

11. Chaari O., Bastard P., Meunier M. Prony's method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks. — IEEE Trans. in Power Delivery, July 1995, vol. 10, № 3.

12. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Арсентьев А.П. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1988, № 6.

13. Антонов В.И., Лазарева Н.М. Решетчатый адаптивный фильтр с контролем достоверности результата для распознавания сигналов электрических систем. — Изв. РАН. Энергетика, 1997, № 6.

[31.05.12]

*А в т о р ы*: Антонов Владислав Иванович окончил в 1978 г. факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета (ЧГУ). В 1985 г. защитил в Ле-

нинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование новых принципов построения измерительных органов направленных защит линий электропередачи». Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ.

Наумов Владимир Александрович окончил в 2001 г. электроэнергетический факультет ЧГУ. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заведующий отделом РЗА станционного оборудования ООО «НПП ЭКРА».

Фомин Алексей Иванович окончил в 2010 г. электроэнергетический факультет ЧГУ. Инженер отдела РЗА станционного оборудования ООО «НПП ЭКРА».

\* \* \*

## Об определении вероятности поражения зданий и сооружений разрядом молнии при их защите стержневыми и тросовыми молниеотводами

КУПРИЕНКО В.М.

*Приведены результаты сравнительных испытаний поражаемости типовых объектов различной формы и размеров (занимаемой площади) в зависимости от параметров молниезащитной системы. Вероятность поражения объекта, размеры зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов определены по результатам испытаний в полевой высоковольтной лаборатории на коммутационном импульсе напряжения 250/2500 мкс в длинных искровых промежутках. Для сравнительной оценки эффективности различных схем молниезащиты использовался угол защиты  $\alpha$ . Определена зависимость вероятности поражения объекта при испытаниях в длинном искровом промежутке от полярности импульса напряжения. Исследовано влияние высоты активной части стержневых молниеотводов на надежность молниезащиты объектов различной формы и площади.*

*Ключевые слова*: молниезащита, молниеотводы, зона защиты, угол защиты, заземление, вероятность поражения объекта, испытания

Несмотря на значительные успехи в области изучения молниезащиты, до сих пор нет стройной теории процесса образования, развития и ориентировки молнии. Это свидетельствует о сложности и неоднозначности такого явления природы, как разряд молнии. Исследование развития разряда молнии и его моделирование в лабораторных условиях

*The results obtained from comparative tests aimed at determining the vulnerability of typical facilities with different shapes and dimensions (occupied area) to lightning stroke as a function of the parameters of their lightning protection system are presented. The facility hitting probability, the dimensions of the area protected by lightning rods and conductors are determined from the results of tests carried out at a field high-voltage laboratory using a 250/2500 s switching impulse in long spark gaps. The protection angle  $\alpha$  was used for assessing comparative efficiency of different lightning protection schemes. The dependence of facility hitting probability on the voltage impulse polarity during tests in a long spark gap is determined. The effect the lightning rod active part's height has on the reliability of the lightning protection of facilities having different shapes and areas is studied.*

*Key words*: lightning protection, lightning rods, protection zone, protection angle, grounding, facility hitting probability, tests

до настоящего времени являются актуальной проблемой, требующей своего решения.

Нормы и рекомендации [1–3] по определению зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов базируются на результатах лабораторных исследований, выполненных различными авторами [4–9], и статистических данных наблюдений по пораже-

нию объектов, в том числе и защищенных молниеотводами.

При проведении лабораторных исследований важно обеспечить подобие развития разряда в воздушном промежутке стержень–плоскость и разряда естественной молнии. Для естественной молнии характерна зигзагообразность канала лидера, обусловленная его ступенчатым развитием и случайным направлением в пространстве каждой ступени при средней разрядной напряженности порядка 15 кВ/м [5–7]. Длина ступени лидера занимает незначительную часть разрядного промежутка «облако–земля» и зависит от ряда естественных факторов. В среднем длина ступени лидера составляет 10–200 м [5, 6]. При воспроизведении молнии в лабораторных условиях сохранение зигзагообразного характера развития канала лидера и его случайного (вероятностного) направления развития является одним из важнейших аспектов моделирования.

Практически все исследования по определению зон защиты молниеотводов выполнены в промежутках стержень–плоскость длиной до 10 м при импульсах положительной полярности с различными временными характеристиками [4–9]. Как правило, поверхность земли моделировалась металлическим листом, а объект и молниеотводы – металлическими стержнями различной высоты. Масштаб моделирования выбирался исходя из предполагаемой высоты ориентировки длинной искры при условии, что исследуемый объект занимал не более 30% высоты разрядного промежутка.

Обширные исследования [4] до настоящего времени составляют основу методик расчета зон молниезащиты стержневых и тросовых молниеотводов отечественных нормативных документов [2, 3]. Исследования проводились при импульсе напряжения 1,5/1000 мкс положительной полярности. В данных исследованиях высота моделей объекта и молниеотводов, выполненных в виде стержней, не превышала 0,1–1,0 м, а масштаб моделирования составлял 1/100 натурного размера. При таком масштабе направление развития разряда сильно зависело от положения высоковольтного электрода над испытываемой системой молниезащиты. Поэтому обязательным условием являлся поиск «наиболее опасного» положения высоковольтного электрода относительно модели [4, 9].

В более поздних работах по определению зон защиты стержневых молниеотводов исследования проводились в искровых промежутках длиной 8–10 м, размеры стержневых моделей достигали 1–2 м, а масштаб моделирования составлял 1/10 [5, 6]. На основании данных, полученных в более поздних работах, был сделан вывод, что защитное действие

молниеотводов существенно меньше, чем это принималось ранее. Однако объем выполненных исследований был недостаточным для уточнения на их основе методики расчета зон защиты.

В стандарте [1] эффективность перехвата молнии внешней молниезащитной системой (МЗС) характеризуется углом защиты  $\alpha$ , определяемым при минимальных параметрах тока разряда молнии  $I_{\min}$  или по радиусу фиктивной сферы  $R$  (так называемая электрогеометрическая модель). Предполагается, что все разряды молнии с амплитудами токов, превышающими  $I_{\min}$ , будут, безусловно, перехвачены внешней МЗС за счет более активных процессов образования встречного лидера со стороны молниеприемника [1]. Например, для I уровня молниезащиты ток  $I_{\min} = 3$  кА, а  $I_{\max} = 200$  кА. Значение  $I_{\min}$  используется для выбора внешней МЗС, а  $I_{\max}$  – для испытания отдельных компонент МЗС или защитных аппаратов.

Следует отметить, что размеры зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов, определяемые по методикам, изложенным в отечественных и зарубежных нормативных документах, имеют значительное расхождение по значению угла защиты  $\alpha$  [19].

В статье приводится экспериментальное обоснование методики определения зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по результатам исследования вероятности поражения моделей объектов, защищенных молниеотводами, в длинных воздушных промежутках.

Используя накопленный опыт предыдущих лабораторных исследований по определению зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов [4–9], на первом этапе работы был уточнен ряд положений, на которых основана методика испытания моделей объекта с внешней МЗС в длинных воздушных промежутках, а именно:

выбор полярности высоковольтного импульса напряжения относительно земли;

обеспечение зигзагообразного характера развития канала лидера и его случайного (вероятностного) направления при моделировании длинной искры;

сохранение подобия тока в сквозной (завершающей) стадии формирования длинной искры минимальному току молнии, определяющему вероятность перехвата разряда молнии молниезащитной системой;

выбор соответствующего масштаба линейных размеров моделируемого объекта с внешней молниезащитной системой, обеспечивающего адекватные натурным условия перехвата длинной искры молниеотводами;

влияние значения сопротивления заземления объекта и молниеотводов на вероятность перехвата разряда молнии;

влияние формы и геометрических размеров защищаемого объекта на вероятность его поражения при воздействии прямого удара молнии (ПУМ).

Оценка вероятности поражения объекта разрядом молнии проводилась по значению угла защиты  $\alpha$ , которое используется при определении зон защиты в отечественных (для линий) и зарубежных стандартах по молниезащите.

Исследования проводились в полевой высоковольтной лаборатории. Источником получения импульсных напряжений положительной и отрицательной полярности являлся генератор импульсных напряжений фирмы TUR ГИН-6 МВ с энергией 960 кДж. Разряд формировался в воздушном промежутке стержень–плоскость длиной  $S = 8,15$  м при приложении коммутационного импульса напряжения положительной полярности 250/2500 мкс (рис.1). В качестве высоковольтного электрода использовался заостренный на конце стержень диаметром 46 мм и длиной 2 м; в качестве плоскости – грунт открытой испытательной площадки.

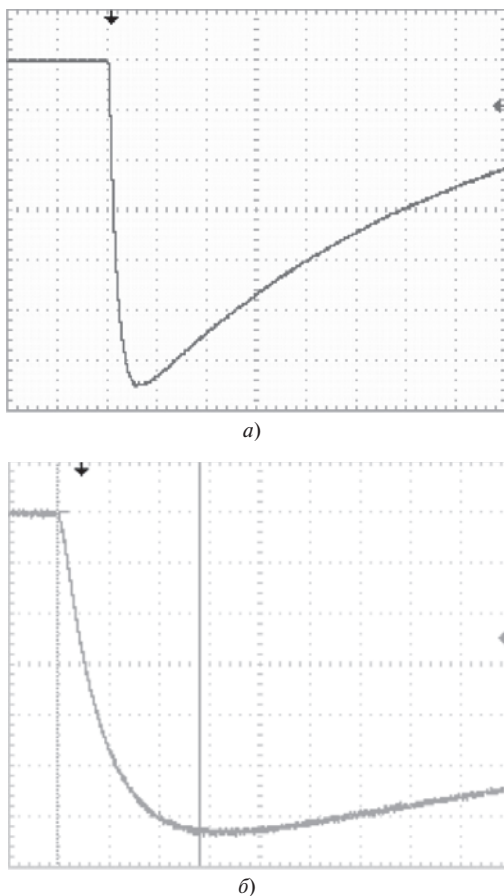


Рис. 1. Типовая осциллограмма коммутационного импульса напряжения: *a* – форма импульса ( $t_{\text{СП}} = 2620$  мкс); *b* – время подъема импульса до максимума ( $t_{\text{Ф}} = 284$  мкс)

Экспериментальные исследования поражаемости моделей объекта с внешней молниезащитной системой в длинных воздушных промежутках проводились при импульсных токах, подобных минимальному току разряда молнии. Определенная таким образом эффективность внешней МЗС имеет минимальное значение (ограничение снизу) и будет только возрастать с увеличением тока разряда молнии. А установленные при этом углы защиты (и соответствующая углу ширина зоны защиты) будут характеризовать эффективность (надежность) различных схем внешней МЗС.

Приведенные далее результаты экспериментальных исследований могут быть полезны при уточнении методики расчета надежности средств молниезащиты объектов различного назначения от ПУМ и при их испытании в длинных воздушных промежутках.

**Обоснование методики проведения экспериментальных исследований вероятности поражения объектов в длинном воздушном промежутке.** *Исследование влияния полярности импульса напряжения.* Полярность линейной молнии принято определять по знаку заряда, переносимого от облака на землю по ее каналу. Большинство линейных молний (80–90%) независимо от их типа и географической широты переносят на землю отрицательные заряды [1, 7].

Независимо от полярности молнии по направлению развития различают нисходящие и восходящие молнии. Нисходящие молнии возникают в грозовых облаках и развиваются по направлению к земле. Восходящие молнии развиваются у вершин заземленных объектов и развиваются по направлению к облаку.

Многочисленные статистические данные свидетельствуют о том, что маловысотные объекты поражаются преимущественно нисходящими разрядами молнии [7]. Не вдаваясь в физику развития разряда молнии, отметим некоторые особенности развития нисходящего отрицательного и положительного лидера.

При отрицательном нисходящем лидере встречный положительный лидер может возникнуть от электрода любой конфигурации, в том числе и от земли [7]. Это объясняется тем, что при отрицательном лидере напряженность электрического поля у земли достигает значения более 20 кВ/м.

При этом встречный положительный разряд вполне может стартовать с заземленных объектов за счет существенного усиления поля на его поверхности вследствие суммарного действия отрицательных зарядов грозового облака, лидера нисходящей молнии, чехла канала, образованного стриме-

рами на предыдущих этапах его развития, и стримерной зоны, развивающейся впереди головки канала. Развитие двух встречных лидеров делают направление развития разряда по направлению к земле более предсказуемым, так как встречный положительный лидер будет развиваться, прежде всего, с наиболее высоких заземленных предметов (например, с молниеприемника, металлической опоры, кровли здания и т.п.). Поэтому при физическом моделировании грозопоражаемости объекта (здание, вышка, линия и т.п.) более высокие результаты по вероятности поражения дает метод аналога лидера молнии, основанный на использовании длинной отрицательной искры, приведенный в [11]. Ток «возвратного удара» в завершающей стадии формирования длинной искры в физической модели, приведенной в [11], достигает 5 кА. Возникающий при таком моделировании встречный положительный лидер создает условия для безусловной ориентации длинной искры на объект, а в случае его защиты – на возвышающийся над объектом молниеотвод. Ток возвратного удара в данной физической модели намного больше минимального тока натурной молнии (3 кА), используемого для выбора внешней МЗС в [1]. Очевидно, при физическом моделировании объекта в масштабе 1/5, 1/10 натурного размера, используемом в [11], амплитуда тока в завершающей стадии формирования длинной искры должна быть существенно меньше 5 кА.

При положительном нисходящем лидере натурной молнии напряженность электрического поля у поверхности земли близка к 5 кВ/м, вследствие чего отрицательный встречный лидер от плоскости земли не возникает, поскольку для возникновения самостоятельного разряда от плоскости земли требуется более сильная напряженность электрического поля. Усиление напряженности поля может возникнуть у вершины заземленного электрода, выполненного в виде стержня. Однако экранирующее действие плоскости земли настолько велико, что усиление напряженности поля у вершины молниеотвода может быть «обнаружено» нисходящим положительным лидером только на достаточно близком расстоянии, которое называют высотой ориентировки разряда молнии  $H_0$ . Высота ориентировки будет существенно зависеть от значения тока молнии [1, 6, 7], поэтому грозопоражаемость объекта, защищенного молниеотводами, нисходящим положительным лидером, особенно при минимальном значении тока молнии, будет гораздо выше, чем нисходящим отрицательным лидером.

Исходя из изложенного, следует предположить, что в случае возникновения отрицательного нисходящего лидера, условия поражения незащищенного объекта будут «предпочтительнее», а надежность его защиты стержневыми молниеотводами при прочих равных условиях намного выше, чем при возникновении положительного лидера. Аналогичное предположение было высказано и в [4].

Таблица 1

Схема испытаний	Полярность	Отношение $L/h^*$	Высота подвеса стержня $S$ , м	Число поражений				Общее число разрядов $n$	Вероятность поражения модели $P_{п}$
				объекта	земли	молниеприемника			
		левого	правого						
Модель объекта без защиты									
	+	–	15	41	59	–	–	100	0,41
	+	–	8	72	30	–	–	101	0,71
	–	–	8	106	4	–	–	110	0,96
Модель объекта, защищенная двумя стержневыми молниеотводами									
	+	2,73	15	33	132	133	116	414	0,19
	+	1,88	15	0	37	35	28	100	0
	+	2,73	8	3	11	15	16	45	0,09
	–	2,73	8	0	11	46	50	107	0
	–	3,18	8	0	1	25	24	50	0
	–	3,6	8	1	2	26	21	50	0,02
	–	4,1	8	2	1	13	11	27	0,08
	–	4,55	8	2	1	5	4	12	0,17

\*  $L$  – расстояние между стержневыми молниеотводами высотой  $h_1 = h_2$ .



Для определения влияния полярности коммутационного импульса напряжения (250/2500 мкс) на результаты экспериментальных исследований вероятности поражения модели объекта (в том числе и с молниезащитой) в длинном воздушном промежутке были проведены испытания, результаты которых приведены в табл. 1. Исследовалась вероятность поражения объекта размерами 50' 20' 3,5 м в масштабе 1/10 натурального размера положительным или отрицательным нисходящим лидером при наилучшем для объекта варианте его возникновения (по центру над объектом) [10].

Результаты испытаний показали, что при одинаковой длине воздушного промежутка  $S = 8$  м поражаемость модели объекта без защиты при отрицательной полярности импульса напряжения существенно выше, чем при положительной полярности ( $P_{\Pi}^{+} = 0,71$ ,  $P_{\Pi}^{-} = 0,96$ ). И наоборот, для модели объекта, защищенной двумя стержневыми молниеотводами при одинаковом соотношении  $L/h = 2,73$ , поражаемость модели при отрицательной полярности импульса напряжения отсутствует, а при положительной полярности  $P_{\Pi}^{+} = 0,09$ .

Следовательно, наилучшие результаты по поражаемости модели объекта с молниезащитой получены при испытании коммутационным импульсом напряжения положительной полярности. Это значит, что если по результатам испытаний объект защищен от прямых ударов нисходящей положительной молнии, то он с еще большей вероятностью будет защищен от разрядов нисходящей молнии отрицательной полярности.

Исходя из изложенного, все дальнейшие исследования вероятности поражения моделей объекта с различными вариантами молниезащиты проводились на коммутационном импульсе напряжения положительной полярности.

*Обеспечение вероятностного развития канала лидера.* При лабораторных исследованиях надежности различных схем молниезащиты обеспечение случайного (вероятностного) развития разряда в воздушном промежутке стержень–плоскость является одним из важнейших аспектов моделирования для получения достоверных результатов.

В исследованиях по определению зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов, выполненных различными авторами, использовался импульс напряжения положительной полярности с длительностью фронта от 1,5 мкс [4] до 3000 мкс [5, 7]. При малой длительности фронта импульса (1,5/1000 мкс) завершение разряда в воздушном промежутке происходит далеко на спаде импульса, что существенно ограничивает длину разрядного промежутка [4, 5]. Но даже в этом случае «при по-

ложительном знаке верхнего электрода достаточно хорошо наблюдается произвольное направление разряда в верхней части. При отрицательной же полярности верхнего электрода путь разряда более прямолинеен и с самого начала ориентирован» [4].

Применение пологих импульсов напряжения (с длительностью фронта импульса до 3000 мкс) в лабораторных исследованиях молниезащиты обосновано тем, что развитие лидера должно обеспечиваться в пределах роста фронта приложенного импульса [5]. Как отмечалось в [5–7], вероятностный характер развития разряда и его случайная направленность в длинных воздушных промежутках наблюдались при импульсах напряжения положительной полярности при минимальной разрядной напряженности, составляющей 100, 200 кВ/м.

Например, результаты исследований [5, 6, 8] получены при длительности фронта импульса  $t_{\Phi} = 3000$  мкс. Для испытаний использовался каскад трансформаторов фирмы TUR, который создавал униполярный колебательный импульс напряжения амплитудой до 2,2 МВ, обеспечивающий формирование разряда в промежутке длиной  $S = 10$  м при минимальной разрядной напряженности  $E_p = 210$  кВ/м. Для сравнения минимальная разрядная напряженность воздушных промежутков при импульсах напряжения отрицательной полярности составляет 500–800 кВ/м, что создает предпосылки для образования встречного положительного лидера от выступающих над заземленной плоскостью объектов и, как следствие, высокую вероятность ориентировки на них отрицательного лидера.

Потому, несмотря на то, что большинство молний (80–90%) переносят на землю отрицательный заряд, при экспериментальных исследованиях подобие натурным условиям развития молнии любой полярности обеспечивается применением импульса напряжения положительной полярности с длительностью фронта импульса более 100 мкс [5, 7, 9].

Для уточнения влияния формы и полярности импульса напряжения на значение разрядного напряжения  $U_p$  воздушного промежутка стержень–плоскость в зависимости от длины  $S$  и предразрядного времени  $t_p$  были выполнены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

Длина воздушного промежутка при эксперименте изменялась от 6 до 20 м; длительность фронта импульса – от 2,5 до 450 мкс, а длительность импульса – от 50 до 2500 мкс. Разряд формировался между высоковольтным электродом и поверхностью земли. Типовая форма разряда между стержнем и поверхностью земли в промежутке длиной

Таблица 2

Номер п/п	Длина воздушного промежутка $S$ , м	Характеристика импульса $t_{\phi}/t_{и}$ , мкс	Критическая длительность фронта импульса $T_{кр}$ , мкс	Время формирования разряда $t_p$ , мкс	Разрядное напряжение $U_p$ , кВ	Разрядная напряженность $E_p$ , кВ/м
1	6	250/2500	300	170–200	1960	327
2	7	250/2500	350	220–300	2050	293
3	8	250/2500	400	260–340	2150	262
4	8(–)*	250/2500	–	250	4100	512
5	9	250/2500	450	360–400	2150	239
6	10	250/2500	500	460–480	2150	215
7	10	450/2500	500	520–600	1850	185
8	10 [6]	3000	500	?	2100	210
9	15	250/2500	750	620–700	2650	176
10	20	250/2500	1000	~ 1300	3400	170
11	8	2,5/50	–	3	3580	448

\* (–) – импульс напряжения отрицательной полярности.



Рис. 2. Разряд в промежутке стержень–плоскость  $S=20$  м при испытании модели опоры высотой 10 м

20 м приведена на рис. 2. Значения разрядного напряжения и разрядной напряженности, приведенные в табл. 2, получены в результате обработки  $n$ -го числа опытов при 100%-м разрядном напряжении.

Исследования показали, что при одинаковой длительности фронта импульса положительной полярности  $t_{\phi} = 250$  мкс с увеличением длины разрядного промежутка от 6 до 20 м его разрядная напряженность  $E_p$  уменьшается с 327 до 170 кВ/м. Формирование разряда в промежутке длиной  $S = 20$  м (п. 10 табл. 2) происходит при минимальной разрядной напряженности, однако такой ре-

жим эксплуатации ГИН не может быть использован для испытаний при больших сериях, так как он находится на пределе технических возможностей генератора импульсов [10].

При увеличении длительности фронта импульса с 250 до 450 мкс разрядное напряжение снижается (пп. 6, 7 табл. 2). Это можно объяснить тем, что  $t_{\phi} = 450$  мкс ближе к критической длительности фронта импульса  $T_{кр}$  воздушных промежутков длиной  $S = 10$  м, которая может быть определена как  $T_{кр} = 50 S$  мкс. В этом случае 50%-е разрядное напряжение  $U_{50} = 3,4/1+8/S$  МВ [12].

Практическое равенство  $U_p$  в промежутках 8, 9 и 10 м (см. пп. 3, 5, 6 табл. 2) объясняется тем, что формирование разряда происходит при одинаковом напряжении, но при различном предразрядном времени  $t_p = 260, 340$  мкс для  $S = 8$  м и  $t_p = 460, 480$  для  $S = 10$  м.

Сравнение данных, приведенных в пп. 6 и 8 табл. 2, показало, что при  $t_{\phi} = 250$  мкс и  $t_{\phi} = 3000$  мкс разрядное напряжение промежутка длиной  $S = 10$  м имеет примерно одинаковое значение  $U_p \approx 2100$  кВ и при этом сохраняется случайный (вероятностный) характер развития канала разряда. Поэтому для формирования разряда в промежутке длиной  $S = 10, 15$  м с одинаковым успехом можно использовать как каскад трансформаторов, так и ГИН.

Из приведенных данных по значению разрядного напряжения для промежутка длиной  $S = 8$  м при коммутационном положительном, отрицательном и грозовом импульсах напряжения (табл. 2, пп. 3, 4 и 11 соответственно) видно, что разрядная напряженность при отрицательном коммутационном им-

пульсе ( $t_{\Phi} = 250$  мкс) и грозовом импульсе напряжения ( $t_{\Phi} = 2,5$  мкс) почти в 2 раза больше разрядной напряженности при коммутационном импульсе положительной полярности напряжения.

Исследования показали, что в лабораторных условиях процесс развития разряда молнии можно смоделировать в промежутках длиной 10–20 м при импульсах положительной полярности 250/2500 мкс. В этом случае особенности формирования разряда обеспечивают случайный (вероятностный) характер развития канала вплоть до момента ориентировки нисходящего лидера на заземленные объекты и низкую разрядную напряженность промежутка (176 кВ/м для промежутка длиной 15 м). Среднестатистическое время формирования разряда в промежутке длиной 15 м составляет  $t_p = 620, 700$  мкс, а завершение разряда происходит практически на максимуме амплитуды приложенного напряжения.

Ток завершающей стадии формирования искусственной молнии. Другим важным аспектом при моделировании искусственной молнии в длинных искровых промежутках является значение тока в завершающей (сквозной) стадии развития разряда. Эффективность перехвата молнии молниеотводами внешней МЗС зависит от минимальных параметров тока молнии  $I_{\min}$ . Предполагается, что все разряды молнии с амплитудой тока, превышающей ее минимальное значение, будут безусловно перехвачены внешней МЗС за счет более активных процессов образования встречного лидера со стороны молниеприемника.

В стандарте [1] значение минимального тока молнии используется для выбора внешней МЗС с заданной вероятностью перехвата  $P_H$  [1]. Например, для первого уровня молниезащиты (вероятность перехвата  $P_H = 0,98$ )  $I_{\min} = 3$  кА.

Для сохранения подобия перехвата разряда молнии молниезащитной системой ток  $I_{\min}$  в завершающей фазе формирования длинной искры должен соответствовать в принятом масштабе минимальному току молнии.

При испытаниях коммутационным импульсом напряжения 250/2500 мкс ток в завершающей стадии разряда не превышал 300 А. Следовательно, наиболее приемлемым масштабом линейных размеров моделируемой системы молниезащиты является  $m_e = 1/10$  натурального размера.

О влиянии значения сопротивления заземления молниеотводов и объекта молниезащиты на его поражаемость разрядом молнии. Эта проблема представляет собой не только научный, но и практический интерес. Чем меньше значение сопротивления заземлителей, тем дороже устройство молниезащиты объекта.

В полевой высоковольтной лаборатории ОАО «26 ЦНИИ» были проведены исследования по оценке влияния сопротивления заземления на вероятность поражения моделей объекта и молниеотводов при различных вариантах их заземления [13]. Результаты исследования при воздействии коммутационного импульса 250/2500 мкс положительной и отрицательной полярности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер п/п	Сопротивление заземления $R_3$ , Ом	Высота молниеотвода $h$ , м	Длина разрядного промежутка $S$ , м	Число поражений		Число разрядов в серии $n$	Вероятность поражения модели объекта
				объекта	земли/молниеотвода		
Модель объекта в виде стержня высотой 5 м							
1	$10^4$	—	15	58	42	100	0,58
2	1	—	15	60	40	100	0,6
Модель объекта размерами 4,4' 3,0' 0,35 м							
3	1	—	15	44	56	100	0,44
4	$10^4$	—	15	41	59	100	0,41
5	¥	—	15	33	67	100	0,33
6	1	—	8	36	15	51	0,7
7	1	—	8(–)*	53	2	55	0,96
Модель объекта размерами 5' 2' 0,35 м при защите двумя стержневыми молниеотводами							
7	1	2,2	11	8	25/80	113	0,17
8	$10^4$	2,2	11	2	24/38	64	0,08
9	$10^4$	2,2	8(–)*	0	1/49	50	0

\* (–) – отрицательная полярность.

Исследования показали, что изменение сопротивления заземления модели объекта без молниезащиты от 1 до  $10^4$  Ом незначительно влияет на вероятность его поражения при испытании коммутационным импульсом положительной полярности (пп.1–4 табл. 3). Изоляция модели объекта от земли на треть уменьшает вероятность поражения по отношению к заземленному объекту (п. 5 табл. 3).

При воздействии коммутационным импульсом отрицательной полярности вероятность поражения модели объекта без молниезащиты с сопротивлением заземления 1 Ом существенно увеличивается (пп. 6 и 7 табл. 3).

Испытания импульсом напряжения положительной полярности модели объекта, защищенной двумя отдельно стоящими стержневыми молниеотводами, показали, что значение сопротивления заземления отдельно стоящих молниеотводов оказывает некоторое влияние на вероятность поражения объекта (пп. 7 и 8 табл. 3). При испытании аналогичной модели импульсом напряжения отрицательной полярности поражения модели объекта не наблюдалось (п. 9 табл. 3). Это подтверждает приведенное положение о том, что обеспечить защиту объекта от воздействия отрицательной нисходящей молнии легче, чем от положительной нисходящей молнии при любом значении сопротивления заземления.

Таким образом, испытания в полевых условиях показали, что значение сопротивления заземления объекта слабо влияет на ориентировку длинной искры, а значение сопротивления заземления отдельно стоящих молниеотводов при прочих равных условиях может способствовать снижению вероятности поражения объекта молниезащиты.

**Экспериментальные исследования по определению вероятности поражения объекта при его защите стержневыми и тросовыми молниеотводами на моделях в длинных воздушных промежутках. Методика проведения исследований.** Методика проведения лабораторных исследований начиная с 1940 г. и далее [4–6] базировалась на определении зон защиты при испытаниях в воздушных промежутках различной длины для объекта и молниеотводов в форме стержней, перемещаемых относительно друг друга. Определяемые таким образом зоны защиты молниеотводов и полученные на их основе эмпирические соотношения составляли основу отечественных нормативных документов [2, 3].

Другой подход к определению зон защиты приведен в стандарте [1]. Он основан на определении угла защиты  $\alpha$ , образованного от вершины молниеотвода до наиболее удаленной точки на высоте объекта, или использовании так называемой элек-

трогеометрической модели. Следует отметить, что зоны защиты молниеотводов, определяемые по методике МЭК и по российским руководящим документам (РД), имеют, как правило, существенное различие [19].

Автором сделана попытка совместить положительный опыт отечественных нормативно-методических документов и методику МЭК, основанную на использовании защитного угла  $\alpha$ , для разработки обобщенного подхода к определению зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Задача решалась методом физического моделирования путем определения вероятности поражения моделей объектов, защищенных молниеотводами, при формировании разряда в длинном воздушном промежутке.

Целью исследований являлось проведение сравнительных испытаний схем молниезащиты для типовых объектов различных размеров (занимаемой площади) и определение угла защиты  $\alpha$  для заданного уровня надежности  $P_n$  внешней молниезащитной системы с учетом взаимного влияния друг на друга многократных стержневых и тросовых молниеотводов.

Методика проведенных в период с 2003 по 2009 гг. испытаний основана на физической модели длинной положительной искры в качестве нисходящей положительной молнии [10].

Объем исследований (десятки тысяч опытов) сравним с объемом исследований по определению зон защиты в малых (до 2 м) искровых промежутках, выполненных в ВЭИ 70 лет назад [4].

Исследования проводились на моделях объекта в виде стержня высотой  $h=1, 5$  м и моделях условного объекта размерами  $(abh_0)$ :  $1' 1' 1$  м;  $2' 2' 1$  м и  $4' 4' 1$  м. Размеры моделей соответствовали масштабу  $m=1/10$  натурального размера объекта исследования. Занимаемый моделями объем составлял не более 10, 30% длины разрядного промежутка. Ток в завершающей стадии формирования длинной искры не превышал  $I_{\min} = 300$  А [14, 15]. Модели объектов устанавливались на грунт открытой испытательной площадки. Так как более высокие результаты по вероятности поражения моделей объекта наблюдались при заземлении молниеотводов, то в дальнейшем все испытания проводились с заземлением моделей объекта и молниеотводов на заземление ГИН. Для формирования разряда в воздушном промежутке длиной  $S$  использовался положительный импульс напряжения 250/2500 мкс.

Схема исследования вероятности поражения модели объекта в зависимости от его формы, площади и параметров внешней МЗС приведена на рис. 3.

Разряд формировался между высоковольтным стержнем и поверхностью. Высоковольтный стерж-



жень подвешивался по центру модели объекта, что являлось наихудшим вариантом с точки зрения поражения модели (наиболее опасная зона при опытах с пологими импульсами в центре над объектом [6]). На рис. 4 приведена фотография серии из пяти разрядов в воздушном промежутке длиной  $S = 15$  м.

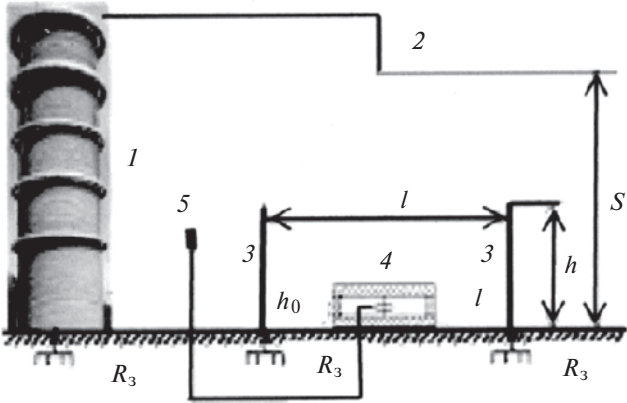


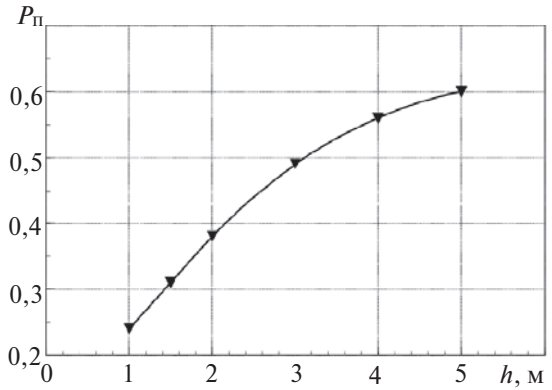
Рис. 3. Схема испытания надежности молниезащитных устройств: 1 – генератор импульсных напряжений, ГИН 6000/960; 2 – высоковольтный электрод; 3 – молниеотводы; 4 – объект защиты; 5 – датчик поражения объекта ПУМ



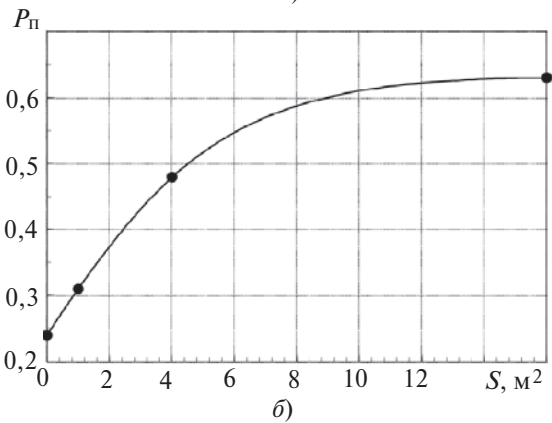
Рис. 4. Серия из пяти разрядов в воздушном промежутке длиной  $S = 15$  м при испытании защиты из двух молниеотводов высотой 3,2 м

На первом этапе исследований определялась вероятность поражения моделей объектов без молниезащиты. Результаты испытаний (в разрядном промежутке  $S = 15$  м) представлены на рис. 5. Данные по вероятности поражения объекта без защиты использовались для определения коэффициента поражаемости объекта, который использовался при обработке результатов испытаний различных схем молниезащиты [16].

На втором этапе исследовалась вероятность поражения модели объекта модели, защищенной стержневыми или тросовыми молниеотводами.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость вероятности поражения модели объекта в виде стержня от его высоты (а) и модели объекта высотой 1 м от его площади (б)

Исследования проводились в 15-метровом искровом промежутке серией из  $n = 100$  воздействий. Если из 100 воздействий прорыва к модели объекта не наблюдалось, то эффективность молниезащиты оценивалась на уровне  $P_{\text{н}}^{\text{э}} \approx 0,99$ . Если наблюдался хотя бы один прорыв в серии из 100 воздействий ( $P_{\text{п}}^{\text{э}} = 0,01$ ), то высота модели молниеприемников увеличивалась до уровня, обеспечивающего надежность  $P_{\text{н}}^{\text{э}} \approx 0,99$ . После этого определялся минимальный угол защиты  $\alpha$  между осью молниеприемника высотой  $h_{\text{м}}$  от его вершины до наиболее удаленной точки на высоте  $h_0$  объекта, обеспечивающий эффективность молниезащиты  $P_{\text{н}}^{\text{э}} \approx 0,99$ . При сравнительной оценке эффективности различных схем молниезащиты угол  $\alpha$ , обеспечивающий эффективность  $P_{\text{н}}^{\text{э}} \approx 0,99$ , принимался за базовый при проведении дальнейших исследований.

Далее испытания проводились по двум направлениям.

1. При фиксированном расстоянии от молниеотвода до модели объекта (для природы  $l = 5$  м) дискретно уменьшалась высота молниеприемника  $h_{\text{м}}$  с заданным шагом  $\Delta h_{\text{м}}$ . Соответственно увеличивался угол защиты  $\alpha$ . На каждом шаге уменьшения

высоты молниеприемника  $Dh_M$  выполнялась серия из  $n=100$  воздействий, по результатам которой определялась вероятность  $P_{\Pi}^{\exists}$  поражения модели объекта. Для исследуемой модели объекта получали зависимость  $P_{\Pi}^{\exists} = f(a, Dh)$  при фиксированном расстоянии  $l$  от молниеприемника до объекта.

2. При фиксированной высоте молниеприемника  $h_M$ , обеспечивающей эффективность молниезащиты  $P_H^{\exists} \approx 0,99$  на расстоянии  $l$ , проводилось его удаление от объекта дискретно с заданным шагом  $Dl$ . Соответственно увеличивался угол защиты  $a$ . На каждом шаге также выполнялась серия из  $n=100$  воздействий, по результатам которой определялась вероятность поражения  $P_{\Pi}^{\exists}$  модели объекта. Для исследуемой модели объекта получили зависимость  $P_{\Pi}^{\exists} = f(a, Dh)$  при фиксированной высоте молниеприемника.

Так как испытывались модели условных объектов различных геометрических размеров, то дополнительно оценивалась вероятность поражения модели объекта как функция угла защиты и площади объекта, т.е.  $P_{\Pi}^{\exists} = f(a, DS)$ .

Оценка эффективности  $P_H$  молниезащиты для испытываемой модели объекта в ограниченной серии из  $n$  воздействий проводилась следующим образом.

Предполагалось, что имеется вероятность  $P$  события, заключающегося в том, что при разряде ГИН на систему «объект–молниеприемник» объект не будет поражен разрядом.

При испытаниях проводится  $n$  разрядов ГИН и ни один разряд не поражает объект.

Требуется при заданной доверительной вероятности  $b$  построить доверительный интервал для вероятности  $P$ .

Верхняя граница интервала для искомой вероятности равна  $P_1 = 1$ , а нижняя  $P_2$  – требует расчета. В табл. 4 приведены расчетные значения  $P_2$  при различных значениях  $n$  и  $b$ .

Таблица 4

Число разрядов в серии $n$	Расчетные значения вероятности непоражения $P_2$ для разных значений доверительного интервала $b$				
	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999
10	0,7943	0,7411	0,6310	0,5887	0,5012
50	0,9550	0,9418	0,9120	0,8995	0,8710
100	0,9772	0,9705	0,9550	0,9484	0,9333
200	0,9886	0,9851	0,9772	0,9739	0,9661
400	0,9943	0,9925	0,9886	0,9868	0,9829

Полученная в результате испытаний эффективность молниезащиты  $P_H$  укладывается в границы оценки надежности в серии  $n$  воздействий в дове-

рительном интервале  $b=0,9, 0,999$ . Имея границы доверительного интервала для вероятности  $P_2$ , можно утверждать, что при проведении большого числа разрядов ГИН ( $n \gg \frac{1}{b}$ ), в  $n-b$  случаях объект не будет поражен с вероятностью, лежащей в интервале  $(P_2, P_1)=(P_2, 1)$ .

Таким образом, в результате ограниченной серии испытаний из  $n$  воздействий можно проводить сравнительную оценку вероятности непоражения объекта с различными молниезащитными устройствами в пределах  $0,9 \leq P_H \leq 0,98$ , что вполне приемлемо для сравнительной оценки надежности (эффективности) различных схем молниезащиты в доверительном интервале  $b=0,9, 0,999$ .

Для сравнительной оценки эффективности различных схем молниезащитных устройств определялся коэффициент поражаемости модели объекта в серии из  $n=100$  воздействий и при ограниченном числе серий из  $n=400$  воздействий. Определение коэффициента поражаемости модели объекта с молниезащитой проводилось расчетно-экспериментальным путем по методике [5] следующим образом:

экспериментально определялась вероятность поражения модели объекта без молниезащиты  $P_{\Pi}^0$  в серии  $n=100$  воздействий (см. рис. 5);

экспериментально определялась вероятность поражения модели  $P_{\Pi}^{\exists}$  объекта с молниезащитой при проведении  $n$  опытов;

определялся коэффициент поражаемости модели объекта  $P_{\Pi} = P_{\Pi}^{\exists} / P_{\Pi}^0$ .

Вероятность поражения незащищенного объекта  $P_{\Pi}^0$  являлась нормирующим коэффициентом для построения зависимости коэффициента поражаемости  $P_{\Pi}$  от угла защиты  $a$ . Эффективность (надежность) молниезащиты  $P_H$  в серии из  $n$  опытов определялась через коэффициент поражаемости  $P_{\Pi}$ :  $P_H = 1 - P_{\Pi}$ .

**Результаты испытаний.** Влияние формы и размера объекта на вероятность его поражения при защите молниеотводами разного вида. Экспериментальные исследования вероятности поражения объекта в виде стержня и объекта прямоугольной формы проводились по приведенной методике. Модели указанных объектов последовательно защищались отдельно стоящими стержневыми и тросовыми молниеотводами. Согласно методике устанавливался угол защиты  $a$ , для которого экспериментальным путем определялись коэффициент поражаемости  $P_{\Pi}$  модели объекта и эффективность (надежность) молниезащиты  $P_H$  в серии из  $n$  опытов. Испытания проводились по схеме, приведенной на рис. 3.

**Одиночный стержневой молниеотвод.** Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h_M$  представляет собой круговой конус радиусом  $r_0$ , образованным от его вершины к поверхности земли, или радиусом  $r_x$  — от вершины до наиболее удаленной точки на высоте объекта  $h_0$  [1–3]. Методика и результаты расчета радиуса кругового конуса в зарубежных и отечественных нормативных документах существенно отличаются друг от друга. В приведенных далее результатах исследования по определению вероятности поражения объекта зона защиты стержневых и тросовых молниеотводов определялась по углу защиты  $\alpha$ . Угол защиты является наиболее удобным критерием для проведения сравнительной оценки результатов испытаний различных схем молниезащиты.

Эюра для определения угла защиты  $\alpha$  (зоны защиты) одиночного стержневого молниеотвода приведена на рис. 6. Вид разряда в промежутке длиной 15 м при определении вероятности поражения модели объекта, защищенного одиночным стержневым молниеотводом, приведен на рис. 7.

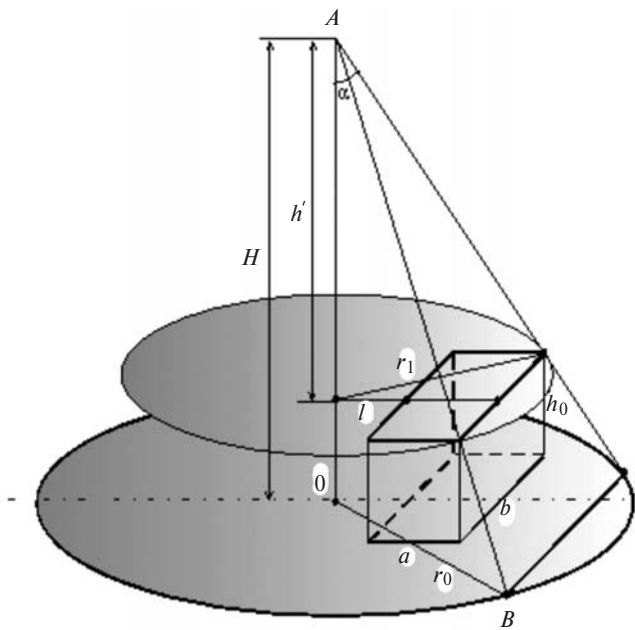


Рис. 6. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода, определяемая углом защиты  $\alpha$

Вероятность поражения моделей объекта без защиты для стержня высотой  $h_0 = 1$  м составляла  $P_0 = 0,23$ ; высотой  $h_0 = 2$  м —  $P_0 = 0,38$ , а для объекта прямоугольной формы размерами  $1'1'1$  м —  $P_0 = 0,31$ .

Согласно методике экспериментально определялась минимальная высота стержневого молниеотвода (и соответствующий ей минимальный угол защиты  $\alpha$ ), при которой поражения модели объекта в серии из  $n = 100$  воздействий не наблюдалось.



Рис. 7. Разряд в искровом промежутке  $S = 15$  м при испытании модели объекта с одиночным стержневым молниеотводом

Результаты исследования вероятности поражения моделей объектов, защищенных одиночным стержневым молниеотводом, приведены в табл. 5 [17].

Для моделей объекта с молниезащитой вероятность разряда в систему модель — молниеотвод существенно возросла. При этом вероятность разряда в землю была сравнима с вероятностью разряда в испытываемую систему (табл. 5).

Снижение высоты молниеотвода  $h_M$  (уменьшение высоты активной части молниеотвода  $h\phi$  возвышающейся над объектом высотой  $h_0$ ) приводит к увеличению угла защиты  $\alpha$  и появлению прорывов разряда на объект. При одинаковом угле защиты, например  $\alpha = 45^\circ$ , число поражений объекта в виде стержня составило 8 и 10, а объекта размерами  $1'1'1$  м — 3 (табл. 5). Соответственно надежность (эффективность) молниезащиты для стержня составила 0,66, а для прямоугольного объекта 0,9.

При равенстве высоты модели молниеотвода  $h_M$  и высоты объекта  $h_0$  (угол  $\alpha = 90^\circ$ ) число разрядов в объект в виде стержня и молниеотвод стало практически одинаковым (пп. 5, 10 табл. 5), а для объекта прямоугольной формы число разрядов в объект существенно превысило число разрядов в молниеотвод (см. п. 16 табл. 5).

Анализ результатов испытаний показал, что при одинаковом угле защиты  $\alpha$  вероятность поражения объекта  $P_{II}$  с плоской вершиной, защищенного одиночным стержневым молниеотводом, существенно меньше, чем для сосредоточенного объекта в виде стержня (металлическая опора, труба и т.п.).

Таблица 5

Номер п/п	Высота молниеотвода $h_M$ , м	Угол защиты $\alpha$ , град	Число поражений			Вероятность поражения объекта	
			объекта	земли	стержневого молниеотвода	$P_{\Pi}$	$P_{\Pi}$
Объект—стержень высотой 1 м ( $P_0=0,23$ ; $l=0,5$ м)							
1	1,8	30	0	57	43	0	1,0
2	1,7	35	2	62	36	0,086	0,914
3	1,5	45	8	60	32	0,34	0,66
4	1,25	63,4	13	64	27	0,543	0,456
5	1,0	90	19	58	23	0,82	0,18
Объект – стержень высотой 2 м ( $P_0 = 0,38$ ; $l=0,5$ м)							
6	2,8	32	0	59	41	0	1,0
7	2,65	37,5	5	52	43	0,13	0,87
8	2,5	45	10	59	31	0,26	0,74
9	2,25	63,3	16	56	28	0,42	0,58
10	2,0	90	24	53	23	0,63	0,37
Объект размерами 1' 1' 1 м ( $P_0 = 0,31$ ; $l=0,5$ м)							
11	3,5	32	0	47	53	0	1,0
12	3,0	38,3	1	40	59	0,032	0,968
13	2,5	46,5	3	54	43	0,096	0,90
14	2,0	58	7	61	32	0,225	0,775
15	1,5	72,4	13	60	27	0,42	0,58
16	1,0	90,0	26	68	6	0,84	0,16

Примечание:  $P_0$  – вероятность поражения незащищенного объекта.

Из представленных в табл. 5 результатов исследований видно, что форма объекта оказывает существенное влияние на вероятность его поражения. Полученные результаты показали логическую обоснованность предложенной схемы испытаний по определению вероятности поражения модели объекта, защищенного стержневым молниеотводом с использованием угла защиты  $\alpha$ .

*Двойной стержневой молниеотвод.* При защите объекта двумя и более стержневыми молниеотводами зона защиты между ними ( $a$  следовательно, и угол  $\alpha$ ) увеличивается по сравнению с зоной защиты двух одиночных стержневых молниеотводов. Расширение зоны защиты происходит за счет взаимного влияния молниеотводов. Степень взаимного влияния зависит от числа молниеотводов и расстояния между ними. Например, для I уровня защиты, по методике, приведенной в [2], взаимное влияние сохраняется на расстоянии, равном четырех–пятикратной высоте молниеотводов, а по методике, приведенной в [1], – на расстоянии не более двойной высоты. На большем расстоянии многократные молниеотводы рассматриваются как совокупность одиночных стержневых молниеотводов.

Значительное расхождение в размере зоны защиты, образованной двумя стержневыми молниеотводами, при их определении по различным методикам привело к необходимости экспериментального обоснования значения угла (зоны) защиты, при котором взаимное влияние молниеотводов сохраняется [17].

Эпюра для определения угла защиты  $\alpha$  (зоны защиты) двух стержневых молниеотводов, установленных на одинаковом расстоянии  $l$  от объекта, приведена на рис. 8.

Экспериментальные исследования проводились на моделях объектов в форме стержня и в форме квадрата ( $a=b$ ). Вероятность поражения  $P_0$  исследуемых моделей объекта без защиты составляла 0,38 для стержня высотой  $h_0=2$  м и 0,31; 0,48 и 0,63 для объектов размером 1' 1' 1 м, 2' 2' 1 м, 4' 4' 1 м соответственно.

Результаты исследования вероятности поражения моделей объектов, защищенных двумя стержневыми молниеотводами при высоте подвеса электрода  $S=15$  м, приведены в табл. 6. Фотография разряда в промежутке длиной 15 м при определении вероятности поражения модели объекта, защи-



щенной двумя стержневыми молниеотводами, приведена на рис. 9.

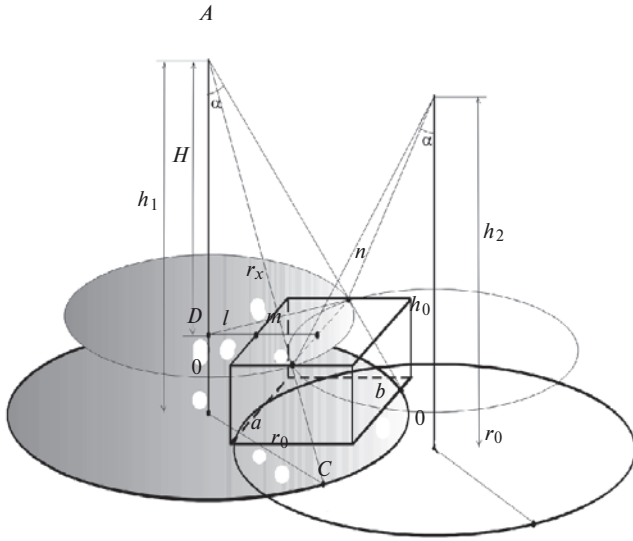


Рис. 8. Зона защиты двух стержневых молниеотводов для прямоугольного объекта размерами  $a \times b \times h_0$ , определяемая по углу защиты  $\alpha$



Рис. 9. Серия из пяти разрядов при испытании модели объекта с двумя стержневыми молниеотводами

Сравнивая результаты испытаний, приведенные в табл. 5 и 6, можно отметить, что угол защиты  $\alpha$ , при котором не происходит прорыва разряда на модель объекта, увеличился с  $30^\circ\text{--}32^\circ$  для одиночного стержневого молниеотвода до  $40^\circ\text{--}45^\circ$  для двойного стержневого молниеотвода. При этом расстояние между двумя стержневыми молниеотводами не превышало высоты активной части молниеотводов, возвышающейся над объектом,  $L = (1,3\text{--}1,8)h\phi$

С увеличением площади защищаемого объекта возрастает вероятность его поражения, и для достижения требуемой надежности молниезащиты необходимо уменьшать расстояние между молниеотводами  $L$ , при котором не происходит прорыва разряда на объект.

Анализ результатов исследований показал, что для одинакового угла защиты  $\alpha = 45^\circ$  число разря-

дов в модель объекта в виде стержня высотой 2 м при защите одиночным стержневым молниеотводом на порядок выше, чем при защите двумя стержневыми молниеотводами (см. табл. 5 и 6).

В процессе испытаний наблюдалось некоторое число разрядов, которые завершались не на вершине модели стержневого молниеотвода, а значительно ниже (рис. 9). Однако это не влияло на численное значение вероятности поражения модели объекта при заданном угле защиты  $\alpha$ . Наибольшее число разрядов ниже вершины наблюдалось у моделей молниеотводов, высота которых соответствовала натуральным молниеотводам высотой 40–50 м.

Анализируя результаты испытаний, приведенные в табл. 6, следует отметить, что при одинаковом угле защиты  $\alpha = 45^\circ$  двух стержневых молниеотводов относительно наиболее удаленной точки объекта на его высоте  $h_0$  изменение формы объекта со стержня на квадрат размерами  $1' \times 1' \text{ м}$  уменьшает вероятность его поражения (пп.1 и 6 табл. 6). В то же время увеличение площади объекта при одинаковом угле защиты  $\alpha$  и одинаковой высоте объекта  $h_0$  приводит к увеличению вероятности его поражения (пп. 6, 12 и 18 табл. 6).

С увеличением угла защиты  $\alpha$  за счет снижения высоты активной части молниеотводов  $h\phi$  вероятность поражения модели объекта возрастает, а надежность молниезащиты снижается с  $P_H = 1$  до минимального значения. Результаты испытаний представлены на рис. 10.

Полученные результаты коррелируются с данными по определению зоны защиты, образованной двумя стержневыми молниеотводами, для модели объекта в форме стержня, полученными в длинном воздушном промежутке [5].

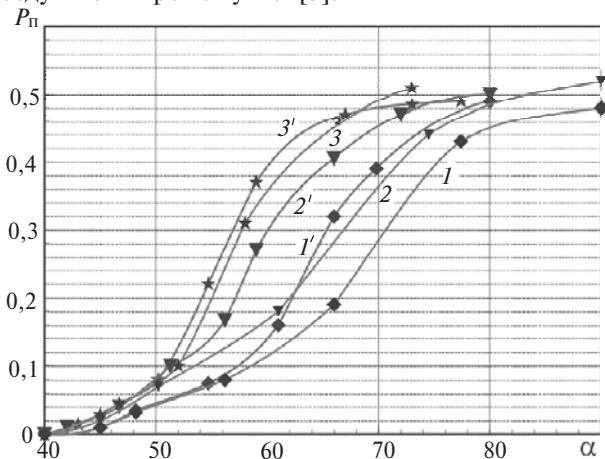


Рис. 10. Зависимость вероятности поражения моделей объекта различной площади, защищенных двумя стержневыми молниеотводами, от значения угла защиты  $\alpha$ : изменение  $\alpha$  за счет снижения высоты молниеотводов на  $Dh_0$  при  $l = 0,5 \text{ м}$ : 1 – модель объекта  $1' \times 1' \text{ м}$ ; 2 –  $2' \times 2' \text{ м}$ ; 3 –  $4' \times 4' \text{ м}$ ; изменение  $\alpha$  за счет увеличения расстояния от стержневых молниеотводов до объекта на  $Dl$ : 1 $\phi$  – модель объекта  $1' \times 1' \text{ м}$  ( $h_1 = h_2 = 2,12 \text{ м}$ ); 2 $\phi$  –  $2' \times 2' \text{ м}$ , ( $h_1 = h_2 = 3,15 \text{ м}$ ); 3 $\phi$  –  $4' \times 4' \text{ м}$  ( $h_1 = h_2 = 4,82 \text{ м}$ )

Таблица 6

Номер п/п	Высота молниеотводов $h_M$ , м	Угол защиты $\alpha$ , град	Число поражений				Вероятность поражения модели объекта	
			объекта	земли	молниеотводов высотой $h_M$		$P_{II}$	$P_H$
					$M1$	$M2$		
Объект – стержень высотой $h_0=2$ м, $P_0=0,38$								
1	3,0	45	1	57	21	21	0,026	0,974
2	2,8	51,3	3	51	22	24	0,079	0,92
3	2,6	59	6	53	21	20	0,16	0,84
4	2,3	73	11	50	20	19	0,30	0,70
5	2,0	90	15	52	16	17	0,40	0,60
Объект размером 1' 1' 1 м, $P_0 = 0,31$								
6	2,12	45	0	48	27	25	0	1
7	2,0	48,2	1	58	20	21	0,032	0,97
8	1,75	56,2	3	58	19	20	0,097	0,90
9	1,5	66	6	63	15	16	0,19	0,81
10	1,25	77,4	13	61	14	12	0,42	0,58
Объект размером 2' 2' 1 м, $P_0 = 0,48$								
11	3,15	40	0	48	22	22	0	1
12	2,8	45	1	56	24	19	0,021	0,98
13	2,5	50,2	4	58	15	16	0,09	0,91
14	2,0	61	8	71	12	9	0,17	0,83
15	1,5	74,5	21	46	16	17	0,44	0,56
16	1,0	90	25	51	8	16	0,52	0,48
Объект размером 4' 4' 1 м, $P_0 = 0,63$								
17	4,82	40	0	40	31	29	0	1
18	4,2	45	2	47	25	26	0,032	0,97
19	4,0	46,86	3	29	34	34	0,048	0,95
20	3,5	52,05	7	37	26	30	0,11	0,89
21	3,0	58	21	32	23	24	0,33	0,67
22	2,0	72,65	32	32	18	18	0,51	0,49

Увеличение угла защиты  $\alpha$  может происходить не только за счет снижения высоты активной части молниеотводов над защищаемым объектом, но и за счет увеличения расстояния одинаковых по высоте молниеотводов до защищаемого объекта  $l$  (см. рис. 10).

Сравнивая графические зависимости, приведенные на рис. 10, следует отметить, что при одинаковом угле защиты  $\alpha$  вероятность поражения модели возрастает в случае увеличения расстояния  $l$  от молниеотводов до защищаемого объекта. Это, очевидно, можно объяснить тем, что с увеличением расстояния  $l$  объект находится ближе к внешней границе зоны защиты и вероятность его поражения увеличивается.

О влиянии высоты активной части стержневых молниеотводов на надежность молниезащиты объек-

тов различной формы и площади. Приведенные результаты исследований позволили сделать вывод о влиянии высоты активной части стержневых молниеотводов  $h_{\phi}$  на надежность молниезащиты объектов. Анализ результатов испытаний (табл. 5) показал, что снижение активной части одиночного стержневого молниеотвода  $h_{\phi}$  по отношению к высоте защищаемого объекта  $h_0$  приводит к увеличению поражаемости объекта  $P_{II}$ . Так, увеличение угла защиты от  $32^\circ$  (при  $h_{\phi} = 2,5$  м) до  $72,4^\circ$  ( $h_{\phi} = 0,5$  м) для модели объекта размером 1' 1' 1 м с одним стержневым молниеотводом приводит к снижению надежности защиты с 1,0 до 0,58.

Снижение высоты активной части  $h_{\phi}$  двойных стержневых молниеотводов, возвышающихся над защищаемым объектом, также приводит к существенному уменьшению надежности молниезащиты (табл. 6). Например, для модели объекта размером

1'1'1 м снижение активной части молниеотводов с  $h_{\phi} = 1,12$  м ( $\alpha = 45^\circ$ ) до  $h_{\phi} = 0,25$  м ( $\alpha = 77,4^\circ$ ) приводит к снижению надежности защиты с 1,0 до 0,58.

Полученные результаты не согласуются с положением [1] о том, что при уменьшении высоты активной части молниеотвода, например с 20 до 2 м (изменение угла защиты  $\alpha$  от 23 до 70°), уровень защиты сохраняется [19].

Следует также отметить, что при значительном превышении высоты активной части  $h_{\phi}$  стержневых молниеотводов над объектом по сравнению с ограничениями, введенными требованиями [1] (например, 20 м для I уровня защиты), уровень надежности молниезащиты сохраняется.

*О влиянии формы объекта на значение угла защиты.* Приведенные в табл. 6 результаты исследований вероятности поражения модели, защищенной двумя стержневыми молниеотводами, получены для объектов в форме квадрата (при  $a = b$ ). Изменение формы объекта ( $a \neq b$ ) можно характеризовать значением угла  $\beta$  (рис. 11). Угол  $\beta$  образован между осью, соединяющей молниеотводы, и радиусом защиты  $r_x$  от каждого из молниеотводов до наиболее удаленной точки  $n$  по оси симметрии на высоте объекта  $h_0$ .

На рис. 12 приведены полученные экспериментально графические зависимости изменения угла защиты  $\alpha$  от угла  $\beta$  ( $40^\circ > \beta > 0$ ) в случае защиты модели объекта двумя стержневыми молниеотводами. При  $\beta = 0$  объект высотой  $h_0$  представляет собой линию и угол защиты  $\alpha$  имеет максимальное значение (для I уровня защиты при  $\beta = 0$  угол защиты – 55°, а при  $a = b$  – 40°).

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 12, показал, что углы защиты  $\alpha$  и  $\beta$ , могут быть использованы для расчета высоты молниеотводов у объекта любой формы. При этом активная часть молниеотводов, возвышающихся над объектом, определяется по формуле:  $h_{\phi} = (a + 2l) / 2 \operatorname{tg} \alpha \cos \beta$ , а высота каждого из двух стержневых молниеотводов одинакова и равна:  $h_M = h_{\phi} + h_0$ .

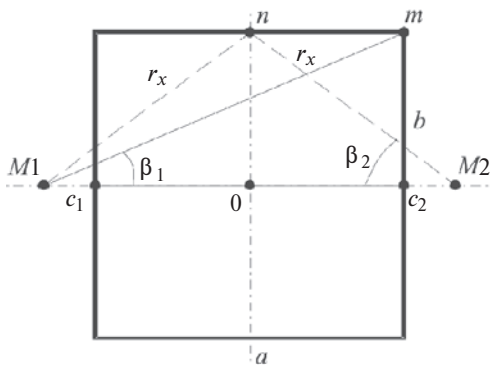


Рис. 11. Определение угла  $\beta_1$  одиночного ( $M1$ ) и угла  $\beta_2$  двойного ( $M1, M2$ ) молниеотводов на высоте объекта  $h_0$

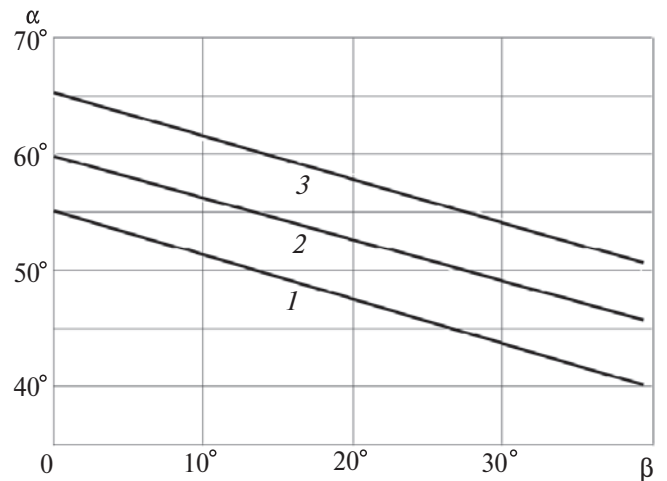


Рис. 12. Зависимость угла  $\alpha$  от угла  $\beta$  при защите двумя стержневыми молниеотводами: 1 – для  $P_n = 0,99$ ; 2 – 0,95; 3 – 0,9

Аналогичным образом с использованием угла защиты  $\alpha$  и угла  $\beta$  может быть определена высота и расстановка многократных стержневых молниеотводов (четырёх-, шести- и т.д.). При условии, что расстояние между крайней парой стержневых молниеотводов определяется по углу защиты как для двойных стержневых молниеотводов одинаковой высоты, а расстояние между каждой парой стержневых молниеотводов определяется через угол  $\beta$ , образованный к центру симметрии внутреннего объема при условии, что угол  $\beta$  изменяется в пределах от 0 до 45°.

*Одиночный и двойной тросовые молниеотводы.* Экспериментальные исследования по определению вероятности поражения модели объекта прямоугольной формы, защищенной одиночным или двойным тросовыми молниеотводами, проводилась также при последовательном изменении угла защиты  $\alpha$ . Эпюра для определения угла защиты  $\alpha$  (зоны защиты) одиночного и двойного тросовых молниеотводов приведена на рис. 13.

На рис. 14 приведены результаты исследования эффективности одиночного троса в зависимости от угла защиты  $\alpha_1$  для объекта прямоугольной формы.

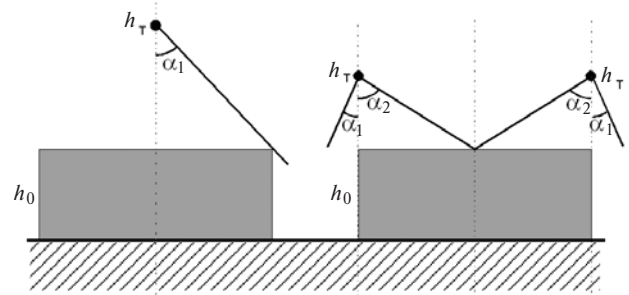
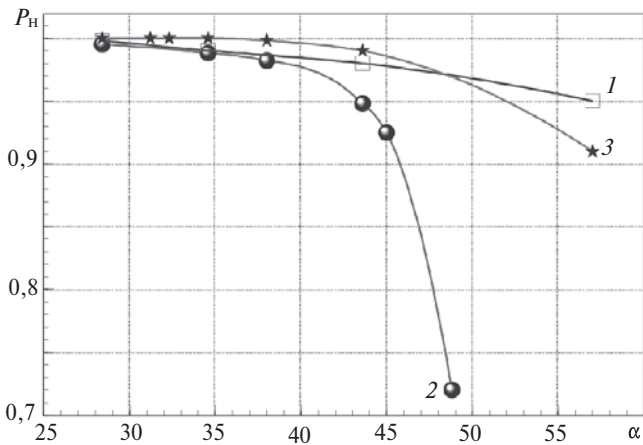


Рис. 13. Эпюра для определения углов защиты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  одиночного и двойного тросовых молниеотводов



**Рис. 14.** Зависимость эффективности  $P_n$  защиты одиночным тросом от угла защиты  $\alpha$ : 1 – модель объекта размером 5,0' 2,0' 0,35 м; 2 – размером 4' 4' 1 м; 3 – размером 50' 20' 3,5 м (по методике [7])

Анализируя результаты исследований, можно заключить, что применение одиночного троса наиболее целесообразно для объектов вытянутой формы, у которых длина существенно больше ширины.

Намного эффективнее для целей молниезащиты применение двойного тросового молниеотвода. В табл. 7 приведены результаты исследований по определению внутреннего угла защиты двойного тросового молниеотвода для модели объекта размером 4' 4' 1 м ( $P_0 = 0,63$ ) при различной высоте подвеса троса над моделью согласно эпюре на рис. 13.

Анализируя результаты исследований, приведенные в табл. 7, можно отметить, что при небольшой высоте подвеса двух тросов ( $h_T = 0,73$  м,  $\alpha_2 = 70^\circ$ ) достигается высокая надежность защиты модели объекта двойным тросовым молниеотводом. Поражаемость модели объекта наблюдалась при внутреннем угле защиты  $70^\circ$  и более, что намного больше этого показателя у двойного стержневого молниеотвода.

*Обобщение результатов экспериментальных исследований.* Экспериментальные данные по вероятности поражения модели объекта с различными типами молниезащиты, приведенные в табл. 5–7, хорошо согласуются между собой и с поражаемо-

стью незащищенного объекта в длинном воздушном промежутке. Это дает основание использовать результаты исследований вероятности поражения модели объекта в зависимости от значения угла защиты  $\alpha$  для разработки методики расчета зон защиты зданий и сооружений с требуемой надежностью при воздействии прямого удара молнии.

В обобщенном виде результаты исследований, приведенные в табл. 5–7, систематизированы в табл. 8. Результаты исследований соотнесены с тремя уровнями защиты, каждый из которых характеризуется заданной надежностью молниезащиты (вероятностью непоражения объекта). В табл. 8 приведены также размеры рекомендуемой площади объекта, которую целесообразно защищать стержневыми или тросовыми молниеотводами [18].

Как видно из табл. 8, максимальный угол защиты обеспечивает двойной тросовый молниеотвод, несколько ниже угол защиты у четырех стержневых молниеотводов и заметно ниже у двойного и одиночного стержневых молниеотводов.

Представленные в табл. 8 результаты получены для объектов различной площади в форме квадрата ( $a = b$ ) высотой до 20 м при минимальном значении тока молнии  $I_{min}$  (оценки эффективности молниезащиты снизу). Для объектов высотой менее 20 м и при больших токах молнии, эффективность перехвата разряда молнии будет значительно выше, что обеспечивает более высокую эффективность молниезащиты объекта в целом. Для объектов прямоугольной формы ( $a \neq b$ ), защищенных двумя стержневыми молниеотводами, надежность молниезащиты возрастает с уменьшением угла  $b$  (см. рис. 11), а значение угла защиты  $\alpha$  для одного и того же уровня защиты должно быть пересчитано с учетом значения угла  $b$  в соответствии с рис. 12.

*Определение угла защиты стержневых молниеотводов, устанавливаемых непосредственно на зданиях и сооружениях.* Ранее приведены результаты крупномасштабных испытаний по определению угла защиты отдельно стоящих стержневых молниеотводов. Возникает вопрос, изменяются ли значения угла защиты, соответствующие определенному

Таблица 7

Номер п/п	Высота подвеса троса $h_T$ , м	Внутренний угол защиты $\alpha_2$ , град	Число поражений				Вероятность поражения модели объекта	
			объекта	земли	тросов		$P_{II}$	$P_n$
					$T_1$	$T_2$		
1	1,4	55	0	12	45	43	0	1
2	1,15	60	0	14	42	44	0	1
3	0,73	70	1	13	47	39	0,016	0,984
4	0,54	75	3	16	40	41	0,048	0,95
5	0,35	78	8	19	38	35	0,13	0,87



Таблица 8

Уровень защиты	Значение заданной надежности $P_H$	Угол защиты $\alpha$ (град), обеспечивающий заданную надежность							
		внешний		внутренний				внешний	внутренний
		Молниезащита объекта в виде							
		стержня						троса	
		одного		двух		четырёх		одиночного	двойного
		С площадью объекта в плане, $m^2$ (не более)							
		0,5	100	100	400	2000	2500	2000	2500
I	0,99	25	30	45	42	40	53	32	68
II	0,95	32	38	50	48	46	60	57	75
III	0,9	35	46	56	54	52	70	70	78

Таблица 9

Номер п/п	Высота стержневых молниеотводов $h_1-h_4$ , м	Угол защиты, $a_1/a_2$ , град	Расстояние $l$ ,** м	Число разрядов в серии $n$	Число поражений						Вероятность поражения модели	
					объекта	земли	молниеприемника					
							$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$		
Одиночный стержневой молниеотвод												
1	3,0	43,3	2,83	100	17	40	43	-	-	-	0,27	0,73
2	3,65	37,8	2,83	100	9	34	57	-	-	-	0,143	0,86
3	4,5	32,2	2,83	100	4	32	64	-	-	-	0,063	0,94
4	4,8	30,5	2,83	100	1	29	70	-	-	-	0,016	0,984
Четыре стержневых молниеотвода												
5	1,0	45/61	1,0	163	18	58	21	22	21	23	0,175	0,82
6	1,5	33,6/50,6	1,0	100	4	29	17	15	18	17	0,063	0,94
7	1,72	30,2/46,2	1,0	100	0	32	17	18	16	17	0	1

\*  $a_1$  - угол защиты одиночного стержневого молниеотвода;  $a_2$  - внутренний угол защиты для четырех стержневых молниеотводов ( $h_1=h_2=h_3=h_4$ ), определяемый от вершины каждого из четырех стержневых молниеотводов до центра модели объекта, образованного пересечением линий, соединяющих молниеотводы по диагонали.

\*\* Расстояние от молниеотвода до более удаленной точки верхнего периметра модели сооружения.

уровню надежности внешней МЗС, при установке молниеотводов непосредственно на здании (сооружении).

Для проверки этого положения были проведены экспериментальные исследования по определению угла защиты одиночного стержневого и четырех стержневых молниеотводов, установленных на модели объекта размером 4' 4' 1 м [20]. Методика проведения исследований была аналогичной ранее приведенной. Модель сооружения представляла собой металлический каркас из арматурной сетки, на верхнюю плоскость которого устанавливались последовательно модель одного или четырех стержневых молниеотводов. Схема испытаний аналогична приведенной на рис. 3.

В табл. 9 приведены результаты испытаний по определению угла защиты для различных схем раз-

мещения внешней МЗС на верхней плоскости модели объекта ( $P_0 = 0,63$ ). Испытания модели объекта, защищенной одиночным стержневым молниеотводом, установленным на его верхней плоскости, показали, что значение угла защиты  $a_1$ , определенное относительно наиболее удаленной точки на верхней плоскости модели сооружения, совпадает со значениями, полученными для отдельно стоящих молниеотводов при одинаковом значении надежности молниезащиты  $P_H$ . Аналогичные результаты получены и для четырех стержневых молниеотводов, установленных непосредственно на модели сооружения.

Характерными точками поражения верхней плоскости модели сооружения являются точки, показанные на рис. 15. Цифрами на рис. 15, обозначены номера в серии из  $n$  опытов и точки поражения верхней плоскости модели объекта.

При защите модели объекта одиночным стержневым молниеотводом (см. рис. 15,а), высота которого обеспечивает надежность молниезащиты на уровне  $P_H = 0,94$  ( $\alpha_1 = 32,2^\circ$ ) и  $P_H = 0,98$  ( $\alpha_1 = 30,5^\circ$ ) с различной частотой поражаются углы внешнего периметра модели.

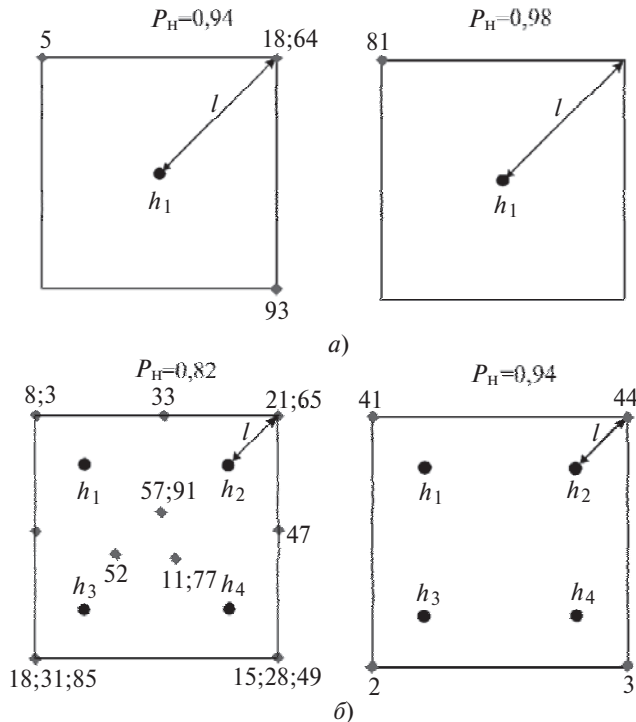


Рис. 15. Точки поражения (♦) модели объекта размером 4' 4' 1 м при защите: а – одиночным стержневым молниеотводом; б – четырьмя стержневыми молниеотводами

При защите модели объекта четырьмя стержневыми молниеотводами (см. рис. 15,б), высота которых обеспечивает эффективность молниезащиты на уровне  $P_H=0,84$ , поражаются углы и средняя часть защищаемой модели сооружения, а при  $P_H=0,94$  поражаются только углы внешнего периметра сооружения (см. рис. 15,б).

Результаты испытаний показали, что при определении параметров внешней МЗС, устанавливаемой непосредственно на здании (сооружении), можно пользоваться данными, полученными для отдельно стоящих молниеотводов при условии, что углы защиты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для стержневых молниеотводов высотой  $h$ , установленных непосредственно на здании, определяются относительно его верхней плоскости.

При защите боковых поверхностей здания или находящихся рядом с ним объектов угол защиты  $\alpha_1$  определяется относительно поверхности земли с учетом высоты здания  $h_0$  и установленного на нем стержневого молниеприемника высотой  $h$ :  $h_M = h_0 + h$ .

**Выводы.** 1. Процесс развития молнии в лабораторных условиях можно смоделировать в промежутках длиной 10–20 м при импульсах положительной полярности 250/2500 мкс. В этом случае особенности формирования разряда обеспечивают случайный (вероятностный) характер развития канала вплоть до момента ориентировки нисходящего лидера на заземленные объекты и низкую разрядную напряженность промежутка (176 кВ/м для промежутка длиной 15 м). Среднестатистическое время формирования разряда в воздушном промежутке длиной 15 м составляет  $t_p \approx 620\text{--}700$  мкс, а завершение разряда происходит практически на максимуме амплитуды приложенного напряжения.

2. Значение сопротивления заземления объекта молниезащиты и молниеотводов слабо влияет на ориентировку длинной искры и, соответственно, на вероятность перехвата разряда молнии молниезащитной системой.

3. Вероятность поражения объекта, защищенного отдельно стоящими стержневыми и тросовыми молниеотводами, зависит от формы и размеров объекта и типа установленной молниезащитной системы. Определение зоны защиты отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов целесообразно проводить по углу защиты  $\alpha$ , полученному по результатам крупномасштабных испытаний с учетом взаимного влияния многократных стержневых и тросовых молниеотводов.

4. Угол защиты (внутренний) многократных стержневых и тросовых молниеотводов больше, чем одиночного стержневого или тросового молниеотвода при одном и том же заданном значении надежности (эффективности) перехвата разряда молнии. Однако степень взаимного влияния двух стержневых молниеотводов, а следовательно и зона их защиты, определенная методиками [2 и 3], существенно больше их значений, полученных в результате экспериментальных исследований.

5. Экспериментально определенные углы защиты  $\alpha$  отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов, обеспечивающие надежность молниезащиты объекта в пределах  $P_H=0,5, 0,99$ , могут быть использованы при разработке методики расчета параметров многократных стержневых и тросовых молниеотводов для различных уровней защиты.

6. Результаты испытаний показали, что угол защиты  $\alpha$  не зависит от места установки молниеотводов (отдельно стоящих или непосредственно на сооружении), а определяется размерами защищаемого объекта, высотой молниеотводов и заданной надежностью внешней МЗС. Поэтому при определении параметров внешней МЗС, устанавливаемой

непосредственно на здании (сооружении), можно пользоваться данными по углу защиты  $\alpha$ , полученными для отдельно стоящих молниеотводов. При этом внешний и внутренний углы защиты  $\alpha_1 / \alpha_2$  для стержневых молниеотводов высотой  $h$ , установленных непосредственно на здании, определяются относительно его верхней плоскости.

5. Данные по значению угла защиты, приведенные в стандарте [1] для разных уровней защиты, имеют существенное расхождение с результатами экспериментальных исследований. Проектирование молниезащитной системы по методике, предложенной МЭК, в которой для определения угла защиты  $\alpha$  используется формальный подход, может привести в результате к существенному снижению надежности защиты от разрядов молнии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МЭК 62305. Стандарт по молниезащите, ч.1–5.
2. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (Минэнерго СССР). – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. СО 153-343.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: МЭИ, 2004.
4. Акопян А.А. Исследование защитного действия молниеотводов. – Труды ВЭИ, 1940, вып. 36.
5. Александров Г.Н. и др. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, № 3.
6. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Базелян Э.М., Садыхова Е.А. Об ориентировке канала длинной искры. – Электричество, 1973, №3.
7. Базелян Э.М. и др. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.
8. Александров Г.Н., Кадзов Г.Д. О повышении эффективности молниезащиты. – Электричество, 1987, № 2.
9. Базелян Э.М. Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов. – Электричество, 1967, № 7.
10. Куприенко В.М. К вопросу об исследовании эффективности молниезащиты сооружений на моделях в длинных искровых промежутках. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007.
11. Гайворонский А.С., Овсянников А.Г. Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007.
12. Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения/Пер. с нем. под ред. В.П. Ларионова. – М: Энергоатомиздат, 1989.
13. Kouprienko V. A Study of Conventional Protector Stability to Direct Lightning Strikes. – Book of Abstracts. Magdeburg (Deutschland), 2004.
14. Кадзов Г.Д., Куприенко В.М. К вопросу об оценке эффективности отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов по величине угла защиты. – Тр. СПбГТУ «Электроэнергетическое оборудование: надежность и безопасность». – СПб, 2006, № 501.
15. Куприенко В.М. Методика и результаты испытаний по определению угла защиты для отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов. – Вестник Национального технического университета «ХПИ», 2006, № 17.
16. Куприенко В.М., Кадзов Г.Д. Исследование эффективности отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов по углу защиты. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007.
17. Куприенко В.М., Григорьев А.А., Деметриадес Г.И., Кадзов Г.Д. Результаты крупномасштабных исследований поражаемости зданий и сооружений при их защите многократными стержневыми и тросовыми молниеотводами. – Доклад на второй Российской конф. по молниезащите.– М. (ОАО «ЭНИН им. А.В. Кржижановского»), 22–24 сентября 2010.
18. Куприенко В.М. К вопросу о нормировании молниезащиты объектов военной инфраструктуры. – Доклад на второй Российской конф. по молниезащите.– М. (ОАО «ЭНИН им. А.В. Кржижановского»), 22–24 сентября 2010.
19. Куприенко В.М. Анализ методик расчета и выбора параметров молниезащиты зданий и сооружений. – Доклад на второй Российской конф. по молниезащите.– М. (ОАО «ЭНИН им. А.В. Кржижановского»), 22–24 сентября 2010.
20. Куприенко В.М., Кадзов Г.Д. Определение угла защиты стержневых молниеотводов, устанавливаемых непосредственно на зданиях и сооружениях. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007.

[17.04.12]

*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» (Санкт-Петербург). Начальник отдела филиала ОАО «26ЦНИИ».*