

# Расчет площади стягивания молнии методом наведенного заряда<sup>1</sup>

ШИШИГИН С.Л., МЕЩЕРЯКОВ В.Е., ШИШИГИН Д.С.

Площадь стягивания молнии определяется двумя процессами – электростатическим притяжением (стягиванием) заряда лидера к наведенному заряду наземного объекта и развитием встречного лидера. Рассматривается первый из них. В предположении, что усредненный лидер молнии движется по силовым линиям, методика исследования заключается в анализе искажения силовой линии электростатического поля заряженного облака, проведенной через крайнюю точку зоны захвата. Заряд лидера и зона захвата определяются по методу Г.Н. Александрова. Показано, что наведенный заряд невысоких объектов компенсируется его зеркальным зарядом и электростатическое стягивание незначительно. Исследовано влияние высоты и диаметра стержневых объектов, тока молнии и рельефа местности на площадь стягивания. Для сравнения приведены данные действующих стандартов молниезащиты и работ других исследователей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: лидер молнии, стягивание, площадь стягивания, радиус стягивания, метод наведенного заряда

Прогнозируемое число прорывов молнии через систему молниеотводов – основной критерий надежности защиты объекта от прямого удара молнии – определяется грозовой активностью в данной местности, надежностью молниезащиты и площадью стягивания молнии. Последний параметр в действующих стандартах молниезащиты определен наименее точно.

Площадь стягивания стержневого молниеотвода или башни высотой  $h$  равна  $\pi R_a^2$ , где  $R_a$  – радиус стягивания. Площадь стягивания здания с размерами основания  $a$ ,  $b$  равна  $(a + 2R_a)(b + 2R_a)$ . Площадь стягивания воздушной линии длиной  $L$  равна  $2R_aL$ . Площадь стягивания сложного объекта получается объединением площадей стягивания его составляющих. В стандарте МЭК 62305 (далее МЭК) радиус стягивания принят  $R_a = 3h$  на основе наблюдений за сосредоточенными объектами разной высоты  $h$ . Рассмотренная методика определения площади стягивания помимо МЭК включена и в основные российские стандарты молниезащиты.

Проблема в том, что данные МЭК существенно различаются с данными РД 153-34.3-35.125–99 (далее РД-99), также полученными на основе наблюдений, и результатами расчетов по различным моделям ориентировки молнии, включая метод катящейся сферы (МКС), рекомендованный МЭК. Действительно,

по РД-99:

$$R_a = \begin{cases} 5h - 2h^2 / 30, & h \leq 30; \\ 0,75(h + 90), & h > 30, \end{cases} \quad (1)$$

что аппроксимируется зависимостью  $R_a = 20h^{0,426}$  при  $25 < h < 125$  м;

по [1]:

$$R_a = 2,57I^{0,615}h^{0,422}; \quad 1 \leq I \leq 31; \quad 10 \leq h \leq 50; \quad (2)$$

по [2]:

$$R_a = 2,27I^a h^{0,46}; \quad a = 0,5h^{0,05}; \quad 3 \leq I \leq 90; \quad 5 \leq h \leq 50; \quad (3)$$

по МКС:

$$R_a = h\sqrt{2D(I)/h - 1}; \quad D(I) = 10I^{0,65}; \quad D(I) \geq h, \quad (4)$$

где  $I$  – амплитуда тока главного разряда молнии (далее ток молнии, кА);  $h$  – высота молниеотвода;  $D(I)$  – дистанция поражения.

Радиус стягивания в (1)–(4) увеличивается не быстрее, чем  $h^{0,5}$ . Таким образом, значение  $R_a = 3h$ , принятое в стандартах молниезащиты, не кажется очевидным.

Площадь стягивания в МЭК и РД-99 соответствует среднему току молнии, поскольку получена на основе наблюдений. Тогда она будет заниженной в задачах электромагнитной совместимости, где расчетный ток молнии принимается в диапазоне от 100 до 200 кА (в зависимости от уровня защиты объекта). Необходимость учета тока молнии в широком диапазоне значений при определении площади стягивания не вызывает сомнения.

Площадь стягивания зависит от окружения объекта и рельефа местности. В стандарте МЭК эти факторы учитываются эмпирическим коэффициентом ( $C_d = 0,25-2,0$ ), который выбирается проектировщиком на основании рекомендаций качественного характера. Например, для объекта на вершине холма (без указания уклона)  $C_d = 2$ , т.е. площадь стягивания всегда увеличивается в 2 раза. Если объект окружен объектами равной или меньшей высоты (без указания размера), то  $C_d = 0,5$ , т.е. окружение всегда перехватывает у объекта половину молний. Но можно предположить, что окружение

<sup>1</sup> В порядке обсуждения. Ред.

объекта в состоянии и расширить площадь стягивания, подобно эффекту расширения зоны защиты многократных молниеотводов. Не ясно, как выбрать  $C_d$  в наиболее распространенном случае, когда объект окружен лишь частично (с одной или двух сторон). Полагаем, что коэффициенты  $C_d$  следует исключить из нормативных документов, поскольку окружение объекта, рельеф местности и другие факторы, влияющие на площадь стягивания, можно учесть в расчетных моделях при компьютерном моделировании.

В статье рассматривается решение перечисленных задач методом наведенного заряда (МНЗ). Этот метод, где первичным параметром является наведенный заряд наземных объектов, разработан в [3], доведен до численной реализации и апробирован для расчета зон защиты молниеотводов в [4].

**Механизмы ориентировки молнии.** Известно, что ориентировка молнии связана с возникновением встречного лидера, стартующего с объекта в электрическом поле развивающегося лидера молнии и перехватывающего его. На этом основании построено большинство расчетных моделей ориентировки, где при движении лидера молнии из множества пробных точек анализируются условия возникновения встречного лидера.

Существует и вторая причина притяжения (стягивания) лидера к объекту – электростатическое взаимодействие заряда лидера с наведенным зарядом объекта еще до возникновения встречного лидера. Но при количественном анализе выясняется, что наведенный заряд объекта не в состоянии заметно изменить модуль напряженности вблизи головки лидера, поэтому не влияет на ориентировку молнии [5]. На этом основании электростатическое взаимодействие не рассматривается даже для высотных объектов, радиус стягивания которых по действующим нормам молниезащиты составляет многие сотни метров.

Полагаем, что для исследований процессов стягивания следует рассматривать иную, чем в [5], постановку задачи, а именно, анализировать искажение электростатического поля заряженного облака наведенным зарядом объекта до достижения лидером зоны захвата. Под зоной захвата будем понимать поверхность, достигнув которую, лидер молнии поражает объект с молниеотводами. Критерии построения зоны захвата могут быть разными: из условия постоянства дистанции поражения – как в МКС; из условия постоянства наведенного заряда – как в МНЗ; или из условия возникновения встречного лидера – как в большинстве моделей ориентировки. Без учета процессов стягивания лидер молнии движется вертикально до зоны захвата, поэтому площадь стягивания равна площади про-

екции зоны захвата на горизонтальную плоскость и будет занижена, но насколько? Для качественного анализа процессов электростатического стягивания рассмотрим модельную задачу, имеющую аналитическое решение.

**Проводящий шар в однородном электростатическом поле.** Пусть заземленный объект полусферической формы радиусом  $R$  находится в однородном электростатическом поле (рис. 1). С учетом зеркального отображения имеем задачу о проводящем шаре с нулевым зарядом в однородном поле с напряженностью  $E_0$ , аналитическое решение которой известно, например [6] – шар искажает картину поля, стягивая силовые линии, а максимум напряженности на вершине шара равен  $3E_0$ . Методика построения силовых линий электростатического поля дана в [7].

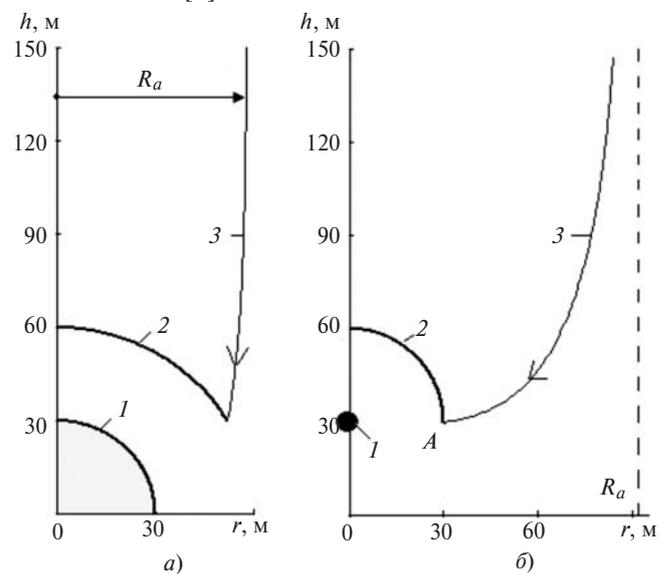


Рис. 1. Стягивание силовой линии электрического поля 3 к проводящему шару 1, проведенной через крайнюю точку А зоны захвата 2: а – шар не заряжен; б – шар заряжен;  $Q/E_0 = 5 \cdot 10^{-7}$

Пусть зона захвата построена по МКС, т.е. имеет сферическую форму радиусом  $R+D$ , где  $D$  – дистанция поражения (4). Построив силовую линию из крайней точки зоны захвата, видим (рис. 1,а), что незаряженная сфера очень незначительно искажает внешнее поле, а на высоте порядка  $3R$  искажение практически отсутствует. Таким образом, какой бы большой заряд не наводил лидер на полусфере независимо от радиуса сферы (высоты объекта), он компенсируется зеркальным зарядом, суммарный заряд равен нулю, поэтому полусфера мало искажает внешнее поле, почти не стягивая молнию до зоны захвата. Площадь стягивания получается немногим больше площади проекции зоны захвата на поверхность земли, т.е. близка к минимальной для данной дистанции поражения

(тока молнии). В первом приближении этой модели соответствует большинство объектов при  $h/D < 1$ , где  $D$  – дистанция поражения (4).

Во втором варианте шар малого радиуса с зарядом  $Q$  (точечный заряд) расположен на высоте  $h$  в однородном поле. В первом приближении подобная модель применима для молниеотвода, а двумерный вариант задачи соответствует тросу (проводу) воздушной линии. С увеличением  $h$  компенсирующее действие зеркального заряда ослабевает, поэтому заряд  $Q$  способен существенно исказить силовую линию, а степень искажения зависит от соотношения  $Q/E_0$  (рис. 1,б). Площадь стягивания, определяемая по максимальному горизонтальному отклонению силовой линии, проходящей через крайнюю точку зоны захвата (точка  $A$  – рис. 1,б), пропорциональна заряду  $Q$ . С увеличением  $h$  точка  $A$  смещается вниз относительно заряда, что приводит к дополнительному искажению силовой линии. Таким образом, с увеличением высоты объекта возрастает нескомпенсированный (зеркальным изображением) наведенный заряд, который искажает внешнее поле, стягивая силовые линии с большой площади. По рис. 1,б этот процесс имеет качественный характер, для количественного исследования необходимо задать модель лидера молнии.

**Модель лидера молнии.** Модель состоит из прямолинейного стержня со средней линейной плотностью заряда  $t$  и точечным зарядом головки  $q$  с величинами [3]:

$$t = \frac{q}{e} \left( 0,27 + 1,23 \frac{H}{3000\varnothing} \right) \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}; \quad q = 2tI \text{ Кл};$$

$$l = \frac{t}{2\rho\epsilon_0 E_{str}}; \quad H = I \cdot 10^3 / 8,7, \quad (5)$$

где  $I$  – ток молнии, кА;  $l$  – средняя длина стримеров, м;  $H$  – длина лидера (она же высота заряженного центра облака), м;  $E_{str} = 800 \cdot 10^3$  кВ/м – средняя напряженность отрицательного стримера.

Заряженное облако, которое моделируется сферой с зарядом  $q_0 = tH$ , создает вблизи земли однородное электрическое поле:

$$E_0 = \frac{2q_0}{4\rho\epsilon_0 H^2} = \frac{t}{2\rho\epsilon_0 H}.$$

Варьируя ток молнии в диапазоне 10–100 кА с учетом (5), получаем напряженность электрического поля заряженного облака вблизи земли в диапазоне 12–8 кВ/м, что согласуется с существующими данными.

**Расчет наведенного заряда.** Разобьем объект (включая молниеотводы) на стержневые элементы малой длины. Вектор наведенного заряда элементов объекта  $Q$  связан с зарядом лидера (зарядом го-

ловки  $q$  и линейным зарядом  $t$ ) матричным уравнением

$$AQ + Bq + Ct = 0,$$

где  $A$  – квадратная матрица потенциальных коэффициентов между элементами объекта;  $B$  – вектор-столбец потенциальных коэффициентов между зарядом головки и объектом;  $C$  – вектор-столбец потенциальных коэффициентов между линейным зарядом лидера и объектом; объект заземлен или его потенциал (рабочее напряжение) пренебрежимо мал по сравнению с потенциалом лидера.

Тогда вектор наведенного заряда

$$Q = -A^{-1}(Bq + Ct).$$

Наиболее трудоемкая операция в этой формуле – обращение матрицы  $A$  проводится один раз, что обеспечивает высокую производительность вычислений при многократных изменениях положения лидера молнии.

Потенциальные коэффициенты матрицы  $A$  и вектора  $B$  определены в [4]. Потенциальные коэффициенты между лидером и элементами объекта в векторе  $C$  определяются аналогично коэффициентам матрицы  $A$ .

Перейдем к решению задач.

**Задача 1.** Зависимость площади стягивания стержневого молниеотвода от его диаметра. Увеличение диаметра (поперечного размера) молниеотвода увеличивает его наведенный заряд, что приводит к увеличению радиуса и площади стягивания (рис. 2 и 3). Поперечный размер молниеотвода не самый значимый параметр – увеличение диаметра с 0,1 до 10 м (в 100 раз) приводит к увеличению

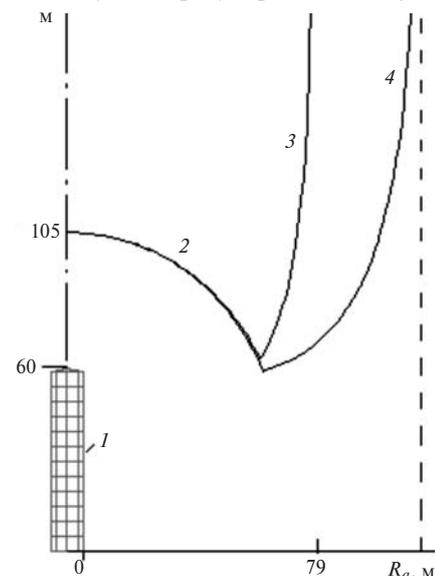
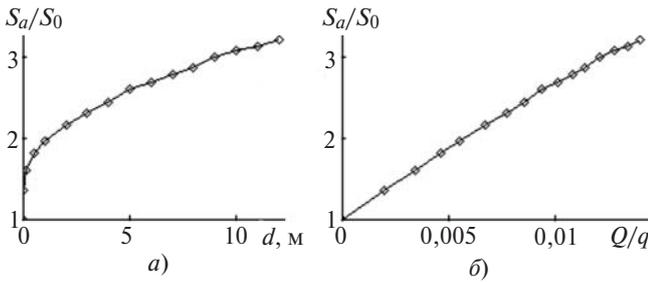


Рис. 2. К определению радиуса стягивания  $R_d$  молниеотвода  $l$  высотой  $h = 60$  м, диаметром  $d = 0,1$  м (3) и  $d = 10$  м (4) для тока молнии 10 кА с зоной захвата 2



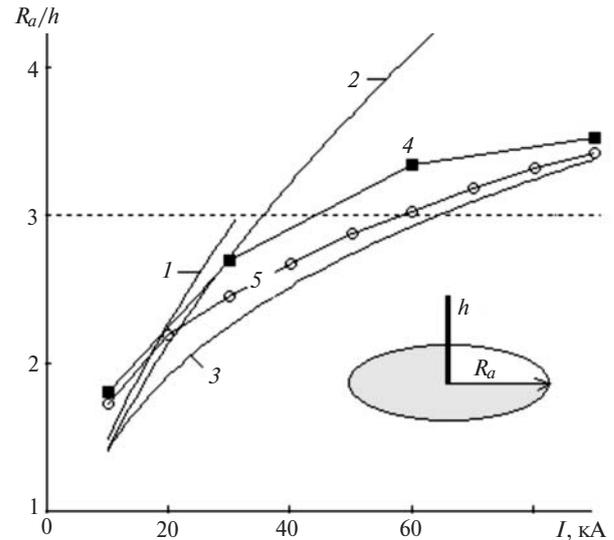
**Рис. 3.** Зависимость относительной площади стягивания стержня высотой  $h = 60$  м при токе молнии  $I = 10$  кА: *a* – от диаметра стержня  $d$ ; *б* – от относительного наведенного заряда  $Q/q$  ( $S_0$  – площадь стягивания при  $Q = 0$ )

площади стягивания только в 2 раза (рис. 3,а), однако с этим надо считаться. Площадь стягивания объектов равной высоты, но разной «металлоемкости» различна, что следует учитывать при обработке данных наблюдений.

Как и в модельной задаче, площадь стягивания линейно возрастает с увеличением  $Q/q$  (рис. 3,б), где  $q$  – заряд лидера. Минимальная площадь стягивания, равная площади проекции зоны захвата на горизонтальную плоскость, имеет место при  $Q = 0$ . Площадь стягивания пропорциональна числу поражений молнией, поэтому полученные результаты согласуются с данными [8], где аналогичная линейная зависимость между вероятностью поражения молниеотвода и его наведенным зарядом получена экспериментально.

**Задача 2.** Влияние тока молнии  $I$  на радиус стягивания  $R_a$  стержневого молниеотвода. Увеличение тока молнии (иначе заряда лидера) приводит к увеличению наведенного заряда объекта, что ведет к увеличению площади стягивания в МНЗ. При сравнении радиуса стягивания молниеотвода высотой 30 м при расчете разными методами видим (рис.4), что наименьшие значения дает МКС (4), наибольшие – формула (3) при  $I > 30$  кА. Данные МНЗ имеют удовлетворительное совпадение с данными [9] и МКС. С увеличением тока молнии относительная высота молниеотвода  $h/D$ , где  $D$  – дистанция поражения (4) уменьшается, поэтому процессы стягивания, как было показано в модельной задаче, ослабевают. В результате данные МНЗ приближаются к данным МКС. По МНЗ при изменении тока с 10 до 90 кА (в 9 раз) радиус стягивания возрастает в 2 раза, площадь стягивания – в 4 раза.

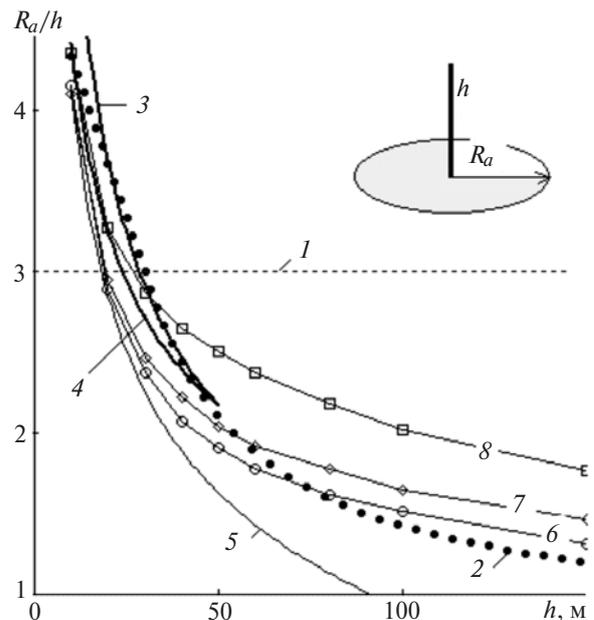
Таким образом, ток молнии – значимый параметр для расчета площади стягивания. Значение  $R_a = h/3$ , принятое в действующих нормативных документах молниезащиты, может быть заниженным при сильных токах молнии (100–200 кА), используемых в задачах ЭМС.



**Рис. 4.** Относительный радиус стягивания стержня высотой  $h = 30$  м в функции тока молнии по данным: 1 – (2); 2 – (3); 3 – МКС (4); 4 – [9]; 5 – МНЗ при диаметре стержня 0,2 м

**Задача 3.** Влияние высоты стержневого молниеотвода  $h$  на радиус стягивания  $R_a$ . Как отмечалось, данные МЭК, где  $R_a = 3h$  существенно отличаются от данных РД-99 (1), также полученных наблюдениями, и расчетных выражений (2)–(4), согласно которым радиус стягивания увеличивается не быстрее, чем  $h^{0,5}$  (рис. 5).

Расчеты по МНЗ также отличаются от данных МЭК (рис. 5), но они позволяют выявить вероятные причины расхождений. Данные МЭК получены наблюдениями за сосредоточенными объектами разной высоты, с увеличением которой увеличиваются сечение объекта и средний ток молнии. Силь-



**Рис. 5.** Относительный радиус стягивания стержня при токе молнии 30 кА: 1 – по данным МЭК; 2 – РД-99 (1); 3 – (2); 4 – (3); 5 – МКС (4); 6 – МНЗ при диаметре стержня  $d = 0,1$  м; 7 – МНЗ при  $d = 1$  м; 8 – МНЗ при  $d = 10$  м

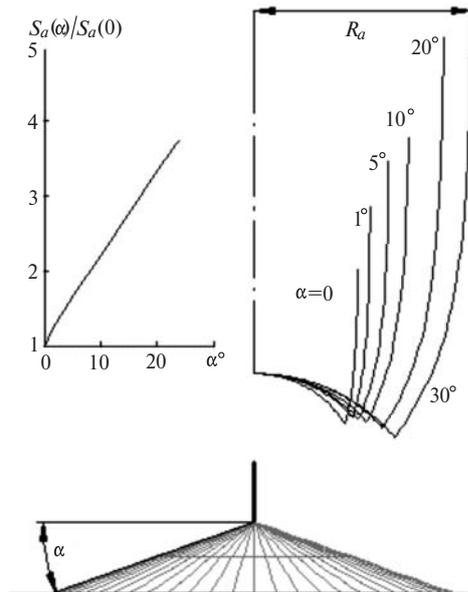


Рис. 6. Радиус и площадь стягивания молниеотвода высотой 30 м, диаметром 0,2 м на вершине холма с уклоном  $\alpha$  при токе молнии 10 кА

ные молнии стягиваются с большей площади (Задача 2), и их доля возрастает, что согласуется с РД-99, где средний ток молнии увеличивается с увеличением высоты опор. Тогда расчеты, которые проводятся при неизменных диаметре стержня и значении тока молнии, приводят к заниженным значениям для высоких объектов. Если с увеличением высоты объекта увеличивать поперечные размеры и ток молнии, то результаты расчета становятся ближе к данным МЭК, хотя по-прежнему отличаются в меньшую сторону.

**Задача 4. Молниеотвод на вершине холма.** Поверхность холма искажает силовые линии электрического поля, стягивая их с большей площади по сравнению с ровной (горизонтальной) поверхностью земли (рис. 6). Зона захвата молниеотвода, расположенного на холме, больше, чем у молниеотвода на ровной поверхности, что также увеличивает площадь стягивания. С увеличением уклона холма площадь стягивания возрастает практически линейно (рис. 6), в то время как по МЭК (независимо от уклона) площадь стягивания в 2 раза больше площади стягивания молниеотвода на ровной поверхности. Для варианта (рис. 6) двукратное увеличение площади стягивания имеет место при уклоне  $8^\circ$ .

**Заключение.** Притяжение (стягивание) лидера молнии, обусловленное электростатическим взаимодействием его заряда с наведенным зарядом объекта, – первый этап ориентировки молнии. Второй этап наступает в момент достижения лидером зоны захвата, когда возникает встречный лидер, замыкающий молнию на наземный объект. Проекция зоны захвата на поверхность земли дает нижнюю оценку площади стягивания.

Процесс стягивания анализируется по искажению наведенным зарядом объекта  $Q$  силовой линии однородного электростатического поля заряженного облака (с напряженностью  $E_0$ ), проходящей через крайнюю точку зоны захвата.

Площадь стягивания пропорциональна  $Q/E_0$ , но следует помнить, что действие наведенного заряда объекта  $Q$  частично компенсируется влиянием зеркального заряда. По этой причине объекты малой высоты (по сравнению с дистанцией поражения) практически не стягивают молнию под действием наведенного заряда, а площадь стягивания немногим более площади проекции зоны захвата на поверхность земли. Объекты сферической, цилиндрической, тороидальной формы исключают локальное усиление наведенного заряда на вершине объекта, что усиливает компенсацию наведенного заряда его зеркальным изображением. Чем меньше объект искажает внешнее поле, тем меньше площадь стягивания.

Наведенный заряд стержневого объекта концентрируется у вершины и все меньше компенсируется зеркальным зарядом с увеличением высоты объекта, поэтому может существенно исказить силовые линии внешнего поля, в котором развивается лидер молнии. Высота объекта и ток молнии (иначе заряд лидера) – два основных фактора, определяющих наведенный заряд и площадь стягивания. В меньшей мере на значение наведенного заряда влияют размеры поперечного сечения.

Рельеф местности искажает силовые линии внешнего поля даже в отсутствие объекта. Площадь стягивания молниеотвода на вершине холма увеличивается пропорционально уклону холма. Окружение объекта также существенно влияет на площадь стягивания. Учитывать эти и другие факторы с помощью эмпирических поправочных коэффициентов, как сделано в стандарте МЭК, вряд ли целесообразно при наличии современных компьютерных программ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rizk, Farouk A.M. Modeling of Substation Shielding Against Direct Lightning Strikes. – IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility, 2010, vol. 52, No. 3, 664 p.
2. Cooray V. and Becerra M. Attractive radius and the volume of protection of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model – SLIM. – Proc. of 30th Int. Conf. on Lightning Protection. Italy (Cagliari), 2010, 1062 p.
3. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 280 с.
4. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е., Шишигин Д.С. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда. – Электричество, 2015, № 8, с. 4–9.
5. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978, 222 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высшая школа, 1986, 263 с.

7. Шишигин С.Л. Построение двумерной картины электростатического поля. — *Электричество*, 2004, № 3, с. 53–58.

8. Александров Г.Н., Кадзов Г.Д. О повышении эффективности молниезащиты. — *Электричество*, 1987, № 2, с. 57–60.

9. Гайворонский А.С., Голдобин В.Д. Возможности компьютерного моделирования грозопоражаемости ВЛ на основе модели ориентировки лидера молнии: [http://lightningprotection.ru/?page\\_id=424](http://lightningprotection.ru/?page_id=424)

[19.10.15]

*Авторы:* Шишигин Сергей Леонидович окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1982 г. В 2010 г. в С.Петербургском государственном политехническом университете защитил докторскую диссертацию «Разработка методов анализа и синтеза электромагнитных полей электротехнических устройств с сильными токами». Заведующий кафедрой электротехники Вологодского государственного университета (ВГУ).

Мещеряков Виталий Евгеньевич окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного технического университета (ВГТУ) в 2012 г. Аспирант кафедры электротехники ВГУ.

Шишигин Дмитрий Сергеевич окончил электроэнергетический факультет ВГТУ в 2013 г. Аспирант кафедры автоматики и вычислительной техники ВГУ.

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2016, No. 6, pp. 10–15.

### От редакции

Авторами статьи выдвигается тезис «притяжения» заряда лидера молнии к наведенному заряду заземленного объекта. При этом предполагается, что усредненный лидер молнии продвигается по силовым линиям электростатического поля. Представляется, что тезис «притяжения» и выдвинутое предположение далеко не очевидны. Не очевидны потому, что такой упрощенный подход может привести к серьезным ошибкам при расчете, причиной которых является игнорирование реальных разрядных процессов в атмосферном воздухе. В реальности созданный развивающимся нисходящим лидером и его стримерами объемный заряд приводит к заметному искажению силовых линий начального электростатического поля. В результате траектория лидерного канала может существенно отклоняться от силовых линий электростатического поля. Сказанное подтверждается известными экспериментальными данными по исследованию разряда в сверхдлинных промежутках, в которых траектории разряда далеко отклоняются от силовых линий электростатического поля (в определенных условиях большая часть траектории может располагаться параллельно поверхности земли), а их длина в 2,5 и более раз превышает длину периферийной силовой линии.

## The Induced Charge Method for Attractive Area Calculation

SHISHIGIN Sergei Leonidovich (Vologda State University (VSU), Vologda, Russia) – Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

MESHCHERYAKOV Vitalii Yevgen'yeovich (VSU, Vologda, Russia) – Ph. D. Student

SHISHIGIN Dmitrii Sergeevich (VSU, Vologda, Russia) – Ph. D. Student

Lightning attractive area is formed by two processes – the electrostatic attraction of a leader charge to induced charges on ground objects and the propagation of upward connecting leader. In this paper the first process is considered. On the hypothesis that the average lightning leader is propagating along electric force lines the research methodology lies in the analysis of the distortion of the force line of the charged cloud electrostatic field that runs through the end point of the capture zone. The leader charge and the capture zone design are determined by the G.N. Alexandrov's way. It is shown that the induced charge of low objects is compensated by its image charge and the electrostatic attraction is insignificant. The influence of height and diameter of rod objects, lightning current and terrain on the attractive area is examined. The data of actual lightning protection standards and other researcher's works are presented for the comparison.

Key words: lightning leader, attraction, attractive area, attractive radius, induced charge method

### REFERENCES

1. Rizk, Farouk A.M. Modeling of Substation Shielding Against Direct Lightning Strikes. —IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility, 2010, vol. 52, No. 3, p. 664.

2. Cooray V. and Becerra M. Attractive radius and the volume of protection of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model – SLIM. — Proc. of 30th Int. Conf. on Lightning Protection. Italy (Cagliari), 2010, p. 1062.

3. Aleksandrov G.N. *Molniya i molniyezashchita* (Lightning and Lightning Protection). St. Petersburg, Publ. Polytechnic University, 2007, 280 с.

4. Shishigin S.L., Meshcheryakov V.Ye., Shishigin D.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 8, pp. 4–9.

5. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. *Fizicheskiye i inzhenernye osnovy molniyezashchity* (Physical and Engineering Foundations of Lightning Protection). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978, 222 p.

6. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoye pole* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic Field). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1986, 263 p.

7. Shishigin S.L. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2004, No. 3, pp. 53–58.

8. Aleksandrov G.N., Kadzov G.D. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1987, No. 2, pp. 57–60.

9. Gaivoronskii A.S., Goldobin V.D.: [http://lightningprotection.ru/?page\\_id=424](http://lightningprotection.ru/?page_id=424)

