

## Защита зданий и сооружений разновысокими стержневыми молниеотводами

КУПРИЕНКО В.М.

*Защита зданий и сооружений разновысокими стержневыми молниеотводами с заданным уровнем надежности  $P_H$  до настоящего времени не имеет достаточного научного обоснования. В статье приведены результаты исследований по определению предельного расстояния  $L_{max}$  между разновысокими стержневыми молниеотводами при защите объекта произвольной формы. Для анализа вероятности поражения объекта при его защите разновысокими стержневыми молниеотводами использован угол защиты  $\alpha$ , который определяется отношением радиуса защиты  $r_x$  к высоте активной части молниеотводов  $h_a$ , возвышающейся над объектом высотой  $h_o$ . Определена зависимость вероятности поражения объекта, защищенного разновысокими стержневыми молниеотводами, при испытаниях в длинном искровом промежутке на коммутационном импульсе напряжения 250/2500 мкс.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** молниезащита, стержневые молниеотводы, зона защиты, вероятность поражения объекта, надежность

Надёжность защиты объектов  $P_H$  от прямого удара молнии (ПУМ) как одиночным, так и многократными стержневыми молниеотводами (МО) зависит от отношения высоты активной части  $h_a$  МО, возвышающейся над объектом, к расстоянию  $r_x$  до наиболее удаленной точки на высоте защищаемого объекта  $h_o$  [1–3]. Из этого следует, что определение размеров зоны защиты стержневых МО одинаковой высоты, так же как и МО разной высоты, целесообразно только для зданий и сооружений, имеющих конкретные геометрические размеры  $a \times b \times h_o$  (длину, ширину, высоту).

Наклон образующей конуса от вершины МО до наиболее удаленной точки на высоте объекта  $h_o$  с радиусом защиты  $r_x$  определяет уровень защиты объекта, который характеризуется углом  $\alpha$ :  $\operatorname{tg} \alpha = r_x / h_a$  ( $\alpha$  – угол защиты, используемый в том числе и в стандарте МЭК 62305 [3] для определения надежности защиты активной части стержневого молниеотвода).

Встраивание объекта в зону защиты стержневых МО, построенную относительно поверхности земли, как это принято в действующих нормативных документах РФ [4, 5], приводит к необоснованному завышению области защиты, определяемую на высоте защищаемого объекта. Это обусловлено тем, что в нормативных документах предельное расстояние  $L_{max}$ , на котором сохраняется взаимное влияние между двумя стержневыми МО одинаковой высоты, определяется в зависимости от их полной высоты  $h_m$ , а не от высоты активной части  $h_a$ , которая собственно и определяет требуемый уровень защиты  $P_H$ .

Это положение сохраняется и применительно к МО разной высоты (разновысоким МО), которые достаточно часто применяются в практике молниезащиты различных объектов. Методы определения области защиты активной части разновысоких стержневых МО на высоте защищаемого объекта либо отсутствуют [5], либо не имеют достаточно убедительного обоснования [1, 4].

Экспериментальное обоснование размеров области защиты активной части  $h_a$  стержневых МО, имеющих одинаковую высоту  $h_m$  применительно к объектам высотой  $h_o$ , и обеспечиваемый при этом уровень надежности приведены в [6–8].

В статье анализируются методики расчета зоны защиты разновысоких стержневых МО на высоте защищаемого объекта, приведенные в различных нормативных документах, и приводится их сравнение с результатами крупномасштабных испытаний в длинных искровых промежутках.

**Анализ методик расчета зоны защиты разновысоких стержневых МО на высоте защищаемого объекта.** Впервые обоснование области защиты разновысоких стержневых МО выполнено А.А. Акоюном более 70 лет назад и приведено в первом российском нормативном документе по МЗ [1]. Суть методики заключается в том, что от вершины молниеотвода  $h_1$  большей высоты строится конус как для одиночного МО. Далее через вершину  $h_2$  меньшего МО, отстоящего на расстоянии  $L$  от МО большей высоты, проводится горизонтальная линия до пересечения с образующей конуса. Из точки пересечения строится фиктивный МО высотой  $h_3$ , равной высоте  $h_2$  меньшего МО. Общая зона двух МО  $h_2$  и  $h_3$  одинаковой высоты строится на

фиктивном расстоянии  $L_1 \leq L$ . Зоны защиты одиночного высокого молниеотвода  $h_1$  и вновь полученного двойного равнорысокого молниеотвода объединяются. В результате нижняя точка зоны защиты смещается к меньшему молниеотводу, что объясняется доминированием высокого молниеотвода. К сожалению, в данной методике не указан уровень надежности, обеспечиваемый при построении зоны защиты двух разнорысоких стержневых МО.

Что характерно в методике [1] – предельное расстояние  $L_{\max}$  между разнорысокими МО, при котором ширина зоны защиты  $b_x = 0$  определяется в зависимости от высоты  $h_a$  активной части стержневых МО, возвышающейся над защищаемым объектом, и составляет  $L_{\max} = 5 \div 7 h_{a2}$ , т.е. такое же значение, как и для случая двух МО одинаковой высоты, равной высоте активной части  $h_{a2}$  меньшего МО.

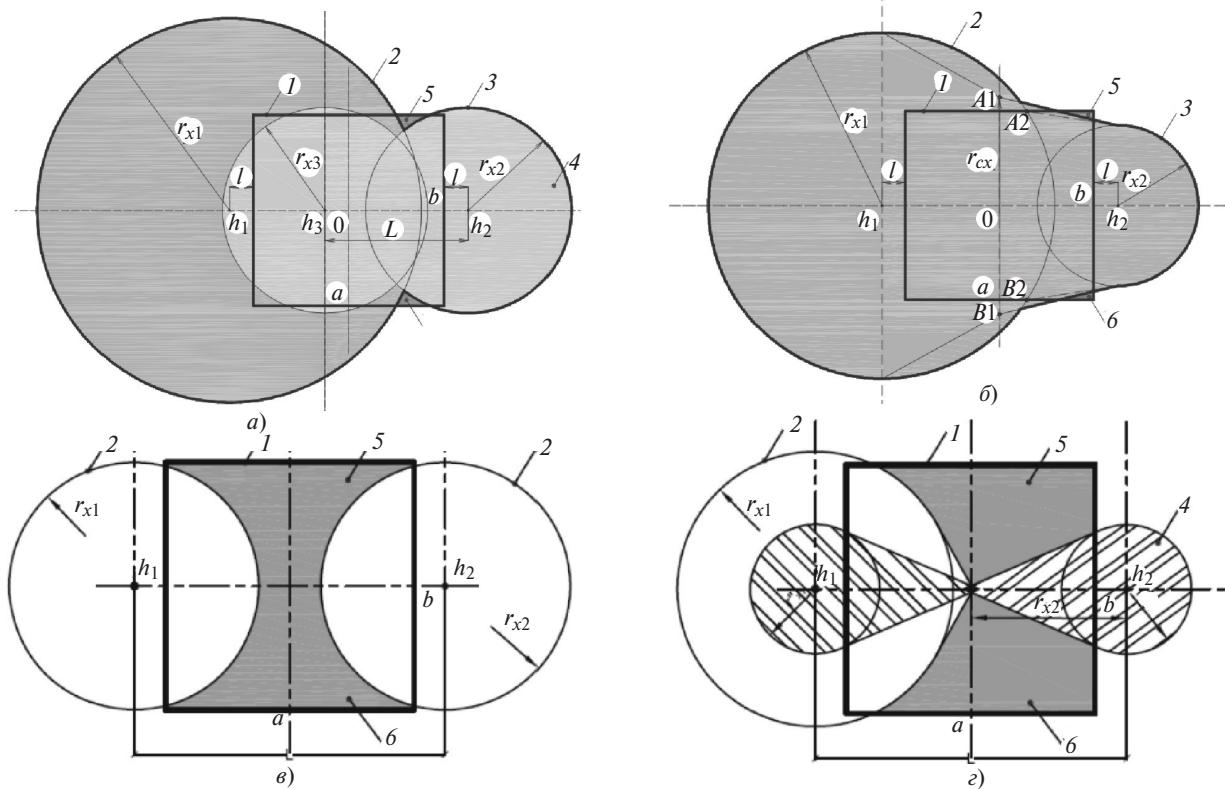
На рис. 1,а приведена зона защиты на высоте  $h_0$  условного объекта размерами  $a \times b \times h_0 = 40 \times 40 \times 10$  м, защищенного двумя разнорысокими стержневыми МО высотой  $h_1 = 48,3$  м и  $h_2 = 28$  м, установленными по оси симметрии на расстоянии 5 м от его периметра, рассчитанная по [1].

Как видно из рис. 1,а, условный объект высотой  $h_0$  практически полностью попадает в зону за-

щиты двух разнорысоких МО за исключением части периметра здания на высоте объекта  $h_0$  (5, б на рис. 1,а). А построение общей зоны защиты двух МО одинаковой высоты на фиктивном расстоянии  $L_1 \leq L$  между МО  $h_2$  и  $h_3$  теряет смысл, так как зона защиты вновь полученного двойного равнорысокого молниеотвода (4 на рис. 1,а) практически полностью покрывается зоной защиты одиночного высокого молниеотвода  $h_1$ .

Другой метод определения зоны защиты двух разнорысоких стержневых МО предложен в [4]. Суть метода заключается в том, что построение общей зоны защиты проводится исходя из зоны защиты отдельно стоящих МО разной высоты. При этом ширина зоны защиты  $r_{cx}$  определяется исходя из высоты снижения  $h_c$  на высоте объекта  $h_0$  посередине между молниеотводами, расположенными на расстоянии  $L$  друг от друга. В свою очередь, нижняя точка общей зоны защиты двух разнорысоких МО (высота снижения  $h_c$ ) определяется как среднее арифметическое высоты снижения  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  попарно взятых МО одинаковой высоты, равной  $h_1$  или  $h_2$ .

Для двух МО разной высоты построение зоны А выполняется при условии, что  $L_{\max} \leq 4h_2$ , а зоны Б – при  $L_{\max} \leq 6h_2$ , т.е. предельное расстояние  $L_{\max}$  между МО определяется по их полной высо-



**Рис. 1.** Область защиты условного объекта размерами  $a \times b \times h_0 = 40 \times 40 \times 10$  м на высоте  $h_0$  с двумя разнорысокими стержневыми МО высотой  $h_1 = 48,3$  м и  $h_2 = 28$  м, установленными по оси симметрии на расстоянии 5 м от периметра: а – по методу А.А. Акопяна; б – по РД34; в – по МЭК; г – по ВСП 22; 1 – объект размерами  $a \times b \times h_0$ ;  $h_1$  и  $h_2$  – стержневые молниеотводы; 2, 3 – соответственно область защиты одиночных разнорысоких МО  $h_1$  и  $h_2$  на высоте объекта  $h_0$ ; 4 – область защиты двойного стержневого МО одинаковой высоты, равной высоте  $h_2$  меньшего МО; 5, 6 – области вероятного поражения модели объекта;  $r_{x1}$  – радиус защиты одиночного МО высотой  $h_1$  и  $h_2$ ;  $r_{x2}$  – радиус защиты двух МО одинаковой высоты, равной высоте  $h_2$  меньшего МО

те, а не по высоте их активной части  $h_a$ , возвышающейся над защищаемым объектом, как это принято в методике [1].

Для объекта и молниеотводов, аналогичных в приведенном примере, на рис. 1,б показана зона защиты  $A$  (соответствующая уровню надежности  $P_H \geq 0,99$ ) на высоте  $h_0$ , рассчитанная по методике [4].

Как видно из эпюры на рис. 1,б, условный объект высотой  $h_0$  также практически полностью попадает в зону защиты  $A$  двух разнорысоких стержневых МО, за исключением углов, близких к МО меньшей высоты  $h_2$ .

Построение зоны  $A$  по приведённой в [4] методике предполагает встраивание объекта в зону защиты двух разнорысоких стержневых МО, определенную относительно поверхности земли, что приводит к необоснованному завышению ее размеров на высоте защищаемого объекта  $h_0$ .

Методика, изложенная в новом документе [5], допускает только *равнорысокие* молниеотводы, что является одним из ее недостатков.

По методике, предложенной в [3], зона защиты двух разнорысоких стержневых МО определяется по методу «сфер обката» активной части  $h_a$  стержневых МО, возвышающейся над защищаемой поверхностью. При этом радиус сферы обката  $R$  определяется уровнем защиты и не зависит от высоты активной части  $h_a$  разнорысоких МО.

Для примера, на рис. 1,в приведена зона защиты на высоте  $h_0$  условного объекта с размерами, аналогичными приведенным ранее, и надежностью  $P_H \geq 0,99$ , рассчитанная по методике [3].

Как видно из рис. 1,в, защита на уровне  $P_H \geq 0,99$  условного объекта двумя разнорысокими стержневыми МО не обеспечивается, так как сфера обката диаметром 40 м меньше, чем расстояние  $L=50$  м между МО.

Применим к построению зоны защиты разнорысоких МО метод защитного угла  $\alpha$ , используемый в [2]. Будем полагать, что расстояние  $L$  между двумя разнорысокими МО, на котором сохраняется взаимное влияние между ними, определяется высотой активной части  $h_{a2}$  меньшего МО  $h_2$  и равной ему по высоте активной частью  $h_{a3}$  более высокого

МО  $h_1$ , т.е.  $h_{a2} = h_{a3}$ . В этом случае в зависимости от формы защищаемого объекта и требуемой надежности МЗ предельное расстояние  $L_{\max}$  между активной частью МО  $h_{a2}$  и  $h_{a3}$  определяется углом защиты  $\alpha_2$ , значение которого приведено в [6] для двух стержневых МО одинаковой высоты. Следовательно, предельное расстояние  $L_{\max}$  между активной частью  $h_{a2}$  МО меньшей высоты и активной частью  $h_{a3}$  более высокого МО (т.е. между стержневыми МО  $h_1$  и  $h_2$ ) имеет значения, приведенные в табл. 1.

Для приведенного ранее примера защиты условного объекта двумя разнорысокими МО при расстоянии между ними  $L=50$  м и высоте активной части  $h_{a2}=18$  м отношение  $L/h_{a2}=2,8$ , что значительно превышает предельное расстояние  $L_{\max}^I = 1,3h_{a2}$ , допустимое для защиты объекта прямоугольной формы с надежностью  $P_H \geq 0,99$  (см. поз. 7 табл. 2).

Из полученных данных следует, что при  $L=2,86h_{a2}$  надежность МЗ на уровне  $P_H=0,99$  обеспечивается только на линии, соединяющей разнорысокие МО. Для линии размеры области защиты определяются углом защиты  $\alpha_2 = 55^\circ$  ( $\operatorname{tg}\alpha = r_{x3}/h_{a2} = L_{\max}^I / 2h_{a2}$ ) и радиусом защиты активной части отдельно стоящих разнорысоких МО  $h_{a1}$  и  $h_{a2}$ , а форма области защиты разнорысоких МО с учетом их взаимного влияния друг на друга имеет вид на рис. 1,г.

Как видно из эпюры рис. 1,г, взаимное влияние между активной частью двух стержневых МО высотой  $h_{a2}$  и равной ей по высоте активной частью  $h_{a3}$  МО  $h_1$  сведено до минимума, а вероятность поражения условного объекта, защищенного двумя разнорысокими МО высотой  $h_1=48,3$  м и  $h_2=28$  м, очень большая.

Таким образом, при анализе надежности защиты условного объекта, выполненном по различным методикам при одинаковом значении  $P_H=0,99$ , можно отметить существенное расхождение полученных результатов (см. рис. 1) в части определения размеров зоны защиты двух разнорысоких стержневых МО. Также следует обратить внимание на несоразмерно большую зону защиты 2 на рис. 1,а и б для одиночного стержневого МО  $h_1$ ,

Таблица 1

Уровень защиты	$P_H$	Объект высотой $h_0$				Прямоугольный объект размерами $a \times b \times h_0$ , $b=0,9$	
		стержень		П-образный			
		$L_{\max}^c$	$\alpha_2$ , град.	$L_{\max}^I$	$\alpha_2$ , град.	$L_{\max}^{II}$	$\alpha_2$ , град.
I	0,99	$1,93h_{a2}$	44	$2,86h_{a2}$	55	$1,3h_{a2}$	40
II	0,95	$2,15h_{a2}$	47	$3,46h_{a2}$	60	$1,6h_{a2}$	46
III	0,90	$2,75h_{a2}$	54	$4,5h_{a2}$	66	$2,0h_{a2}$	52

полученную по методикам [1, 4] при определении зоны защиты двойного стержневого МО.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований по определению вероятности поражения объекта при его защите двумя разнорысокими МО для сравнения с результатами расчета по рассмотренным методикам.

#### Результаты экспериментальных исследований.

Для оценки надежности защиты условного объекта размерами  $a \times b \times h_0 = 40 \times 40 \times 10$  м двумя разнорысокими стержневыми МО, установленными на расстоянии 5 м от его периметра, были проведены крупномасштабные экспериментальные исследования на модели объекта в 1/10 натурального размера.

Исследования проводились в полевой высоковольтной лаборатории при длине искрового промежутка  $S = 15$  м. Для моделирования длинной искры использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) фирмы TUR (6 МВ, 960 кДж). Источником напряжения являлся коммутационный импульс положительной полярности с длительностью фронта 250 мкс и длительностью импульса 2500 мкс [7].

Высоковольтный электрод устанавливался в наиболее опасном положении – непосредственно над моделью объекта. При воздействии серии из  $n = 100$  разрядов на модель объекта оценивалась вероятность ее поражения и рассчитывалась надежность защиты  $P_H$ . Результаты испытаний модели объекта, защищенного двумя стержневыми МО, приведены в табл. 2.

На первом этапе испытаний была определена высота МО  $h_1 = h_2$ , при которой уровень надежности МЗ достигал  $P_H \geq 0,99$ . Высота каждого из двух МО при этом  $h_1 = h_2 = 4,83$  м. Из числа  $n = 100$  воздействий поражения модели объекта не зафиксировано (см. п. 1 табл. 2)

На втором этапе высота МО  $h_1$  оставалась постоянной, а высота  $h_2$  последовательно уменьша-

лась до 2,8 м, которая соответствовала соотношению высот, использованному в приведенном ранее примере расчета по методикам [1–4].

Как видно из данных, приведенных в табл. 2 (знаменателе поз. 2), с уменьшением высоты МО  $h_2$  число поражений модели объекта возрастало, надежность МЗ снижалась с  $P_{H.p} = 1$  до  $P_{H.p} = 0,84$ , а картина их распределения по площади изменялась. Распределение точек поражения модели объекта в каждой серии из  $n = 100$  воздействий при изменении высоты МО  $h_2$  приведено на рис. 2.

Для сравнения результатов испытаний с результатами расчета по предложенной методике с использованием угла защиты  $\alpha$ , на рис. 2,а–г построены области защиты условного объекта на высоте  $h_0$ , соответствующие 1-му уровню ( $P_H \geq 0,99$ ). Можно отметить, что при снижении высоты МО  $h_2$  зона вероятного поражения модели объекта увеличивается (см. области 3, 4 на рис. 2), а надежность молниезащиты снижается.

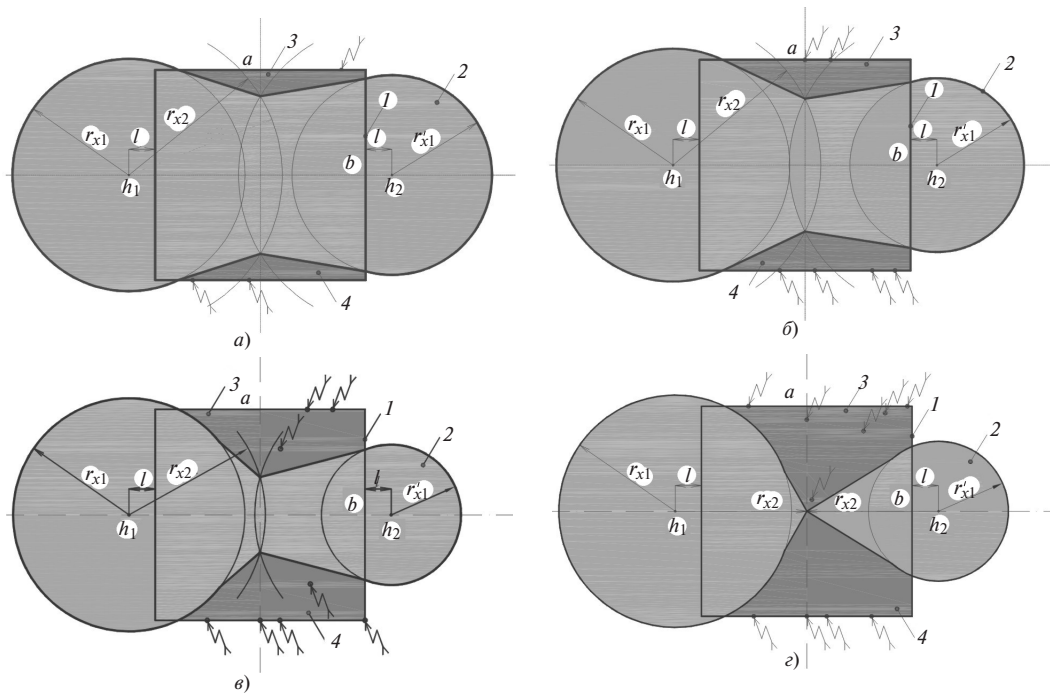
При анализе данных расчетов области вероятного поражения модели объекта при ее защите двумя разнорысокими МО, выполненных по разным методикам и приведенных на рис. 1, и данных экспериментальных исследований, приведенных на рис. 2,г, при высоте МО, соответствующей их высоте, используемой при расчетах, следует отметить совпадение полученных результатов только на рис. 1,г, где показано, что область вероятного поражения распространяется и на центральную часть модели, что подтверждено ее поражением одним из 100 разрядов.

Сравнивая полученные в эксперименте результаты (рис. 2,г) с расчетной оценкой области вероятного поражения объекта по методикам [1, 4] (см. рис. 1,а, б), можно отметить отсутствие корреляции результатов и завышенную оценку при определении уровня надежности защиты по указанным методикам для двух разнорысоких стержневых МО.

Таблица 2

Номер п/п	Высота МО $h_1/h_2$ , м	Число поражений ПУМ*, $n_0/n_p$				$\alpha_2$	Надежность МЗ двух МО	
		Объект	Грунт	М1	М2		одинаковой высоты $h_1=h_2$ $P_{H.o}$	разной высоты $h_2 < h_1$ $P_{H.p}$
1	4,83/4,83	0	40/-	31/-	29/-	40,2	1	1
2	4,83/4,3	2/3	47/18	25/49	26/31	44,5	0,97	0,95
3	4,83/3,8	5/6	33/13	30/52	32/30	49	0,92	0,90
4	4,83/3,3	14/8	36/23	25/48	27/21	54,6	0,82	0,87
5	4,83/2,8	26/10	32/22	21/43	22/25	61	0,6	0,84

П р и м е ч а н и я:  $n_0$  – число поражений при одинаковой высоте двух МО, равной высоте  $h_2$  меньшего МО ( $h_{a2}=h_{a3}$ );  $n_p$  – число поражений при двух разнорысоких МО ( $h_{a2} \leq h_{a1}$ );  $\alpha_2$  – угол защиты двух МО одинаковой высоты, равной высоте меньшего МО  $h_2$ ; \*Экспериментальные данные по числу поражений в серии из  $n = 100$  разрядов при защите двумя МО одинаковой высоты, равной высоте МО  $h_2$ , в знаменателе по числу поражений при защите двумя разнорысокими МО.



**Рис. 2.** Результаты экспериментальных исследований поражаемости условного объекта размерами  $a \times b \times h_0$ , защищенного двумя разновысокими стержневыми МО высотой  $h_1 = 4,83$  м и  $h_2 = 4,3$  м (а);  $h_2 = 3,8$  м (б);  $h_2 = 3,3$  м (в) и  $h_2 = 2,8$  м (г) в длинном искровом промежутке: 1 – объект размерами  $a \times b \times h_0$ ; 2 – область защиты двух разновысоких стержневых МО; 3, 4 – области вероятного поражения модели объекта;  $h_1$  и  $h_2$  – стержневые молниеотводы;  $r_{x1}$  – радиус защиты одиночного МО высотой  $h_1$  и  $h_2$ ;  $r_{x2}$  – радиус защиты двух МО одинаковой высоты, равной высоте  $h_2$  меньшего МО; стрелками показаны точки поражения модели объекта при воздействии  $n = 100$  разрядов

**Выводы.** 1. Анализ надежности защиты условного объекта двумя разновысокими стержневыми МО, выполненный по различным методикам при одинаковом значении  $P_H \geq 0,99$ , показал существенное расхождение полученных результатов в части определения размеров их зоны защиты.

2. Результаты анализа расчета зон защиты двух разновысоких стержневых МО подтверждены результатами крупномасштабных испытаний модели объекта в длинном искровом промежутке с надежностью  $P_H \geq 0,99$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Указания** по грозозащите зданий и сооружений и защите от статического электричества. М.: Воениздат, 1958, 219 с.
2. **ВСП 22-02-07/МО РФ.** Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры. М., 2007, 168 с.
3. **МЭК 62305.** Молниезащита, ч. 1–5, 2003.

4. **РД 34.21.122-87.** Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. Минэнерго СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989.

5. **СО 153-343.21.122-2003.** Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. М.: МЭИ, 2004.

6. **Куприенко В.М.** Определение предельных размеров зоны защиты активной части отдельно стоящих стержневых молниеотводов. – Электричество, 2015, № 4, с. 20–25.

7. **Куприенко В.М.** Об определении вероятности поражения зданий и сооружений разрядом молнии при их защите стержневыми и тросовыми молниеотводами. – Электричество, 2012, № 11, с. 8–26.

8. **Куприенко В.М.** Особенности защиты зданий и сооружений тремя стержневыми молниеотводами. – Электричество, 2016, № 6, с. 4–9.

[03.05.2018]

*А в т о р:* **Куприенко Василий Михайлович** – доктор техн. наук, начальник отдела «23 Государственного морского проектного института», диссертацию защитил в 2009 г.

## Protection of Buildings and Structures by Means of Lightning Rods Having Different Heights

**KUPRIYENKO Vasily M.** (23 the State Marine Project Institute, St. Petersburg, Russia) – Chief of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

*Protection of buildings and structures by means of lightning rods having different heights with the preset reliability level  $P_r$  does not have hitherto a sufficient scientific substantiation. The article presents the results of investigations on determining the limit distance  $L_{max}$  between lightning rods having different heights used to protect an arbitrarily shaped facility. For analyzing the striking probability of a facility protected by means of lightning rods having different heights, the protection angle  $\alpha$  is used, which is determined by the ratio of protection radius  $r_x$  to the lightning rod active part height  $h_a$  above a facility having the height  $h_f$ . The dependence characterizing the striking probability of a facility protected by lightning rods having different heights has been determined by carrying out tests of a long spark gap using a 250/2500  $\mu$ s switching voltage pulse.*

**Key words:** lightning protection, lightning rods, protection zone, facility striking probability, reliability

#### REFERENCES

1. **Ukazaniya po grozozachite zdaniy i sooruzhenii i zashchite ot staticheskogo elektrichestva** (Guidelines on Lightning Protection of Buildings and Structures and on Protection from Static Electricity). Moscow, Voenizdat, 1985, 219 p.
2. **VSP 22-02-07/MO RF. Normy po proektirovaniyu ustroystv i ekspluatatsii molniyezashchity ob'yektov voyennoi infrastruktury** (VSP 22-02-07/MO RF. Regulations for Design, Arrangement, and Operation of Lightning Protection for Military Infrastructure Facilities). Moscow, 2007, 168 p.
3. **MEC 62305. Molniyezashchita** (Leghtning Protection). Parts 1–5, 2003.
4. **RD 34.21.122–87. Instruktsiya po ustroystvu molniyezashchity zdaniy i sooruzhenii** (Instruction on the creation of lightning protection of building). Moscow, Energoatomizdat, 1989.
5. **SO 153-343.21.122–2003. Instruktsiya po ustroystvu molniyezashchity zdaniy, sooruzhenii i promyshlennykh kommunikatsii** (Instruction on the device of lightning protection building and industrial communications). Moscow Power Engineering Institute, 2004.
6. **Kupriyenko V.M. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2015, No. 4, pp. 20–25.
7. **Kupriyenko V.M. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2012, No. 11, pp. 8–26.
8. **Kupriyenko V.M. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2016, No. 6, pp. 4–9.

[03.05.2028]