

Анализ методик расчета и выбора параметров зоны защиты стержневых молниеотводов

КУПРИЕНКО В.М.

Изложены результаты анализа расчета зоны защиты и выбора параметров стержневых молниеотводов по требованиям различных нормативных документов, а именно РД 34.21.122–87; СО 153-343.21.122–2003; МЭК 62305–2003; ВСП 22-02-07/МО РФ, обосновывающие необходимость разработки уточненной методики расчета и выбора параметров молниезащитных устройств, например с использованием угла защиты α .

Ключевые слова: молния, молниезащита, стержневые молниеотводы, зона защиты, угол защиты

Возросшие требования к защите объектов различного назначения от прямого удара молнии (ПУМ) и ее вторичных проявлений привели к необходимости критической оценки действующих отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих проектирование молниезащиты с заданным уровнем надежности [1–4]. При всем различии глубины проработки нормативных документов их основу составляет методика расчета и выбора параметров стержневых и тросовых молниеотводов, обеспечивающих требуемую надежность молниезащиты. Базовым элементом различных методик является зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h , которая представляет собой круговой конус (рис. 1), радиус которого на высоте защищаемого объекта определяет надежность молниезащиты.

В статье сравниваются параметры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода при расчете по различным методикам, приведенным в отечественных и зарубежных документах, с целью обеспечения единства требований при проектировании молниезащитных устройств с заданным уровнем надежности молниезащиты.

В инструкции [1], являющейся основным нормативным документом по молниезащите в РФ, параметры кругового конуса определяются по эмпирическим формулам для зоны А и зоны Б, отличающихся степенью надежности молниезащиты (зоне А соответствует степень надежности $P_H = 0,99$, зоне Б – 0,9).

По методике МЭК [2] параметры кругового конуса одиночного стержневого молниеотвода опре-

The results from an analysis of procedures for calculating the protected zone and selecting the parameters of rod-type lightning conductors carried out according to the requirements of different regulatory documents, namely, RD 34.21.122–87, SO 153-343.21.122–2003, IEC 62305–2003, and VSP 22-02-07/МО RF, are presented. The obtained results substantiate the need to develop a refined procedure for calculating and selecting the parameters of lightning protection devices, e.g., using the protection angle α .

Key words: lightning, lightning protection, rod-type lightning conductors, protected zone, protection angle

деляются методом катящейся сферы или по соответствующему радиусу сферы углу защиты α , который изменяется от 23° до 80° в зависимости от принимаемого уровня защиты. Для каждого из четырех установленных в МЭК уровней защиты задан набор минимальных и максимальных параметров тока молнии, характеризующих уровень защиты. Эффективность перехвата молнии (надежность молниезащиты P_H) определяется минимальным током молнии I_{\min} , значение которого соответствует заданному уровню защиты. Вероятность превышения минимального тока молнии для уровня I составляет $P = 0,99$, II – 0,97, III – 0,91, IV – 0,84. Каждый уровень защиты характеризуется также не превышением максимального тока молнии I_{\max} , значение которого определяет степень опасности воздействия на объект тока молнии или его вторичных проявлений.

В инструкции [3], разработанной в развитие [1], параметры кругового конуса определяются также по эмпирическим формулам для трех значений надежности молниезащиты P_H : 0,999, 0,99 и 0,9. Дополнительно в инструкции, по аналогии с МЭК, введены четыре уровня защиты. Надежность защиты от ПУМ для уровня I составила $P_H = 0,98$, II – 0,95, III – 0,90, IV – 0,80. Таким образом, в [1] надежность молниезащиты характеризуется двумя различными вероятностными показателями, взаимосвязь между которыми не определена.

В нормах по молниезащите [4] зона защиты кругового конуса одиночного стержневого молниеотвода характеризуется так же, как и в МЭК углом защиты α .

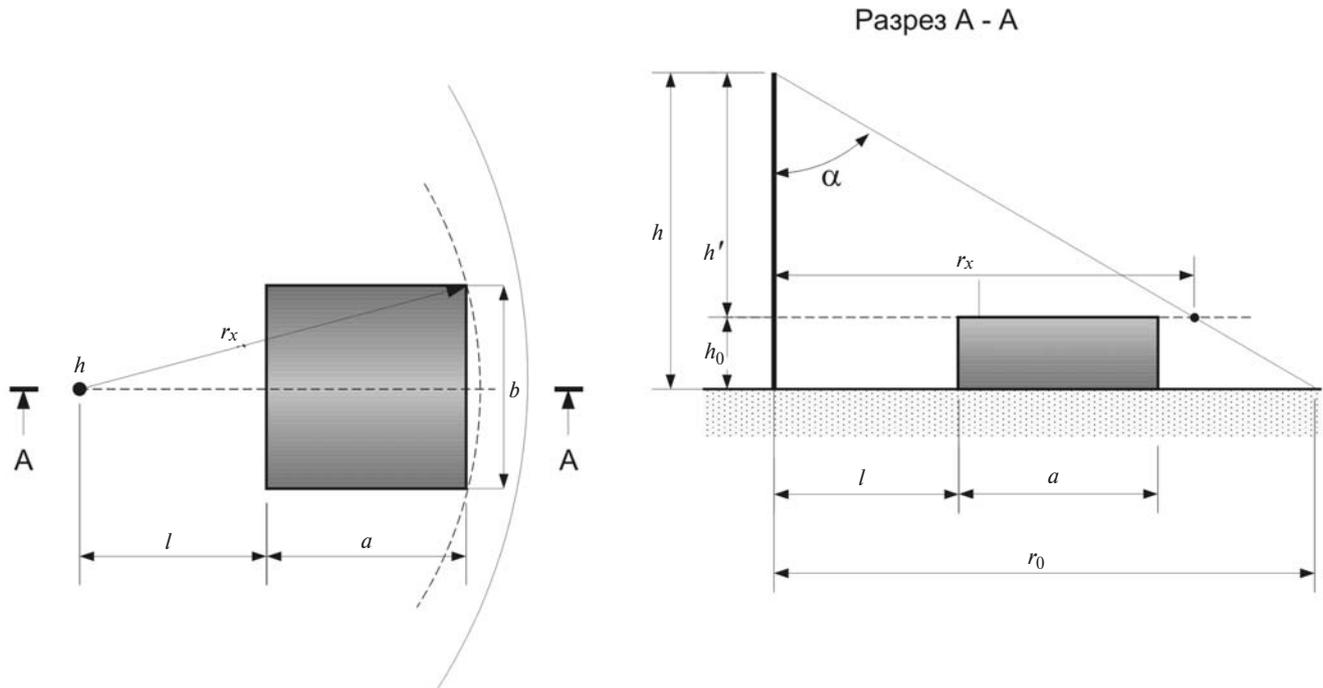


Рис. 1. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода: h – высота стержневого молниеотвода; h_0 (h_x) – высота объекта защиты; h_0 – высота молниеотвода над защищаемой поверхностью; r_0 – радиус зоны защиты на уровне земли; r_x – радиус зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода на высоте защищаемого объекта; a – угол защиты; l – расстояние от объекта до молниеотвода

Значения угла защиты a , приведенные в [4], получены в результате обработки большого числа экспериментальных данных, устанавливающих зависимость надежности зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода P_H от значения угла защиты a [5]. Угол защиты a определен для трех значений надежности молниезащиты: по категории I надежность молниезащиты $P_H = 0,99$, по II – $0,95$, по III – $0,9$.

Принимая во внимание различие в подходе к определению одинакового понятия, характеризующего зону защиты одиночного стержневого молниеотвода в упомянутых нормативных документах, целесообразно выполнить сравнительную расчетную оценку параметров зоны защиты для объектов простейшей формы. Представленные далее расчеты проведены для объекта в виде стержня высотой $h_0 = 20$ м и здания в форме квадрата размером 10×10 и высотой $h_0 = 20$ м, защита которых должна быть обеспечена одиночным отдельно стоящим стержневым молниеотводом.

На первом этапе по методике [4] была определена высота h одиночного отдельно стоящего стержневого молниеотвода, круговой конус которого обеспечивает молниезащиту приведенных условных объектов для двух заданных значений надежности молниезащиты $0,9$ и $0,99$.

Для объекта в виде стержня при $a = 35^\circ$ ($P_H = 0,9$) и $a = 25^\circ$ ($P_H = 0,99$) определялась эффек-

тивная высота молниеотвода $h_0 = r_x / \text{tga}$, а затем и высота молниеотвода $h = h_0 + h_0$ (см. рис.1).

Для объекта в форме квадрата при $a = 46^\circ$ ($P_H = 0,9$) и $a = 30^\circ$ ($P_H = 0,99$) аналогичным образом определялись $h_0 = r_x / \text{tga}$, где $r_x = \sqrt{(a+l)^2 + (b/2)^2}$ и высота молниеотвода h .

По остальным методикам для полученного значения высоты h стержневого молниеотвода и заданного расстояния l от объекта до молниеотвода по эмпирическим формулам рассчитывалась ширина зоны защиты r_x на высоте h_0 объекта.

Для сравнения результатов расчета, полученных по различным методикам, использовались значение угла защиты a , который определялся по формуле $\text{tga} = h_0 / r_x$, и приведенная высота объекта h_x , который может быть размещен в зоне защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h при одинаковом расстоянии r_x от молниеотвода до наиболее удаленной точки на приведенной высоте объекта h_x . Результаты расчета угла защиты a и приведенной высоты объекта h_x даны в табл. 1.

Анализ результатов расчета табл. 1 показал, что наименьшие размеры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода, определяемые значением угла защиты a , получены по методике [3] и практически совпадают с данными, полученными по методике [4]. Значительно шире зона защиты получена при расчете по методикам, приведенным в [1, 2].

Таблица 1

Значение степени надежности P_H	Молниеотвод		Результаты расчета угла защиты и приведенной высоты объекта (м) по разным нормативным документам							
	h , м	r , м	[4]		[3]		[1]		[2]	
			a , °	h_{x1}	a , °	h_{x2}	a , °	h_{x3}	a , °	h_{x4}
Объект в виде стержня высотой $h_0 = 20$ м										
0,90	27,0	5	35,5	20	33,7	19,5	49,8	21,8	66	24,8
0,99	30,7	5	25,0	20	24,2	19,6	30,2	22,1	45	25,7
Объект – здание размером $10' 10' 20$ м										
0,90	35,3	15,8	46	20	44,3	18,8	52,0	22,8	55	24,2
0,99	47,3	15,8	30	20	31,2	22	37,5	26,7	30	20,0

Следует отметить, что при надежности молние-защиты, равной $P_H = 0,99$, размеры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода для объекта прямоугольной формы ($10' 10' 20$ м) практически совпадают при расчете по трем методикам [2–4]. Это свидетельствует о достаточно корректном определении зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода с надежностью защиты от ПУМ, равной 0,99 для объекта прямоугольной формы по различным методикам.

При переходе от зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода к зоне защиты двойного стержневого молниеотвода (рис. 2) и далее к зоне защиты многократных стержневых молниеотводов вводится понятие об увеличении зоны защиты, размеры которой определяются взаимным влиянием друг на друга двух и более стержневых (тросовых) молниеотводов. Совпадение радиуса зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода r_x , рассчитанного по разным методикам, предполагает одинаковую степень взаимного влияния и, как следствие, одинаковое расширение зоны защиты двойного стержневого молниеотвода r_{cx} . В методиках [1 и 2] ширина зоны защиты r_{cx} двойного стержневого молниеотвода определяется по эмпирическим формулам при заданных размерах объекта $a' b' h_0$, высоте молниеотводов h и значении надежности молниезащиты P_H , а зона защиты многократных стержневых молниеотводов определяется наложением зон защиты двойных стержневых молниеотводов.

В стандарте [2] зона защиты двух и более стержневых молниеотводов определяется методом «обкатывания» объекта сферой определенного радиуса, соответствующего заданному уровню защиты (так называемый электрогеометрический метод).

В [4] расширение зоны защиты двух и более стержневых молниеотводов определяется по экспериментально полученному углу защиты a , значение которого зависит от уровня надежности молниеза-

щиты P_H , размеров объекта, высоты молниеотводов и расстояния L между ними [5, 6].

Из-за различного подхода к определению зоны защиты двойного стержневого молниеотвода в приведенных нормативных документах представляет интерес выполнить сравнительный расчет ширины r_{cx} зоны защиты для условного объекта простейшей формы. Расчет проведен для двух объектов размерами $10' 10' 10$ м и $20' 50' 10$ м, защита которых с надежностью $P_H = 0,9$ и $P_H = 0,99$ должна быть обеспечена двумя стержневыми молниеотводами одинаковой высоты h .

Для сравнения различных методик использовались ширина зоны защиты r_{cx} , значение угла защиты a и приведенная высота объекта h_x , который может быть размещен в зоне защиты двух стержневых молниеотводов высотой h при одинаковых размерах $a' b$ объекта и расстоянии от молниеотводов до периметра объекта l .

Высота каждого из двух молниеотводов рассчитывалась по методике, приведенной в [4] для надежности молниезащиты $P_H = 0,9$ ($a = 56^\circ$ и $a = 58^\circ$ соответственно) и $P_H = 0,99$ ($a = 45^\circ$ и $a = 48^\circ$ соответственно): $h = h_0 + r_x / \text{tga}$, где $r_x = \sqrt{(a/2 + l)^2 + (b/2)^2}$.

По методикам [1 и 3], при заданных размерах объекта $a' b' h_0$, одинаковой высоте молниеотводов h и расстоянии между молниеотводами L по эмпирическим формулам рассчитывалась ширина r_{cx} зоны защиты на высоте объекта h_0 . Затем для сравнения результатов расчета по различным методикам определялся угол защиты a : $\text{tga} = r_x / h \phi$ где $r_x = \sqrt{r_{cx}^2 + (a/2 + l)^2}$.

По [2] при заданной высоте молниеотводов h методом «обкатывания» определялась высота здания h_{x4} , которое может быть размещено в зоне защиты двух стержневых молниеотводов. Для здания

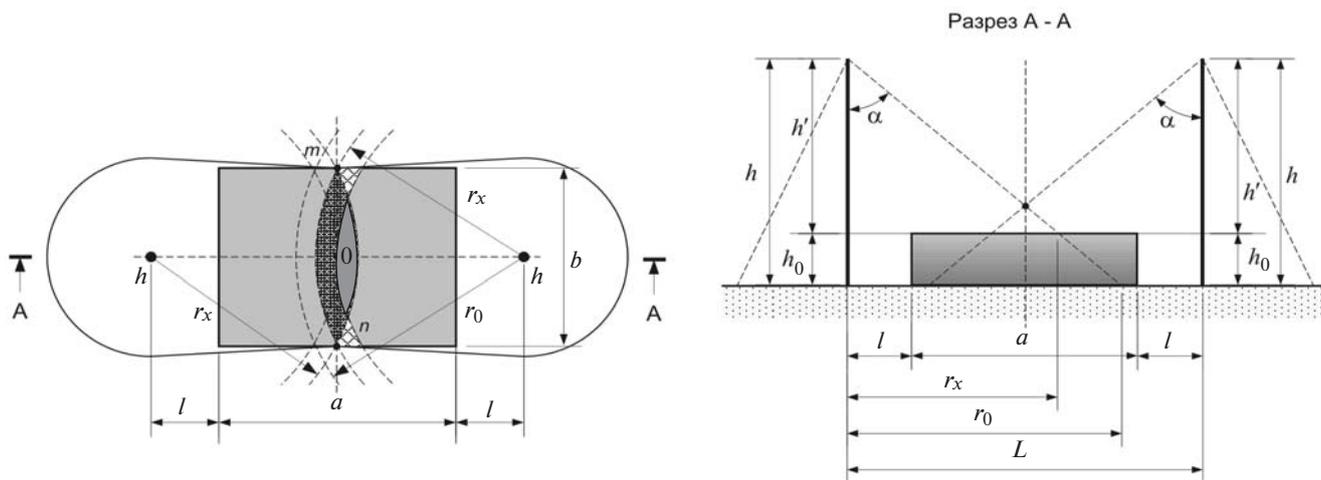


Рис. 2. Зона защиты двух стержневых молниеотводов: r_{cx} – ширина зоны защиты между точками om (on); h_0 (h_x) – высота объекта защиты; L – расстояние между двумя стержневыми молниеотводами; r_x – радиус зоны защиты двух стержневых молниеотводов высотой h с учетом их взаимного влияния; $h\phi$ – высота молниеотвода над защищаемой поверхностью; a – угол защиты; l – расстояние от объекта до молниеотвода

высотой h_{x4} определялся угол защиты a по схеме, приведенной на рис. 2.

Ширина зоны защиты r_{cx} , приведенная высота h_x здания, которое может быть размещено в зоне защиты двух стержневых молниеотводов, рассчитанных по различным методикам, а также получаемый при приведенной высоте здания h_x угол защиты a приведены в табл. 2.

Анализ результатов расчета показал, что значения ширины r_{cx} зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, определенные по разным методикам, существенно различаются, что физически не может быть.

При учете взаимного влияния молниеотводов наименьшие размеры имеет зона защиты двойного стержневого молниеотвода, определенная по методике [4] (см. табл. 2).

При расчете по методикам [1, 3] ширина зоны защиты r_{cx} для одинаковой высоты объекта $h_0 = 10$ м

существенно увеличивается по сравнению с шириной зоны защиты, определенной по методике [1]. Приведенная высота h_x объекта, который может быть размещен в зоне защиты двойного стержневого молниеотвода, определенная по методикам [1–3], значительно больше, чем базовая высота h_0 защищаемого объекта (см. табл. 2). Причем изменение приведенной высоты объекта h_x при ее определении по методикам [1–3] при различных значениях надежности P_H не имеет выраженной закономерности. Например, как следует из данных табл. 2, высота h_{x1} [3] больше, чем h_{x2} [1] для объекта $10' 10' 10$ м, а для объекта $20' 50' 10$ м – наоборот.

Зона защиты двойного стержневого молниеотвода для объекта высотой $h_0 = 10$ м, рассчитанная по методике [2], намного шире, чем по другим методикам, о чем свидетельствует значение угла защиты a , приведенное в табл. 2.

Таблица 2

Значение степени надежности P_H	Молниеотвод		Результаты расчета ширины зоны защиты (м), приведенной высоты здания (м) и соответствующего ей угла защиты по разным нормативным документам											
	h , м	r_x , м	[4]			[3]			[1]			[2]		
			r_{cx}	a , °	h_0	r_{cx}	a , °	h_{x1}	r_{cx}	a , °	h_{x2}	R^*	a , °	h_{x3}
Объект – здание $10' 10' 10$ м, $L=10$ м														
0,90	17,6	11,2	5	56	10	14,2	66,4	12,3	9,8	61,5	11,2	45	84	16,5
0,99	21,2	11,2	5	45	10	10,3	54,6	13,2	10	51,2	12,2	20	76	18,5
Объект – здание $20' 50' 10$ м, $L=60$ м														
0,90	30,0	31,6	10	58**	10	18,6	60,8	12,3	25,3	63,3	14,1	45	71	18,6
0,99	38,5	31,6	10	48**	10	22,4	53	14,4	25,7	54,7	16	Защиты нет		

* R – радиус сферы «обкатывания» по МЭК.

** Значение угла получено с учетом геометрической формы объекта [6].

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что ширина зоны защиты $r_{сх}$ объекта высотой $h_0 = 10$ м, защищенного двумя стержневыми молниеотводами одинаковой высоты h , определенная по разным методикам, отличается более чем в 2 раза.

Например, для здания размерами $20 \times 50 \times 10$ м при расстоянии между двумя стержневыми молниеотводами 60 м и приведенной высоте объекта h_x результаты расчета угла защиты по методикам [1, 3, 4] различаются на 10–15%. При расчете по методике [2] ($P_H = 0,99$, уровень защиты I, $R = 20$ м) защита от ПУМ вообще отсутствует, что является наиболее характерным примером противоречия между российскими методиками и методикой МЭК.

Результаты расчета, приведенные в табл. 2, показали явное увеличение ширины зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, определенной по методикам [1–3], по сравнению с расчетом по методике, основанной на результатах экспериментальных исследований. Так как в основу расчета зоны защиты многократных молниеотводов (четырёхстержневых, шести- и т.д.) положена зона защиты двойного стержневого молниеотвода, то и ее размеры будут существенно завышены по сравнению с их реальными размерами при перехвате разряда с минимальным током молнии.

Выводы. 1. Расчет параметров зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, выполненный по различным методикам, показал существенное различие полученных результатов по ширине зоны защиты.

1. Методики расчета, предложенные в [1 и 3], неудобны для практического использования, так как определяют не параметры молниеотводов, а ширину зоны защиты, в которой может быть размещен объект путем перебора высоты и расстановки молниеотводов. Ширина зоны защиты двойных стержневых молниеотводов (следовательно, и многократных молниеотводов), определяемая по данным методикам, представляется необоснованно завышенной.

2. Методика расчета, предложенная в стандарте МЭК, основанная на так называемой «электрогеометрической модели», удобна в практическом использовании, но лишена физического смысла, вследствие чего, например, меньшей высоте молниеотвода, возвышающегося над объектом, соответствует больший угол защиты, а следовательно, и большая по ширине зона защиты.

3. Расчеты, выполненные по методике МЭК, показали во всех случаях существенное превышение зоны защиты одиночного и двойного стержне-

вых молниеотводов по сравнению с их расчетом по другим методикам. В то же время защита объекта двумя стержневыми молниеотводами по методике МЭК при расстоянии между ними, превышающем радиус сферы «обкатывания» R , отсутствует, что не подтверждается результатами расчета по другим методикам и имеющимися экспериментальными данными.

4. Методика расчета, предложенная в [4], позволяет непосредственно определять параметры молниезащитной системы с учетом требуемой надежности, геометрических размеров объекта и взаимного влияния многократных стержневых молниеотводов, расширяющего зону защиты одиночного стержневого молниеотвода. При определении высоты молниеотводов ширина зоны защиты жестко связана с размерами объекта и расстоянием от молниеотводов до наиболее удаленной точки на высоте объекта.

5. Результаты исследований показали необходимость разработки единого подхода к расчету и выбору параметров молниеотводов. Представляется, что для этого целесообразно использовать угол защиты α , определенный не по «электрогеометрической модели», а по результатам экспериментальных исследований с учетом взаимного влияния двойных и многократных стержневых молниеотводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Стандарт по молниезащите МЭК 62305, 2003, ч.1–5.
3. СО 153-343.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: МЭИ, 2004.
4. ВСП 22-02-07/МО РФ. Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры, М., 2007.
5. Куприенко В.М. К вопросу о нормировании молниезащиты объектов военной инфраструктуры. – Сб. докл. Второй российской конф. по молниезащите, М., 2010.
6. Куприенко В.М., Григорьев А.А., Деметриадес Г.И., Калзов Г.Д. Результаты крупномасштабных исследований поражаемости зданий и сооружений при их защите многократными стержневыми и тросовыми молниеотводами. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите, М., 2010.

[21.02.12]

Автор: Куприенко Василий Михайлович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина в 1972 г. по специальности «Инженерная электрофизика». В 2009 г. защитил докторскую диссертацию в ОАО «26ЦНИИ». Начальник отдела филиала ОАО «26ЦНИИ».