученную ранее зависимость $R_{att}/h = f(I_M)$ (рис. 14). Хорошее совпадение полученных величин указывает на достоверность исходных физических посылок, заложенных в определение высоты ориентировки и эффективного радиуса стягивания нисходящих молний.

Таким образом, приходится констатировать, что общепринятый расчет числа ударов молний

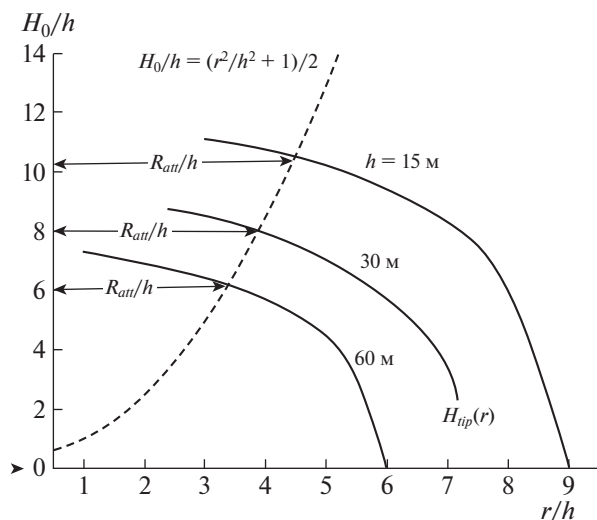


Рис. 15. К оценке влияния высоты объекта на эффективный радиус стягивания молний; расчет выполнен для погонного заряда лидера 0.5 мКл/м.

по постоянному значению $R_{атт}/h$ не позволяет получить истинные представления о частоте ударов в объект молний с различными токами, поскольку в рабочем диапазоне 10–200 кА значения этого параметра должны отличаться приблизительно в 3 раза, а площадь стягивания молний для объекта фиксированной высоты почти на порядок величины.

Оценки, аналогичные проведенным, можно выполнить и для сооружений другой высоты h , чтобы понять возможность расчетов защитного действия молниеотводов при постоянных значениях приведенных параметров H_0/h и $R_{атт}/h$, как это нередко практикуется. Результаты приведенные на рис. 15, показывают, что для молний с погонным зарядом нисходящего лидера в 0.5 мКл (ток молнии ~75 кА) изменение высоты объекта от 15 до 60 м влечет за собой сокращение расчетного параметра H_0/h приблизительно от 10 до 6, а $R_{атт}/h$ от 4/5 до 3.5 (рис. 15).

Желаемые и реально возможные пути уточнения расчета эффективности защитного действия молниеотводов

В практической молниезащите наибольший интерес представляют два параметра — ожидаемое число ударов молнии в объект и эффективность действия защищающего его молниеотвода. Первый вопрос уже сейчас имеет под собой достаточную физическую основу, а алгоритм расчета разработан в такой степени, что пригоден для количественной оценки не только суммарного числа ударов молнии за конкретный срок эксплуатации, но и для определения ожидаемого числа

ударов молнии с током заданного уровня. Для этой цели теоретически установлены зависимости от тока молнии и высоты ориентировки, и радиуса стягивания нисходящего лидера. С их учетом, опираясь на статистику токов молнии, принципиально доступна расчет частота поражения молниями с конкретным значением тока уединенного объекта конкретной высоты. Единственной, но исключительно важной проблемой здесь остается оценка достоверности такой статистики. Как известно, в ее основе лежат прямые измерения тока на объектах очень большой высоты. Например, мачта, использованная в широко известных регистрациях [19], возвышается над поверхностью расположенного рядом озера Лугано более чем на 600 м. При этом около 90% поражающих ее молний были восходящими. С учетом произведенных оценок радиуса стягивания вряд ли удастся найти весомые аргументы для переноса собранной там статистики токов на объекты ординарной высоты, в первую очередь, лежащей в пределах 10–100 м. На такое вынуждает только полное отсутствие иной альтернативы.

Закономерен вопрос, насколько серьезно и затратно решение проблемы сбора статистики токов молний, поражающих объекты ординарной высоты? Ориентируясь на среднюю высоту объекта в 50 м, при радиусе стягивания $R_{\Sigma} = 3h$ для районов России с типичной грозовой деятельностью можно ожидать приблизительно 0.2–0.3 удара молнии в год, что позволит накопить 2000–3000 регистраций за 10 лет наблюдений приблизительно за 1000 объектами. При этом важным обстоятельством является оценка возможности объединения в единый статистический блок данных измерений на объектах различной высоты. Для проверки этого обстоятельства по методике, иллюстрируемой рис. 13, был выполнен расчет радиусов стягивания $R_{атт}$ для сосредоточенных объектов высотой 20 и 100 м применительно к нисходящим молниям с погонным зарядом 0.2 и 1.0 мКл/м. Для объекта высотой 20 м отношение квадратов эквивалентных радиусов, определяющих площадь стягивания, для слабых и сильных молний составило 4.0, а для объекта высотой 100 м — 3.36. Различие в пределах 20% представляется мало значимым, чтобы отказываться от формирования объединенной статистики.

В настоящее время принципиальным моментом становится относительно низкая стоимость современных регистраторов тока молнии. Отечественные приборы, аналогичные представленным в [20], пригодны для массовых регистраций амплитуды тока молнии и его временных параметров. Они прошли жесткую эксплуатационную проверку в полевых условиях, оснащены автономным источником питания и не нуждаются в техническом обслуживании в течение всего гро-

зового сезона. Конечно, подобную работу все равно трудно считать мало затратной, но ее организация имеет несопоставимо большие основания, чем регистрация токов молнии на высотных сооружениях.

Практику молниезащиты и электромагнитной совместимости не интересует частота прорывов молнии к защищаемому сооружению. Интерес представляют лишь те из них, что транспортируют ток опасного уровня. Однако, задача о дифференциации защитного действия молниеотводов в отношении нисходящих молний, несущих различный электрический заряд, разработана лишь в самой малой степени. Из общих соображений понятно, что если процесс ориентировки инициируется стартом встречных лидеров от вершин наземных сооружений, то выбор конкретной точки удара молнии должен осуществляться их конкурирующим развитием [22]. Сведения о таком процессе крайне ограничены. Они извлечены только из лабораторных экспериментов, но никак не из регистраций реальных молний и потому носят чисто качественный характер [6]. Дело сводится к экранирующему воздействию заряда встречного лидера, стартовавшего первым или продвинувшегося дальше в разрядный промежуток, на отстающий в развитии канал. В результате формируется механизм положительной обратной связи, благодаря которой усиливаются последствия любого первоначального случайного изменения условий формирования встречного разряда. Эффект проявляется тем в большей степени, чем ближе точки старта конкурирующих встречных лидеров. Однако, количественному описанию не поддаются даже результаты лабораторных экспериментов, где пришлось бы учитывать последствия статистического запаздывания старта начальных стримерных вспышек в зависимости от конфигурации вершины электрода и скорости роста внешнего электрического поля, влияние экранирующего эффекта объемного заряда, внедренного этой вспышкой при различных условиях старта, направление движения и скорость встречного лидера, а также ряд других менее значимых факторов. В существующих расчетных моделях выбора точки поражения молнией условия конкурирующего развития встречных лидеров, как правило, во внимание не принимаются. Все ограничивается сопоставлением напряженностей внешнего поля у вершины молниеотвода и защищаемого им объекта, хотя их количественная оценка не позволяет судить однозначно о дальнейшем характере развития и судьбе встречных лидеров.

В настоящей статье не ставилась задача критического анализа конкретных расчетных моделей, тем более, что большинство из них хорошо известны специалистам. Важнее отметить проблемы, которые привлекали внимание авторов таких

методологических разработок. Приходится констатировать, что физические закономерности конкурирующего развития встречных газоразрядных процессов не были там предметом исследования. Предлагаемые расчетные алгоритмы пытались воспроизвести случайный характер траектории нисходящего лидера молнии, именно нисходящего, потому что взаимосвязанный с ним восходящий лидер противоположной полярности почему-то не принимался во внимание, уточнялось распределение заряда по длине канала нисходящего лидера с учетом случайных искривлений его траектории и длины ступеней, однако без влияния многочисленных протяженных ветвей, которые свойственны большинству молний. Детально рассчитывалось распределение электрического поля в окрестности вершин молниеотводов и защищаемых ими объектов, хотя и в чисто электростатическом приближении, без учета весьма весомого объемного заряда, внедренного бесстримерной короной в паузах между вспышками молний. Все это не в состоянии уточнить главный вопрос, — как меняются характеристики встречных разрядов при их конкурирующем развитии под влиянием электрического поля атмосферы, нарастающего различным темпом за счет приближения нисходящего лидера, способного продвигаться с различной скоростью и нести различный электрический заряд.

Нет однозначного ответа даже на элементарный вопрос, — в какую сторону меняется результат конкурирующего развития встречных лидеров в зависимости от изменения высоты ориентировки лидера нисходящей молнии. Согласно расчетным данным рис. 8 рост тока молнии от минимально возможной величины до 200 кА увеличивает высоту ориентировки в пределах порядка величины. Это ведет к увеличению длины разрядных промежутков от головки нисходящего лидера до молниеотвода и до защищаемого объекта, а следовательно, и их средних пробивных напряжений. В итоге согласно вероятностной методике [6, 12] должна увеличиться вероятность прорыва молнии к защищаемому объекту.

Тем не менее, в молниезащите бытует и диаметрально противоположная точка зрения, согласно которой к защищаемому объекту прорываются только самые слабые молнии с низким погонным зарядом и соответственно малой высотой ориентировки. Чтобы такое стало возможным, приходится предположить достаточно сильную зависимость степени взаимного влияния встречных лидеров от заряда, транспортируемого нисходящим лидером молнии. Так ли это — вопрос остается открытым даже для лабораторных условий и нуждается в детальных исследованиях, в первую очередь, экспериментальных. Методический подход к ним принципиально отличается от модельных исследований защитного действия

молниеотводов, которые даже при использовании разрядных промежутков длиной в 20–30 м все-таки приходится считать мелкомасштабными, результаты которых не удастся транспонировать однозначно на разряд молнии. При организации исследований конкурирующего развития встречных лидеров воспроизводства лидера нисходящей молнии не требуется. В разрядных промежутках достаточно обеспечить электрическое поле, свойственное у заземленных сооружений полю нисходящей молнии, что вполне доступно существующим источникам высокого напряжения на действующих отечественных испытательных стендах. Что же касается высоты и конфигурации испытуемых электродов, расстоянию между ними и длины формирующихся встречных лидеров, то все это не нуждается в масштабировании, когда используются разрядные промежутки длиной в десятки метров.

Методика экспериментальной оценки степени взаимного влияния встречных лидеров достаточно разработана [6, 22]. Показателем эффекта здесь могут служить кривые распределения разрядных напряжений. Как известно, при одновременной подаче напряжения от общего источника на два несвязанных разрядных промежутка с интегральными кривыми распределения $\Phi_1(U)$ и $\Phi_2(U)$ распределение для системы в целом подчиняется соотношению

$$\Phi_{\text{sys}}(U) = \int_0^U \{ \varphi_1(U)[1 - \Phi_2(U)] + \varphi_2(U)[1 - \Phi_1(U)] \} dU, \quad (15)$$

где $\varphi_1(U)$ и $\varphi_2(U)$ — плотности вероятности этих распределений. По мере усиления взаимного влияния распределение пробивных напряжений системы становится более детерминированным, асимптотически приближаясь к распределению для того из промежутков, где лидерный процесс формируется опережающим темпом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Практическая молниезащита нуждается в достоверных оценках частоты ударов молнии с конкретным значением тока, превышающим опасный уровень для защищаемого объекта. Подобная задача не имеет достоверного решения, поскольку существующая статистика токов молнии фактически характеризует высотные сооружения и не может быть распространена на объекты ординарной высоты.

2. Развитые представления о механизме ориентировки молнии дают основания для организации прямых регистраций тока молнии в наземные сооружения высотой 20–100 м, а разработанная импульсная измерительная техника

позволяет при реальных материальных затратах набрать в течение 10 лет статистические данные, достаточные для решения прикладных задач в области молниезащиты объектов современной техники.

3. Располагая достоверной статистикой тока молнии, на основании развитых физических моделей можно получить расчетные зависимости от этого параметра важнейших в прикладном отношении характеристик, определяющих процесс ориентировки молнии и его результаты.

4. Формирующиеся в последние годы расчетные модели для оценки надежности защитного действия молниеотводов не затрагивают механизма конкурирующего развития встречных лидеров и потому не способствуют развитию физических представлений о механизме выбора точки удара молнии в системе молниеотвод-объект.

5. Совершенствование практической молниезащиты нуждается в формировании теории и расчетной модели механизма взаимодействия встречных разрядов и их управляющего воздействия на канал молнии. Современные источники высокого напряжения позволяют выполнить необходимые экспериментальные исследования на полномасштабных моделях, благодаря чему их результаты могут быть непосредственно перенесены на разряд молнии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купrienko В.М., Григорьев А.А., Деметриадес Г.И., Кадзов Г.Д. // Тр. II Российской конф. по молниезащите, Москва, 2010. 6 с.
2. Купrienko В.М. // Электричество. 2015. № 4. С. 20.
3. Александров Г.Н., Базелян Э.М., Иванов В.Л., Садыхова Е.А. // Электричество. 1973. № 3. С. 63.
4. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning Physics and Effects. Cambridge Univ. Press. 2003.
5. Kasemir H.W. // J. Geophys. Res. 1960. V. 65. P. 1873.
6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
7. Мучник В.М. Физика грозы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974.
8. Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Carpenter R.B., Jr., Drabkin M.M., Raizer Yu.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 3256.
9. Александров Н.Л., Базелян Э.М., Райзер Ю.П. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 84.
10. Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Alessandro F.D., Raizer Yu. P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 1225.
11. Горин Б.Н., Шкилев А.В. // Электричество. 1976. № 6. С. 31.
12. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1978.
13. Lightning Protection / Ed. by Golde R.H. Academic Press, 1977.

14. *Bazelyan E.M., Raizer Yu.P., Aleksandrov N.L.* // J. Phys D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 4133.
15. *Bazelyan E.M., Raizer Yu.P., Aleksandrov N.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. (17). P.17.
16. *Александров Г.Н.* Молния и молниезащита. 2007. С.-Петербург.: ЛПИ, 2007.
17. *Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е.* // Письма в ЖТФ. 2015. Вып. 6. С. 34.
18. *Разевиг Д.В.* Атмосферные перенапряжения на линиях передачи. М.: Госэнергоиздат, 1959.
19. *Berger K.* // J. FranklinInst. 1967. V. 283. P. 478.
20. *Чулков А.Н., Базелян Э.М., Козлов С.В., Шурупов А.С., Козлов А.В.* // Тр. IV Российской конф. по молниезащите. С.-Петербург. 2014. С. 87.
21. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. М.: Изд. МЭИ, 2003.
22. *Базелян Э.М., Левитов В.И., Пулавская И.Г.* // Электричество. 1974. № 5. С. 44.

Mechanism of Orientation and Parameters of Lightning in Context of Lightning Protection

Е. М. Bazelyan^a

^a *Krzhizhanovskii Power Engineering Institute, Moscow, 117927 Russia*
e-mail: bazelyan@eninnet.ru

Abstract—Details of the process of lightning formation and orientation of the downward leader required to solve applied problems in the field of lightning protection are considered. It is shown that it is necessary to take into account the mechanism of the bipolar leader formation in the thundercloud electric field, according to which the thunderstorm cell cannot be regarded as a conducting charged electrode, the potential carried by the downward leader channel is determined by the start point and path of the lightning, and the effect of the thunderstorm cell charge reveals itself to a much less degree. An algorithm is proposed for calculating the orientation height, charge per unit channel length, and attraction radius of lightning from the value of the return stroke current. It is stated that lightning current measurements currently used at tall structures cannot serve as a basis to estimate the frequency of dangerous lightning strikes to structures of ordinary height. A scheme of the field research of lightning is proposed that allows the required statistics of lightning currents to be accumulated for a foreseeable time period at admissible material costs. The need to study the mechanism of the competing development of counter discharges from ground-based electrodes is proven, and the relevant technique is offered.