

ПРОБЛЕМА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗРЯД МОЛНИИ

© 2021 г. Э. М. Базелян*

АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», Москва, Россия

*e-mail: bazelyan@eninnet.ru

Поступила в редакцию 30.09.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 03.11.2020 г.

Установлена специфика развития встречного разряда от заземленного электрода в поле отрицательного ступенчатого лидера молнии. Показано, что управляющие импульсы высокого напряжения эффективны только при воздействии непосредственно на встречный лидер. Получены аналитические выражения для оценки условий старта встречного разряда непосредственно в стримерной форме, минуя стадию нестационарной ультракороны, а также для определения амплитуды управляющего импульса, способного возбудить восходящую молнию от электрода заданной высоты в атмосфере, свободной от заряда ультракороны. Численным моделированием определены параметры управляющего импульса напряжения для возбуждения триггерной молнии в реальной грозовой обстановке. Установлено резкое снижение эффективности управляющих воздействий длительностью в единицы микросекунд. Экспериментально доказано, что последствиями воздействия таких импульсов является задержка формирования встречного лидера, но никак не его стимулирование. Установлена причина снижения эффективности молниеотводов раннего стримерного инициирования по сравнению с традиционными той же высоты

Ключевые слова: молния, электрическое поле, встречный разряд, управляющее напряжение, компьютерное моделирование, ультракорона, стример, лидер, активный молниеотвод

DOI: 10.31857/S0367292121030033

ВВЕДЕНИЕ

Положительный ответ на вопрос о возможности управления разрядом молнии не вызывает сомнений. Основанием к этому является многолетний опыт искусственного воспроизводства так называемых триггерных молний, которые в грозовой обстановке стартуют от вершины малогабаритной ракеты, поднимающей на высоту около 200 м заземленную проволоку [1]. Не менее убедительным представляется и факт зарождения молний от крупногабаритных авиалайнеров, пролетающих в непосредственной близости от заряженных облаков [2]. Анализ эффективности управляющих воздействий на молнию излучением мощных лазеров представлен в обзоре [3]. Проблема заключается не в установлении факта управления молнией, а в оценке уровня эффективных управляющих воздействий. Она стала предметом повышенного внимания в последние годы в связи с насыщением рынка средств молниеотводами так называемыми активными молниеотводами, которые, по мнению их разработчиков, обеспечивают высокую надежность защиты от прямых ударов молнии на большой территории.

Внимание к искусственному изменению условий формирования длинного искрового разряда проявилось еще в начале прошлого века, когда в лаборатории М. Кюри безуспешно пытались понизить электрическую прочность воздуха за счет его радиоактивного облучения. Тем не менее, неудача не помешала массовому появлению в середине прошлого века радиоактивных молниеотводов с рекламными гарантиями исключительно высокой надежности перехвата нисходящих молний. О них уже давно никто не вспоминает сегодня, рекламируя новые конструкции активных молниеотводов. Всех их объединяет единый принцип построения рекламы. Ее основу составляет описание некоторого реально существующего физического явления, принципиально способного изменить условия зарождения или траекторию длинной искры. При этом умалчивается требуемый уровень управляющего воздействия, его полевые и энергетические характеристики. Разработчики таких систем мало смущают результаты анализа работы активных молниеотводов в реальных условиях, которые демонстрируют достаточно высокую вероятность прорыва молнии в их зону защиты [4]. Контраргументом здесь служит тот факт, что надежность работы

любого защитного средства заведомо меньше 1, а конкретный момент прорыва молнии к защищаемому объекту нельзя прогнозировать. Представляется естественным и некоторое скептическое отношение к результатам сравнительных испытаний активных молниеотводов и традиционных той же высоты в полевых [5] и лабораторных условиях [6]. Невзирая на действие дополнительного импульса напряжения в этих экспериментах, стимулирующего более ранний старт встречного разряда от вершины активного молниеотвода, в экспериментах наблюдался преимущественный перехват искрового канала не им, но традиционным молниеотводом, лишенным каких-либо управляющих воздействий.

Целенаправленная критика активных молниеотводов, в первую очередь ESE-системы (раннее стримерное инициирование), длится без особого успеха не менее двух десятилетий. Как правило, основой критических работ является сопоставление на основе компьютерного моделирования условий изменения электрического поля в атмосфере за счет формирования лидера нисходящей молнии и встречного лидера, стартующего от вершина молниеотвода [7–9]. К сожалению, результаты таких работ ограничиваются качественными выводами частного характера. Они не способны дать однозначную количественную оценку фактической эффективности рассматриваемой системы молниезащиты. Как пример можно привести в русском переводе основной вывод [7]: “Однако ESE-эффект не применим к молниеотводам при воздействии электрического поля лидера нисходящей молнии по той причине, что скорость роста электрического поля молнии меняется от медленной к более быстрой, тогда как рост коммутационного электрического поля (используемое для лабораторных испытаний ESE-молниеотводов), напротив, меняется от быстрого к медленному.” На основе сказанного вряд ли можно пояснить неожиданные результаты экспериментов [5, 6], тем более, убедить отказаться от производства и продаж ESE-молниеотводов.

Максимум, на что идут критики ESE-молниеотводов, это приравнивание их защитного действия к эффективности молниеотводов традиционного исполнения [8], — факт далеко не очевидный, если принять во внимание уже упоминавшиеся результаты экспериментов [5, 6].

Чтобы оценить возможности управления молнией в интересах молниезащиты, представляется целесообразным рассмотреть количественно последствия воздействия управляющего напряжения на условия старта и последующего развития встречного разряда от вершины молниеотвода, сосредоточив внимание на оценке влияния амплитуды управляющего импульса и его времен-

ных параметров в диапазоне, свойственном формированию нисходящей молнии.

1. ВСТРЕЧНЫЙ РАЗРЯД ОТ НАЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Этот вид разряда представляет наибольший интерес с рассматриваемых позиций, поскольку он наиболее доступен для управляющих воздействий, а его развитие предопределяет точку удара нисходящей молнии [10] или условия старта восходящей [11]. Детальные исследования встречного разряда показали, что в медленно нарастающем электрическом поле грозового облака он начинается в форме нестационарной бесстримерной ультра короны, отличающейся слабым коронным током микроамперного уровня [11]. Корона формируется не только от высоких сооружений. В грозовой обстановке коронируют самые различные объекты с вершиной малого радиуса, например, ветви деревьев, кустарник и даже трава. В совокупности это создает над земной поверхностью облако объемного заряда, снижающее под собой электрическое поле грозового облака.

Компьютерная модель нестационарной бесстримерной короны, развитая в [12], использует экспериментально подтвержденное предположение о стабилизации напряженности электрического поля на коронирующей поверхности [13]. Модель позволяет оценить динамику заполнения объемным зарядом приэлектродного пространства у коронирующего очага и проследить за экранирующим действием этого заряда в электрическом поле грозового облака, нарастающем во времени, например, по релаксационному закону

$$E_0(t) = E_{0\max}(1 - e^{-t/T}) \quad (1)$$

и наложенного на него поля заряда лидера нисходящей молнии [14].

Переход встречного разряда в энергетически более мощную стримерную форму требует усиления коронного тока до некоторой критической величины, зависящей от радиуса коронирующей вершины r_0 . В [15] условие перехода отождествлялось с отрывом от коронирующей поверхности и смещением в глубину промежутка области с максимальной напряженностью электрического поля, что воспринималось как рождение волны ионизации. Для электродов сферической геометрии значение критического тока по этому условию может быть оценено как

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

где E_{cor} — порог зажигания короны, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, μ_i — подвижность основного сорта коронных ионов. Для электродов типичного радиуса $r_0 = 1-2$ см критический ток, равный 5–10 мА, в медленно нараста-

ющем поле грозового облака не достигим даже для экстремально высоких сооружений, высотой ~500 м.

На условия формирования нестационарной ультракороны в значительно большей степени влияет не величина электрического поля атмосферы, а скорость его роста. В начальный момент времени коронный ток тождественно равен скорости роста заряда на коронирующей поверхности электрода. Для коронирующей полусферы

$$i_{cor} = 2\pi\epsilon_0 r_0^2 \frac{dE}{dt}, \quad (3)$$

Подстановка в (3) $i_{cor} = i_{cr}$ с учетом (2) дает оценку скорости роста поля, гарантирующего старт встречного разряда непосредственно в стримерной форме, минуя ультракорону

$$\frac{dE_0}{dt} = A_{Ecr} = \frac{4\mu_i}{r_0 K_E} E_{cor}^2, \quad (4)$$

где $K_E = E/E_0$ – кратность усиления поля атмосфера у вершины электрода.

Для стержневого электрода с радиусом вершины ~1 см независимо от его высоты при $K_E \approx 10^4$ критическая скорость роста электрического поля близка к 10^8 В/(м с). Условие легко достижимо в современной высоковольтной лаборатории. Для этого к электроду нужно подать управляющий импульс напряжения около 40 кВ (порог зажигания самостоятельного разряда при $r_0 = 1$ см) с фронтом ~4 мкс.

В реальных условиях критическая скорость роста воздействующего напряжения может быть и заметно ниже оцененной вследствие статистического времени запаздывания разряда у электрода с малой площадью вершины. Для электрона, появившегося в зоне сильного поля с запаздыванием Δt относительно начала роста напряжения, ситуация будет восприниматься как воздействие прямоугольного импульса напряжения амплитудой $U = \Delta t(dU/dt)$.

Существование разряда в стримерной форме еще не означает, что от электрода будет формироваться встречный лидер. Как известно [16], положительная длинная искра при медленной скорости роста напряжения имеет явно выраженную фазу ступенчатого развития. Компьютерный анализ, выполненный в [17], дает основание считать, что канал, сформированный в процессе развития ступеней и четко фиксируемый на непрерывных фоторазвертках в видимом оптическом диапазоне, представляет собой лишь след, оставленный достаточным быстрым стримером, скоростью формирования которого достигает 10^9 см/с. Газовая температура такого канала не превышает 400–500 К, а проводимость не сохраняется даже в течение 1 мкс. Для старта лидера с высокотемпературным проводящим каналом необходима мощ-

ная стримерная вспышка с длиной ветвей порядка 1 м. Падение напряжения на ней должно быть не меньше 400 кВ. При таком напряжении суммарный ток стримерных ветвей обеспечивает разогрев газа в объеме их общего стебля, стимулируя там старт лидерного канала [18].

В медленно нарастающем поле атмосферы условие (2) не выполняется не только в момент старта встречного разряда, но даже при длительном формировании короны, когда ее ток многократно превосходит начальное значение (3). Переход разряда в стримерную форму и последующий старт встречного лидера возможен только за счет быстрого усиления электрического поля зарядом лидера нисходящей молнии. В простейшей модели с равномерным распределением погонного заряда τ_L по длине канала скорость роста электрического поля у поверхности земли определяется как

$$\frac{dE_0}{dt} \approx \frac{\tau_L v_L}{2\pi\epsilon_0 h^2} \quad (5)$$

Здесь v_L – усредненная скорость роста лидера нисходящей молнии, который при выполненной оценке предполагался прорастающим строго вертикально по оси заземленного электрода, а h – высота его головки над поверхностью земли. Так, при достаточно типичных значениях $\tau_L = 0.5$ мКл/м и усредненной скорости $v_L = 2 \times 10^5$ м/с скорость роста электрического поля атмосферы у поверхности земли превысит 10^8 В/(м с), когда канал молнии снизится до 135 м относительно поверхности земли.

Как правило, лидер отрицательной нисходящей молнии продвигается ступенчато. Механизм ступени определяется развитием объемного лидера, который стартует от границы ветвей отрицательной стримерной зоны и прорастает в основном в сторону отрицательного нисходящего лидера. [19]. При их контакте объемный лидер перезарядается, приобретает потенциал объединенного лидерного канала. В качественном отношении волновой процесс перезарядки подобен главной стадии молнии (return stroke в английской терминологии). Скорость волны перезарядки зависит от величины скачка напряжения, который при этом реализуется. При ударе молнии в землю речь идет об изменении потенциала вплоть до 100–200 МВ, когда скорость волны может достигать 1/2–2/3 скорости света. По мере снижения потенциала и, соответственно, тока скорость волны становится заметно меньше. Именно такой режим должен быть характерным для ступеней лидера отрицательной молнии. Расчетные данные на рис. 1 дают представление о возможной скорости волны перезарядки ступени, длина которой в среднем близка к 30 м, а наиболее протяженные достигают 100–200 м [20]. Их ток и потенциал недоступны измерению. Поэтому ком-

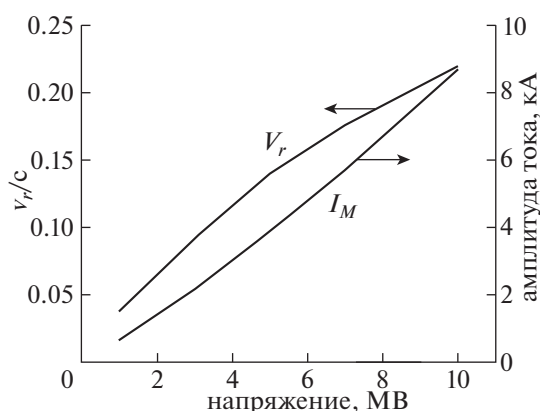


Рис. 1. К оценке скорости распространения волны перезарядки в ступени отрицательного лидера.

пьютерные оценки были выполнены при вариации напряжения перезарядки в пределах 1–10 МВ, чему соответствует амплитуда тока в процессе перезарядки 0.5–9 кА. Все параметры расчетной компьютерной модели точно соответствовали представленным в [21].

Расчетные данные показали, что даже при минимальных значениях напряжения и тока скорость волны, перезаряжающей канал ступени, не опускается ниже 10^7 м/с, что почти на 2 порядка больше усредненной скорости лидера нисходящей отрицательной молнии.

Элементарная оценка при длине ступени $\Delta l \gg h$ показывает, что скорость роста электрического поля у поверхности земли, возбужденная формированием ступени на высоте h определяется как

$$\frac{dE_0}{dt} = A_E \approx \frac{\tau_L V_r}{2\pi\epsilon_0 h^2} \quad (6)$$

Откуда следует, что критическая скорость роста поля $A_E \sim 10^8$ В/(м с) может быть обеспечена средней по силе молнией с погонным зарядом $\tau_L = 0.5$ мКл/м при высоте ступени над уровнем земли $h \sim 1000$ м даже в случае весьма низкой скорости распространения волны перезарядки, порядка 10^7 м/с. Появление такой ступени обеспечивает переход встречного разряда в стримерную форму. Однако, в подобных условиях возникшая стримерная вспышка не приведет к старту встречного лидера, поскольку (как уже отмечалось выше) для разогрева ее стебля требуемый энергозатрат в его объем может быть обеспечен лишь когда падение напряжения на стримерных ветвях превысит 400 кВ [18]. Компьютерные оценки по расчетной программе [12, 14] показали, что для этой цели лидер нисходящей молнии с погонным

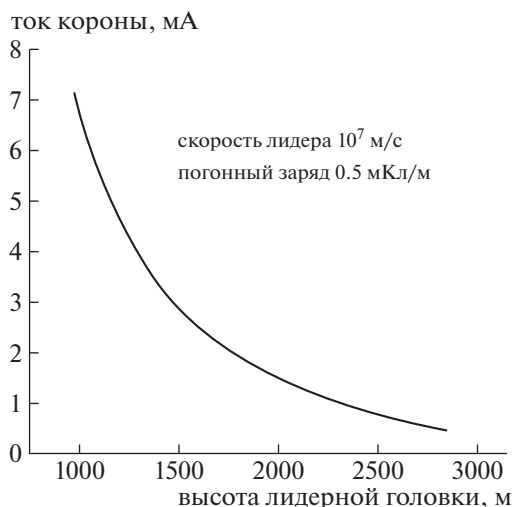


Рис. 2. Динамика роста тока ультракороны от стержневого электрода высотой 30 м в процессе развития стреловидного лидера с погонным зарядом 0.5 мКл/м при скорости 10^7 м/с.

зарядом 0.5 мКл должен приблизиться к земле на расстояние не более 650 м.

Следует отметить, что скорость порядка 10^7 м/с характерна и для непрерывного роста стреловидного лидера последующих компонентов молнии. Поэтому произведенная здесь оценка в полной мере распространяется и на возбуждаемый ими встречный разряд. Расчетные данные по компьютерной программе [12, 14] на рис. 2 демонстрируют динамику роста тока ультракороны в процессе развития стреловидного лидера, который стартовал на высоте 3000 м и продвигался к земле вертикально с радиальным смещением 90 м относительно стержневого электрода высотой 30 м и радиусом 1 см. Погонный заряд стреловидного лидера в расчете оставлен равным 0.5 мКл/м. Ток короны достиг критического значения, когда головка стреловидного лидера опустилась до высоты 1100 м, что не слишком отличается от ранее полученного результата для ступенчатого отрицательного лидера. Как уже показано выше, стримерная вспышка в подобных условиях не в состоянии возбудить старт встречного лидера.

Таким образом, момент старта встречного лидера трудно определить однозначно. Он в значительной степени зависит от таких случайных параметров, как погонный заряд лидера молнии, средняя скорость его развития, число ступеней, длина каждой из них и высота их возникновения. Это означает, что случайным образом варьируется и электрическое поле атмосферы, в котором предстоит продвигаться встречному лидеру.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ни ультракорона с ее объемным зарядом, ни стримерная вспышка, сохраняющая проводимость лишь в течение десятых долей микросекунды, не в состоянии воздействовать на ориентировку лидера нисходящей молнии. На это способен только встречный лидер, длина которого для практически значимого эффекта, как минимум, должна быть сопоставима с высотой объекта, от которого он стартовал. Следовательно, эффективность управляющих воздействий должна оцениваться способностью не только стимулировать старт встречного лидера, но и поддерживать его устойчивое развитие в течение достаточно длительного времени. Результаты этого раздела получены при помощи упрощенной расчетной компьютерной модели лидерного процесса от заземленного стержневого электрода конкретной высоты и радиуса [18]. В качестве исходных данных модель использует результаты расчета нестационарной ультракороны от вершины электрода в электрическом поле атмосферы, нарастающем по заданному закону в течение заданного времени. По результатам этих расчетов в программу расчета встречного лидера вводится исходное распределение электрического поля в слое объемного заряда ультракороны над вершиной электрода. Электрическое поле грозового облака во время расчета встречного лидера принимается неизменным. Условия зарождения встречного лидера не рассматриваются. Предполагается, что его старт априори обеспечен стримерной вспышкой требуемой мощности.

На каждом расчетном шаге определяется распределение заряда по поверхности металлического стержневого электрода и уже сформированного канала встречного лидера, а также эффективный потенциал его головки, который служит исходным параметром для расчета длины стримерной зоны лидера, его тока, продольной напряженности электрического поля в канале и скорости роста канала. Под эффективным напряжением понималась разность потенциалов собственно лидерной головки и точки ее расположения, где поле создается объемным зарядом короны и априори заданным электрическим полем атмосферы (его источник грозовое облако и канал лидера нисходящей молнии). Достаточно большое время формирования встречного лидера позволило считать, что в большей части его канала состояние плазмы не отличается от состояния квазистационарной дуги, поле которой согласно [22] принято обратно пропорциональным лидерному току.

$$E_L \approx \frac{a_E}{i_L} \text{ В/м}, \quad (7)$$

где $a_E = 3 \times 10^4$ ВА/м. При этом скорость роста встречного лидера задается эмпирическим соотношением через эффективное напряжение на головке его канала

$$v_L \approx b_v \sqrt{U_{ef}} \text{ мс}, \quad (8)$$

где $b_v = 15 \text{ м}/(\text{В}^{1/2} \text{ с})$. Ток лидера определяется скоростью поставки заряда формирующемуся каналу с погонной емкостью C_L

$$i_L = C_L U_{ef} v_L, \quad (9)$$

причем погонная емкость лидера определяется в основном зарядом его чехла радиусом R_{cov}

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(L/R_{cov})} \quad (10)$$

В цитируемых расчетах использовано значение $C_L = 24 \text{ пФ/м}$, заимствованное из экспериментов с длинной лабораторной искрой [23]. Оно не принципиально отличается от значения $C_L = \pi\epsilon_0$, принятого в [21].

Следует подчеркнуть качественный характер расчетной модели, которая претендует только на выявление общих представлений о механизме управления встречным лидером и потому может мириться с погрешностями оценки конкретных параметров на уровне десятков процентов, в первую очередь, из-за неопределенности значения погонной емкости встречного лидера и зависимости скорости его роста от энерговклада в канал. Тем не менее, тестирование модели по результатам лабораторных исследований лидерного процесса в длинных лабораторных воздушных промежутках [22] показало правомерность ее применения в рамках поставленной задачи.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методологически целесообразно первоначально исключить учет экранирующего эффекта объемного заряда ультракороны и оценить уровень управляющего напряжения, ΔU на электроде относительно земли, которое способно поддерживать устойчивое формирование встречного лидера в электрическом поле атмосферы, свободной от объемного заряда. Используя (7)–(9), для этой цели можно записать элементарное уравнение

$$\Delta U = \left(\frac{a_E}{b_v C_L E_0} \right)^{2/3} - E_0 h \quad (11)$$

Оно демонстрирует тот факт, что лидер продолжит свое развитие без торможения, пока продольная напряженность электрического поля в его канале не будет превышать поле в атмосфере E_0 . Уровень эффективного управляющего напряжения ΔU определяется двумя основными пара-

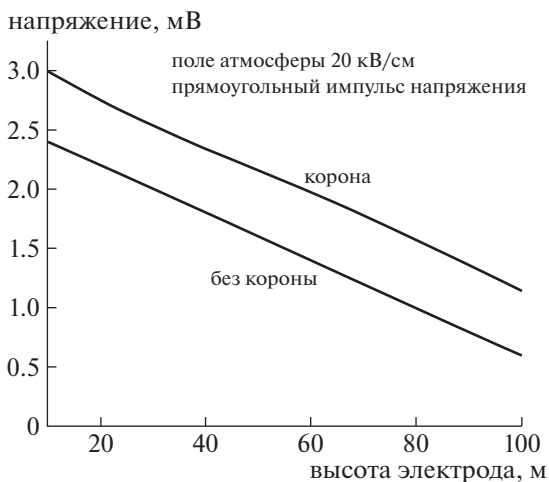


Рис. 3. Расчетная амплитуда управляющего импульса напряжения неограниченной длительности для возбуждения восходящей молнии.

метрами, — напряженностью электрического поля атмосферы E_0 и высотой электрода h . Зависимость $\Delta U(h)$ построена на рис. 3 по выражению (10) для $E_0 = 20$ кВ/м. Более сильное поле грозового облака у поверхности земли маловероятно вследствие экранирования земной поверхности зарядом короны от многочисленных локальных источников усиления поля. По мере роста высоты объекта от 10 до 100 м требуемое управляющее воздействие монотонно снижается, но даже для предельно высокого оно не опускается ниже 500 кВ (рис. 3). Если же ориентироваться на ординарную высоту сооружения около 30 м, управляющее напряжение составит примерно 2 МВ. Важно учесть, что при более вероятном значении поля атмосферы $E_0 = 10$ кВ/м это значение почти удвоится, достигнув 3.8 МВ.

Таким образом, управление неизбежно приходится связывать с использованием напряжения мегавольтного уровня. Оно увеличивается в еще большей степени в реальных условиях, когда нужно принять во внимание перераспределение электрического поля в окрестности вершины рассматриваемого электрода объемом зарядом ультракороны.

Результаты, которые здесь приводятся, характеризуют корону, формирующуюся от вершины стержневого электрода радиусом 2 см. Предполагалось, что поле атмосферы линейно нарастало до амплитудного значения 20 кВ/м в течение 10 с. Время порядка 10 с представляется минимальным для релаксации заряда в грозовой ячейке после очередного старта из нее молнии [25]. За это время передний фронт объемного заряда короны удалялся от вершины примерно на 40 м независимо от высоты электрода. Однако количество заряда в коронном слое сильно зависит от этой высо-

ты, нарастая от 6.2×10^{-5} до 1.7×10^{-3} Кл по мере ее увеличения от 10 до 100 м. Импульс управляющего напряжения в модельном расчете имел неограниченную длительность. Результаты компьютерного расчета на рис. 3 показывают, что за счет влияния короны расчетный уровень управляющего напряжения повысился примерно еще на 500 кВ независимо от высоты электрода.

Оценивая полученные результаты, следует иметь в виду, что речь идет об уровне управляющего напряжения, гарантирующего возбуждение устойчиво формирующегося встречного лидера, который способен произвести восходящую молнию, подобную триггерным молниям. Второе важное обстоятельство — неограниченная длительность импульса напряжения. Его эффективность в очень сильной степени зависит от этого параметра (рис. 4). Так в случае электрода высотой 30 м в электрическом поле 20 кВ/см найденное выше значение управляющего напряжения (2.5 МВ) при сокращении длительности импульса до 100 мкс (по уровню 0.5) было способно обеспечить развитие восходящего лидера на длину всего 3 м, а при длительности 10 мкс эффект воздействия напряжения оказывается ничтожным (~0.5 м). Ослабление управляющего воздействия при сокращении длительности импульса напряжения не удастся компенсировать увеличением его амплитуды в сколько-нибудь разумных пределах. Например, воздействие импульса напряжения с амплитудой 5 МВ при длительности 100 мкс в рассмотренном выше варианте расчета позволило сформировать встречный лидер длиной всего 5.6 м.

В прикладном отношении наибольшее внимание заслуживает ситуация, когда встречный лидер формируется в электрическом поле существенно более сильном по сравнению с тем, в котором стартовала и развивалась ультракорона. Такой расчетный компьютерный вариант воспроизводит развитие встречного разряда при значительном сближении с рассматриваемым заземленным электродом канала лидера нисходящей молнии, транспортирующего значительный заряд в чехле и на своей поверхности. Результаты модельных расчетов, представленные на рис. 5 демонстрируют зависимость амплитуды эффективного управляющего напряжения от величины внешнего электрического поля атмосферы для электрода высотой 30 м. Принято, что длительность управляющего импульса не ограничена, а ультракорона существовала на вершине радиусом 2 см в течение 10 с при линейном росте электрического поля до 20 кВ/см. По расчетным данным в электрическом поле атмосферы свыше 35 кВ/м для устойчивого формирования встречного лидера достаточно подать на электрод импульс напряжения менее 1 МВ. Однако, и в этом случае эффективность управления в сильной степени зави-

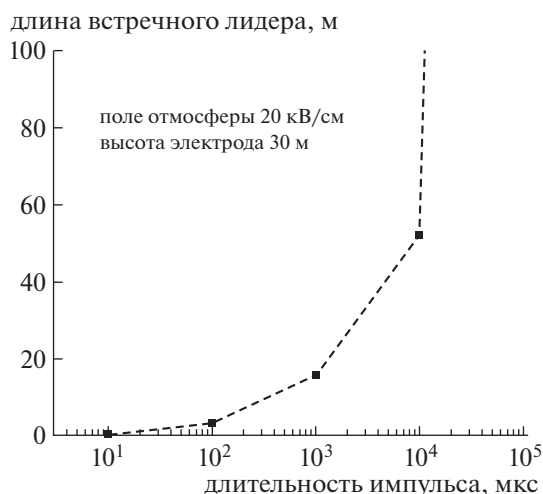


Рис. 4. Зависимость длины встречного лидера, сформированного от стержневого электрода высотой 30 м под действием управляющего импульса напряжения амплитудой 2.5 МВ различной длительности.

сит от длительности управляющего импульса. Так, в электрическом поле атмосферы 40 кВ/м при импульсе напряжения 600 кВ, достаточном при неограниченной длительности для формирования восходящей молнии от электрода высотой 30 м, при длительности импульса в 100 мкс длина встречного лидера составила 3 м, а при 10 мкс всего 1.8 м. Последствия подобных воздействий вряд ли значимы в практическом отношении.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Интерес представляют два принципиально разных пути использования управляющих воздействий. С одной стороны, хотелось бы отказаться от работы с запуском малых ракет и генерировать восходящие молнии на открытых высоковольтных стендах, используя для управляющих воздействий ГИН ультравысокого напряжения с большой емкостью в ударе. Другая задача связана с увеличением радиуса защиты молниеотвода при помощи более раннего старта и активного развития от него встречного лидера. Технические требования к источнику управляющего напряжения здесь принципиально разные из-за различных ограничений по энергоемкости, выходному напряжению, а главное, — по габаритам.

Как уже отмечалось, электрическое поле грозового облака у поверхности земли с растительным покровом и различными сооружениями вряд ли может превысить 20 кВ/м. Именно на это электрическое поле атмосферы и приходится ориентироваться, оценивая управляющее напряжение ΔU , принципиально способное возбудить восходящую молнию. Типовые высоты ГИН от-

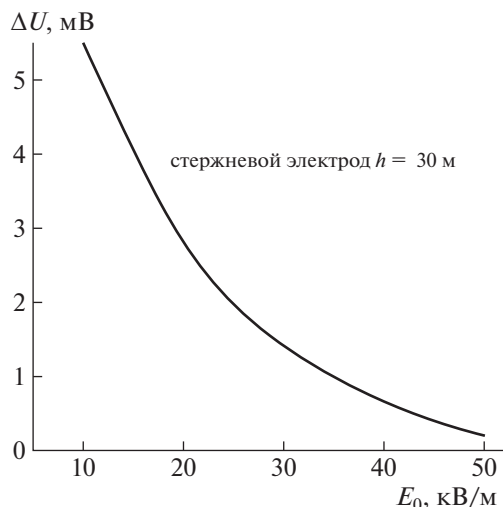


Рис. 5. Расчетная амплитуда эффективного управляющего воздействия на встречный лидер от стержневого электрода высотой 30 м в различном электрическом поле атмосферы.

крытой установки находятся в пределах 30 м. Это второй исходный параметр оценочного компьютерного расчета. Конструкция большинства ГИН ориентирована на многократную работу с выходным напряжением на уровне 5 МВ. Тем самым задается предельная величина напряжения ΔU . Об условиях старта восходящего лидера беспокоиться не приходится. При управляющем напряжении мегавольтного уровня они будут выполнены автоматически при размещении стартового электрода на крыше ГИН.

Результаты компьютерного расчета на рис. 6 демонстрируют длину сформированного встречного лидера при различной длительности управляющего импульса, снижающегося по экспоненте. Компьютерное моделирование показало, что для производства жизнеспособного лидера, рождающего восходящую молнию, длительность управляющего импульса должна быть не меньше 5 мс. Только при такой длительности ток головки канала и скорость восходящего лидера не снижаются по мере его формирования уже после выхода за пределы области, заполненной объемным зарядом ультракороны (рис. 7).

По результатам компьютерного расчета средний ток источника управляющего напряжения, поставляющий энергию в канал восходящего лидера, близок к 1 А. Так, за время около 8.75 мс в лидер длиной 285 м был поставлен электрический заряд около 7.5 мКл. При этом напряжение на выходе управляющего источника снизилось от 5.0 до 2.15 МВ. Для обеспечения такого режима работы источника управляющего напряжения, его выходная емкость должна быть не меньше 2000 пФ. Требование без проблем обеспечивается

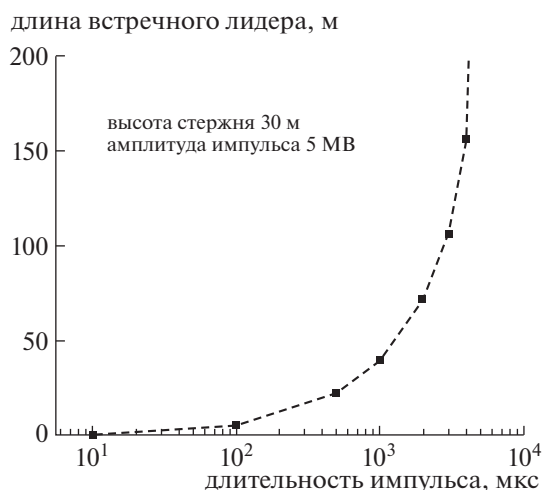


Рис. 6. Зависимость длины встречного лидера, сформированного от электрода высотой 30 м под действием управляющего импульса в 5 МВ различной длительности.

современным ГИН, собранным, например, по схеме Фитча [22], даже при учете расхода энергии на внутренние потери при формировании столь длительного импульса напряжения.

Таким образом, возбуждение триггерных молний при помощи управляющих воздействий высокого напряжения представляется принципиально возможным. Тем не менее, необходимо отметить, что технические возможности искусственного возбуждения триггерных молний сильно усложняются при попытках работы с более слабым электрическим полем атмосферы. Например, при его напряженности $E_0 = 10$ кВ/м не удастся использовать источник с выходным напряжением 5 МВ при емкости в ударе меньше 50–60 нФ.

В задачу этой статьи не входит анализ возможных технических решений по снижению допустимого уровня электрического поля атмосферы при таком иницировании или по уменьшению амплитуды и длительности управляющего напряжения. Достаточно только отметить, что подобное возможно благодаря подавлению ультракороны в окрестности расположения ГИН и быстрого выдвигания электрода высотой до 100 м от его экрана на крыше.

Крайне малая перспективность повышения эффективности молниеотводов за счет управляющего напряжения вытекает из уже выполненного анализа. Общепринято [24], что радиус стягивания молний пропорционален высоте стержневого молниеотвода ($R_{ат} = 3h_M$). Для увеличения радиуса хотя бы в 2 раза высоту молниеотвода надо приблизительно удвоить за счет восходящего лидера. Как это следует из расчетных данных рис. 6, в электрическом поле атмосферы для этой цели по-

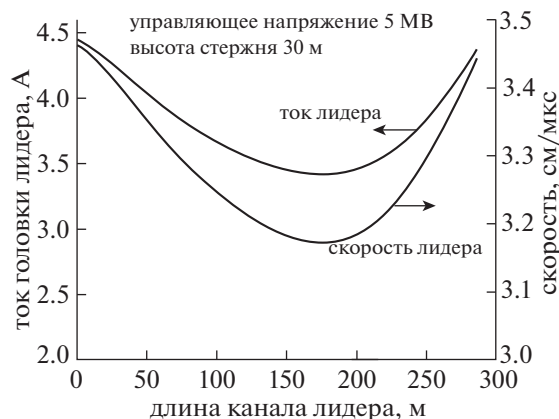


Рис. 7. Динамика изменения скорости роста встречного лидера и тока его головки при воздействии управляющего импульса амплитудой 5 МВ при длительности 5 мс. Электрическое поле атмосферы 20 кВ/м.

требуется импульс управляющего напряжения амплитудой 5 МВ и длительностью около 500 мкс — абсолютно нереальные параметры для обычного молниеотвода. Даже если предусмотреть систему синхронизации и подавать управляющий импульс уже при значительном усилении электрического поля атмосферы зарядом приближающейся нисходящей молнии, положение не станет заметно благоприятней в практическом отношении. Например, по результатам численного моделирования в поле атмосферы 40 кВ/м импульс неограниченной длительности при напряжении 600 кВ, способный обеспечить развитие восходящей молнии от электрода высотой в 30 м, создаст лидер длиной всего в 3.2 и 1.8 м при длительности в 100 и 10 мкс соответственно. Столь малое увеличение эффективной высоты электрода не может иметь практического значения. К тому же в поле атмосферы 40 кВ/м при рассматриваемых условиях встречный лидер способен вырасти на длину 1.8 м от заземленного электрода и без управляющего воздействия.

Особый интерес к амплитуде и длительности управляющего воздействия возникает в связи с оценкой эффективности молниеотводов с ранней стримерной эмиссией (ESE молниеотводы) самого различного конструктивного исполнения, которые особо активно рекламируются на мировом и отечественных рынках средств молниезащиты. Конструкция претендует на опережение старта стримерной вспышки с молниеотвода по сравнению с защищаемым объектом за счет подачи на вершину молниеотвода импульса высокого напряжения, сформированного внутренним источником. Он черпает энергию от электрического поля атмосферы благодаря току ультракороны, которая формируется от острий “активной” насадки. Объем насадки, где размещается источник

управляющего напряжения, как правило, не превышает нескольких литров. При таком объеме источник, собранный по классической схеме Маркса, не в состоянии обеспечить длительность импульса более 1–3 мкс при амплитуде близкой к 200 кВ, заявляемой в рекламных проспектах.

Чтобы произвести анализ результатов столь кратковременного воздействия напряжения на формирование импульсного разряда, недостаточно результатов численного моделирования по используемым компьютерным моделям, поскольку они не учитывают влияния объемного заряда самой стримерной вспышки, предшествующей старту встречного лидера. Следует иметь в виду двойственную природу такого влияния. Во-первых, как уже отмечалось, ток стримерной вспышки разогревает ее стембель, где при определенном энерговкладе возможно зарождение канала встречного лидера. Во-вторых, заряд стримерных ветвей резко снижает электрическое поле в приэлектродной области, задерживая продвижение родившегося лидерного канала на время, необходимое для восстановления поля за счет дополнительного подъема напряжения и в результате дрейфа объемного заряда в глубину разрядного промежутка. Эффект экранирования очень значителен. По экспериментальным данным [22] изменение заряда стримерной вспышки от 0,4 до 1,4 мкКл приводило к увеличению напряжения старта жизнеспособного лидера от стержневого электрода радиусом 1,5 см от 400 до 800 кВ.

Эксперимент, результаты которого представлены на рис. 8, позволяют оценить конкретный результат кратковременного воздействия напряжения в условиях, сходных с условиями работы ESE-молниеотводов. Стержневой электрод высотой 3 м с полусферической вершиной радиусом 1,5 см устанавливался на заземленной поверхности, контактируя с ней через резистор, на котором формировался положительный импульс напряжения длительностью 3 мкс с крутым фронтом. Амплитуда импульса достигала 300 кВ. Отрицательное напряжение амплитудой до 1,2 МВ с длительностью фронта ~ 200 мкс на плоскости, поднятой на высоту 6 м над уровнем земли, имитировало в разрядном промежутке электрическое поле атмосферы, обусловленное зарядом лидера нисходящей молнии. Оптическая картина разряда фиксировалась электронно-оптическим преобразователем с мультищелочным катодом при непрерывной развертке изображения вместе с осциллограммами напряжения на промежутке, внедренного объемного заряда и напряженности электрического поля у вершины стержня. Момент подачи кратковременного управляющего импульса мог варьироваться в широких пределах. Можно видеть, что при его воздействии возбуждалась мощная стримерная вспышка с зарядом порядка 10 мкКл, который,

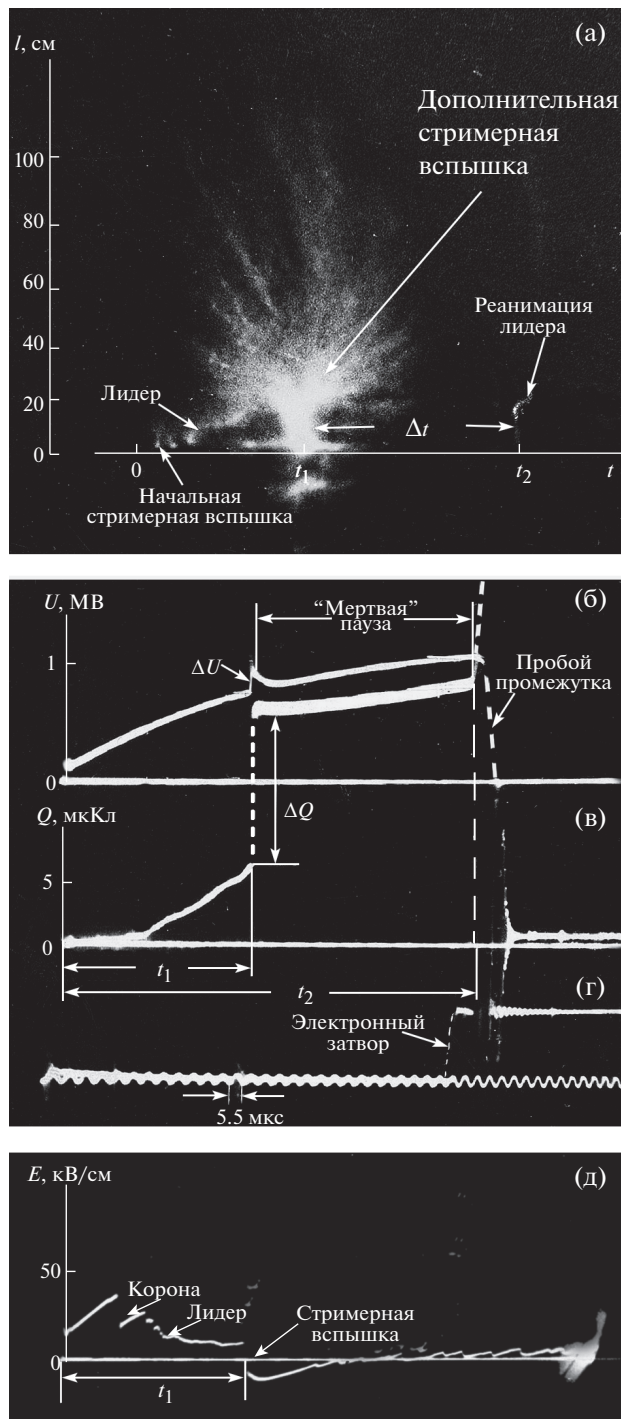


Рис. 8. Влияние на процесс развития встречного разряда кратковременного управляющего импульса напряжения в условиях, имитирующих электрическое поле атмосферы в грозовой обстановке. а) — непрерывная фоторазвертка разряда; б) — осциллограмма напряжения на промежутке; в) — осциллограмма внедренного объемного заряда; г) — метки калибровки времени и импульс управления электронным затвором; д) — напряженность электрического поля на вершине электрода.

экранируя электрическое поле у вершины стержневого электрода, снижал его вплоть до нуля и далее до перемены полярности, тем самым примерно на 80 мкс полностью прерывалось формирование встречного разряда. В результате электрическая прочность испытываемого воздушного промежутка не только не снижалась за счет дополнительного воздействия напряжения, но, напротив, увеличилась на 20–25%. С учетом этого факта становятся понятными результаты испытаний ESE молниеотводов в полевых и лабораторных условиях [5, 6], показавшие их существенно меньшую эффективность по сравнению с обычными стержневыми равной высоты, – более чем убедительное основание для отказа от их применения в практике молниезащиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ механизмов развития встречного разряда от наземных сооружений в грозовой обстановке показал, что управляющее воздействие высокого напряжения должно быть направлено на изменение момента старта и обеспечение устойчивости развития встречного лидера. Изменение условий возникновения стримерной вспышки само по себе не является эффективным.

2. Получено аналитическое выражение для оценки величины управляющего воздействия на встречный лидер в атмосфере, свободной от объемного заряда ультракороны. В типичном грозовом поле 20 кВ/м требуемая амплитуда управляющего импульса неограниченной длительности, возбуждающая триггерную молнию, снижается от 2.4 до 0.6 МВ при увеличении высоты стержневого заземленного электрода в пределах 10–100 м.

3. В условиях, аналогичных представленным в п. 2, по результатам компьютерного моделирования учет объемного заряда ультракороны повышает амплитуду эффективного управляющего импульса еще на 0.5 МВ независимо от высоты электрода.

4. Современные ГИН открытой установки с выходным напряжением от 5 МВ пригодны для инициирования восходящих триггерных молний в грозовой обстановке.

5. Резкое снижение эффективности управляющих воздействий на встречный лидер при сокращении длительности импульса напряжения исключает их применение в практической молниезащите для расширения радиуса защиты молниеотводов.

6. Использование внутреннего источника напряжения в ESE молниеотводе, формирующего импульсы напряжения длительностью в единицы микросекунд, приводит к снижению радиуса защиты, а не расширению его, как это заявляется их производителями. По указанной причине приме-

нение ESE молниеотводов в практике молниезащиты нельзя считать допустимым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning Physics and Effects. Cambridge: Univ. Press., 2003
2. Методическое письмо о причинах, приводящих к поражению самолетов молниями в холодное время года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 31 с.
3. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 753
4. *Hartono A., Robiah I.* // Proc. 25th Intern. Conf. Lightning Protection, ICLP Rhodes, 2000. P. 357
5. *Курпиенко В.М.* // Тр. IV Российской конф. по молниезащите. С.-Петербург. 2014. С. 214.
6. *Rison W.* // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), Toronto, Ont., 2003, pp. 2195–2200. V. 4. <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1270959>
7. *Becerra M., Cooray V.* // J. Physics D: Applied Physics. 2008. V. 41. № 8. 08520.
8. *Uman M.A., Rakov V.A.* // Bulletin of the American Meteorological Society, December 2002. P. 1809.
9. *Cooray V.* // Electra. 2011, № 2586 p. 36. Report WG C 4.405
10. Lightning Protection / Ed. Golde R.H. Academic Press, 1977
11. *Александров Н.Л., Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 84.
12. *Александров Н.Л., Базелян Э.М., Дробкин М.М., Карпенгер Р.Б., Райзер Ю.П.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 1032.
13. *Богданова Н.Б., Певчев Б.Г., Попков В.И.* // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1978. № 1. С. 96
14. *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
15. *Bazelyan E.M., Raizer Yu.P., Aleksandrov N.L.* // Plasma Sources: Sci. Technol. 2008. 17. 024015.
16. *Стекольников И.С., Шкилев А.В.* // ДАН СССР. 1963. Т. 151. № 5. С. 1085.
17. *Базелян Э.М., Попов Н.А.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 237.
18. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: МФТИ, 1977. 320 с.
19. *Горин Б.Н., Шкилев А.В.* // Электричество. 1976. № 6. С. 31.
20. *Uman M.* The Lightning Discharge. N Y.: Academic Press, 1987. 377 p.
21. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
22. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 734 с
23. Les Renardieres Group 1977 Positive discharges in long air gaps – 1975 results and Conclusions // Electra. 1977. V. 53. P. 31.
24. Lightning protection. IEC 62305 (Стандарт по молниезащите междунар. электротехнической комиссии)
25. *Мучник В.М.* Физика грозы. Л.: Гидрометиздат, 1974. 351 с.