

А.Г.ТЕМНИКОВ, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Л.Л.ЧЕРНЕНСКИЙ, ст. преп., Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

А.В.ОРЛОВ, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Т.К.ГЕРАСТЕНКО, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

О.В.БЕЛОВА, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА МОДЕЛЯХ

Представлено результати експериментальних досліджень і фізичного моделювання процесів ураження блискавкою зосереджених об'єктів і дослідження ефективності їх блискавкозахисту з використанням штучних заряджених аерозольних хмар. Проаналізовано вплив характеристик моделей стрижневих блискавководвідводів та об'єктів на процес їх ураження розрядом із хмари зарядженого водного аерозолю. Виконано порівняння експериментальних результатів з розрахунковими та експериментальними методиками визначення блискавкозахисту зосереджених об'єктів. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення блискавкозахисту енергетичних об'єктів.

Results of the experimental investigations and physical simulation of the processes of lightning affection of the compacted objects and the investigation of its lightning protection effectiveness using artificial charged aerosol clouds are presented. Influence of the characteristics of lightning rod and object models on the process of their affection by the discharge from cloud of charged water aerosol has been analyzed. Comparison of the experimental results with the calculated and experimental methods of determination of the compacted object lightning protection has been fulfilled. Recommendations on the improvement of power object lightning protection have been proposed.

Представлены результаты экспериментальных исследований и физического моделирования процессов поражения молнией сосредоточенных объектов и исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аерозольных туч. Проанализировано влияние характеристик моделей стержневых молниеотводов и объектов на процесс их поражения разрядом из тучи заряженного водного аерозоля. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты сосредоточенных объектов. Предложены рекомендации относительно совершенствования молниезащиты энергетических объектов.

Введение

Использование экспериментальных методов для исследования физики молнии и молниезащиты являлось и является актуальным [1, 2], так как без них невозможно детально проверить и проанализировать возможную эффективность действующих и перспективных средств защиты от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий.

Современные расчетные методики определения молниезащищенности энергетических объектов, которые оценивают вероятность поражения их молнией и базируются на нахождении зон защиты молниеотводов, в качестве одного из главных факторов используют возможность возникновения встречных лидеров с объектов. Проверка этих методик многолетними наблюдениями за процессами поражения объектов разрядами молнии в естественных условиях мало эффективны из-за ограниченности и неоднозначности собранного материала, малой статистической выборки и дороговизны.

Базирующиеся на таком подходе существующие нормативные методики расчета и определения молниезащищенности различных объектов [3-6] часто расходятся в своих оценках на порядок величины и более. Это связано с тем, что до сих пор нет четкого и однозначного представления о процессе формирования молнии и поражению ею наземных объектов. Выявлению физической картины формирования восходящего лидерного разряда с наземного объекта и построению на ее основе физико-математической модели все последние десятилетия уделяется много внимания [1, 2, 7]. Однако целостной общепринятой модели этого процесса пока не создано.

Учет всех физических факторов, сопутствующих процессу поражения нисходящим отрицательным лидером молнии наземных объектов также не является решенной полностью проблемой, так как это требует построения сложной модели поражения наземных объектов молнией. В большинстве случаев просто упрощают задачу в стандартах и инженерных методиках (например, [8]), что ведет не только к существенным погрешностям при оценке, но и к физически мало обоснованным результатам. Определение условий и тенденций того, как и какие характеристики самого объекта влияют на вероятность поражения его разрядом молнии, в настоящее время является одним из основных направлений в области физики молнии и молниезащиты [8, 9]. В результате, проблема совершенствования действующих стандартов по молниезащите и методик расчета молниепоражаемости наземных объектов остается актуальной [10].

Поэтому не потеряли своей актуальности и развиваются методы физического моделирования разрядов молнии, особенно для решения проблем молниезащиты объектов [1, 2, 11].

Среди методов выделяется моделирование на макетах объектов с использованием длинной отрицательной искры в качестве аналога лидера молнии и имитация восходящих встречных разрядов с объектов [12]. Но в методах экспериментального моделирования поражения разрядом молнии моделей объектов с использованием генераторов импульсных напряжений условия эксперимента все-таки достаточно далеки от реальной грозовой обстановки, в которой всегда присутствует сильное электрическое поле самого грозового облака и своеобразно меняющееся поле отрицательного нисходящего ступенчатого лидера молнии. Кроме этого, многие нюансы процесса поражения

молнией реальных объектов (например, конкурентное развитие восходящих лидерных разрядов, коронирование элементов конструкции объектов и взаимное влияние этого процесса на заряженное облако для высоких объектов и др.) в них практически не моделируются.

Одним из направлений при экспериментальном определении вероятности поражения объектов разрядом молнии может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков. Существующие методы создания искусственных заряженных аэрозольных облаков позволяют создавать облака объемом до десяти кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Использование искусственных заряженных аэрозольных облаков открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией, существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке без нанесения повреждений реальным объектам, дает возможность получить достаточный для анализа статистический материал.

Это открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией. Во-первых, это существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке. Во-вторых, такой подход может значительно упростить экспериментальное моделирование процесса поражения молнией наземных объектов и даст возможность получать достаточный для анализа статистический материал, повысить надежность и безопасность эксплуатации существующих и проектируемых энергетических объектов путем выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию их молниезащиты.

1 Экспериментально-измерительный комплекс для исследования процессов поражения молнией моделей объектов и эффективности их молниезащиты

Экспериментальный комплекс состоит из аэрозольной камеры размером объемом около 500 кубических метров, генератора заряженного аэрозоля (ГЗА), исследуемой электродной системы и измерительного комплекса. Ось струи заряженного аэрозоля находилась под углом α по отношению к горизонтальной поверхности нижнего заземленного электростатического экрана. Угол наклона оси заряженной аэрозольной струи по отношению к горизонтальной заземленной плоскости мог варьироваться в диапазоне от 0 градусов до 30 градусов. В ходе экспериментальных исследований использовался угол 12 градусов, для того чтобы нижняя кромка турбулентной струи была параллельна горизонтальной заземленной плоскости. В этом случае под облаком заряженного аэрозоля создается максимальная площадь области, где обеспечивается квазиоднородный характер распределения электрического поля. Ос-

новые параметры экспериментального комплекса представлены в [13, 14].

Создаваемое аэрозольное облако имеет объем несколько кубических метров. Ток выноса при экспериментах составлял 120 мкА. При этом, объемная плотность аэрозольного заряда на оси облака находится в диапазоне от $1,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}$ Кл/м³. Потенциал искусственного облака заряженного водного аэрозоля достигает 1,5 МВ. В результате, между заряженным аэрозольным облаком и заземленной плоскостью создается сильное электрическое поле напряженностью до 12 кВ/см вблизи заземленной плоскости и до 22 кВ/см на границе облака заряженного аэрозоля (рис. 1).

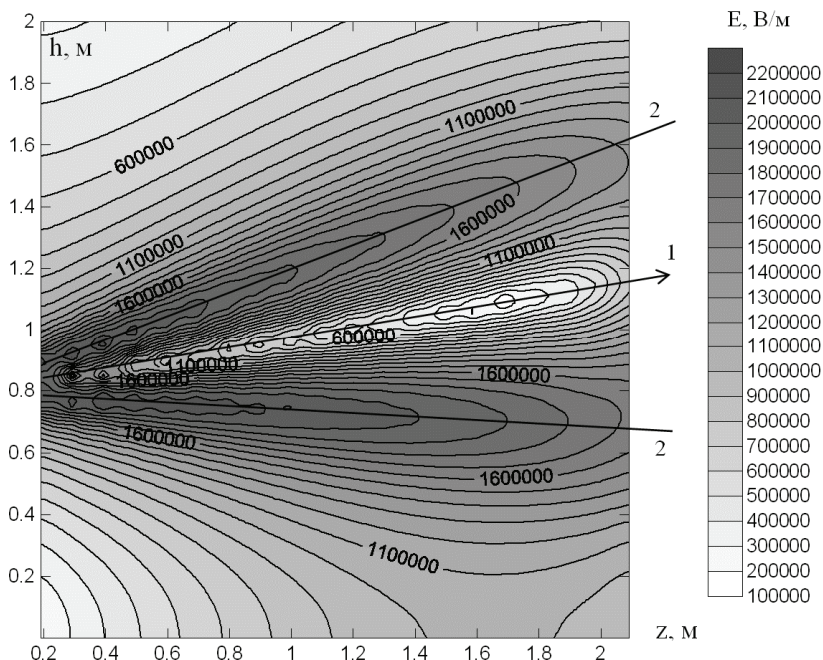


Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении промежутка «облако заряженного аэрозоля – заземленная плоскость», проходящем через ось заряженной струи:

1 – ось струи заряженного аэрозоля; 2 – границы струи заряженного аэрозоля

В области между нижней границей создаваемого заряженного аэрозольного облака и заземленной плоскостью на высотах до 0,4 м над горизонтальной заземленной плоскостью на расстоянии от 1,0 до 2,0 м от соплового устройства электрическое поле имеет практически квазиоднородный характер. Таким образом, расположенные в этой области стержневые электроды высотой до 0,4 м будут находиться в близких условиях с точки зрения воздействия

на них электрического поля облака заряженного аэрозоля.

Схема экспериментального исследовательского комплекса, задействованная при экспериментах, показана на рис. 2.

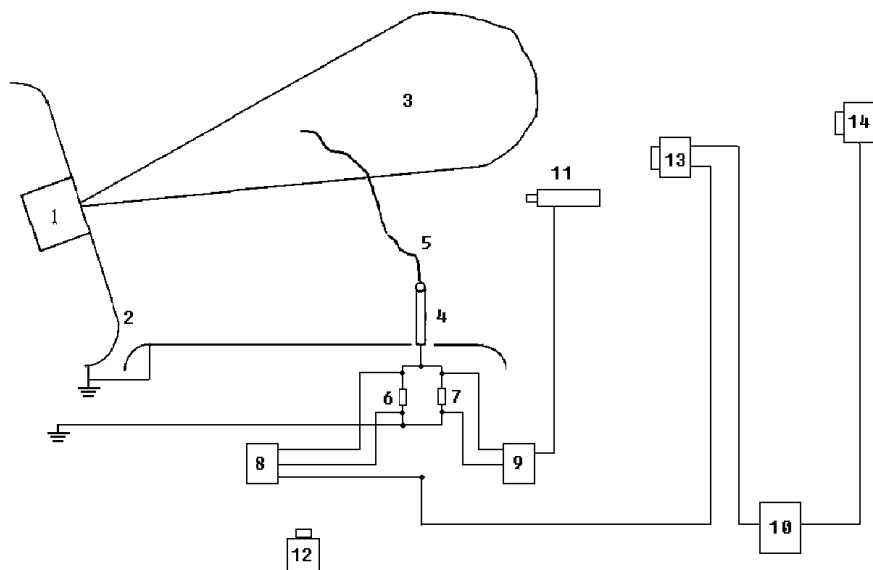


Рисунок 2 – Схема экспериментального комплекса:

- 1 – генератор заряженного аэрозоля конденсационного типа, 2 – заземленные электростатические экраны, 3 – облако заряженного аэрозоля, 4 – электрод, 5 – искровой разряд, 6,7 – малоиндуктивные шунты, 8,9 – цифровые запоминающие осциллографы Tektronix TDS 3054B и Tektronix DPO 7254, 10 – генератор запуска Г5-15, 11 – система ФЭУ-37, 12 – цифровой фотоаппарат марки Panasonic DMC-50, 13 – ФЭУ-79, 14 – электронно-оптическая камера K-011

Измерительная часть экспериментального комплекса включает в себя мало индуктивные токовые шунты (номиналом 0,5 и 1,0 Ом) для измерения тока разряда с заряженного аэрозольного облака на стержневой электрод с помощью цифрового запоминающего осциллографа марки Tektronix TDS 3054 или марки Tektronix DPO 7254.

Программируемая 9-кадровая электронно-оптическая камера K011 использовалась для регистрации картины развития разряда из искусственного облака заряженного аэрозоля и поражения им моделей объектов на заземленной плоскости в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм одновременно с токовыми характеристиками. Эта камера обеспечивала длительность каждого кадра и между кадрового интервала от 0,1 до 102,4 мкс с минимальным шагом до 0,1 мкс. Общая картина разряда регистрировалась цифровыми фотоаппаратами Panasonic DMC-50. Запуск всего измерительного комплекса осуще-

ствляется генератором запуска Г5-15, сигнал на который подавался с фотоэлектронного умножителя. Цифровой фотоаппарат используется в режиме ручной выдержки (до 30 с) и запускается вместе с началом процесса зарядки искусственного облака, что дает возможность запечатлеть все стадии развития разряда.

На цифровой запоминающий осциллограф Tektronix DPO 7254 регистрируемый оптический сигнал подается с фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79, который установлен в аэрозольной камере и фиксирует общее излучение всего разряда. На осциллограф Tektronix TDS 3054B сигнал подается с системы из трех фотоэлектронных умножителей (ФЭУ-37), которые оборудованы специальными щелями и фиксируют излучение из определенной, очень ограниченной по размерам области пространства между облаком заряженного аэрозоля и электродной системой на заземленной плоскости.

2 Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей сосредоточенных объектов на поражения их разрядом из облака заряженного аэрозоля

Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей сосредоточенных объектов на поражение их разрядом из облака заряженного водного аэрозоля проводилось путем моделирования защиты сосредоточенного объекта одиночным стержневым молниеотводом. При моделировании объект и молниеотвод представлялись стержневыми электродами, расположенными на поверхности заземленного электростатического экрана под облаком заряженного аэрозоля на расстоянии от 1,3 до 1,6 м в области, где электрическое поле, созданное облаком, имело квазиоднородный характер. При физическом моделировании процессов поражения молнией моделей объектов и сопоставлении результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов масштабирование было выполнено в соотношении 1:100.

В ходе экспериментов со стержневыми электродами варьировались высота модели защищаемого объекта и высота модели молниеотвода, радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта, расстояние между моделями объекта и молниеотвода.

Было выполнено несколько серий экспериментов: 1) при одинаковых радиусах кривизны вершины моделей объекта (МО) и молниеотвода (ММ); 2) для случаев, когда радиус кривизны вершины модели молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта. Во всех сериях для каждой конкретной конфигурации моделей объектов и молниеотводов в ходе экспериментов было получено не менее семисот случаев возникновения канального разряда в промежутке «облаков заряженного аэрозоля – система электродов на заземленной плоскости».

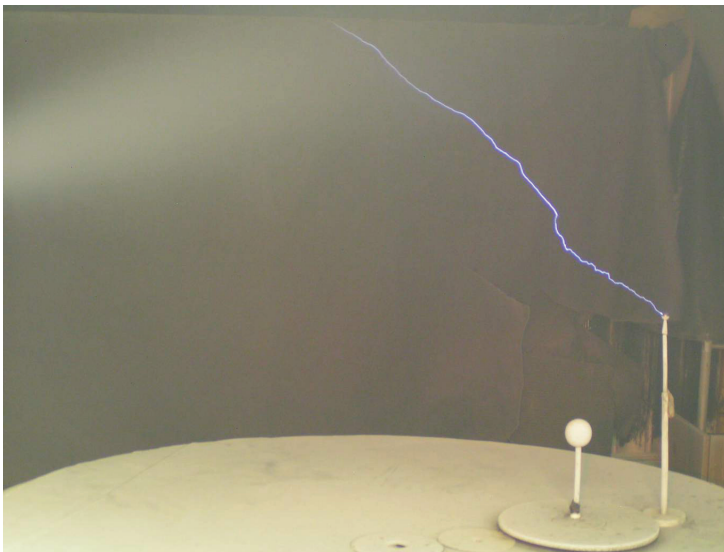


Рисунок 3 – Определение вероятности поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели стержневого молниеотвода и модели защищаемого объекта

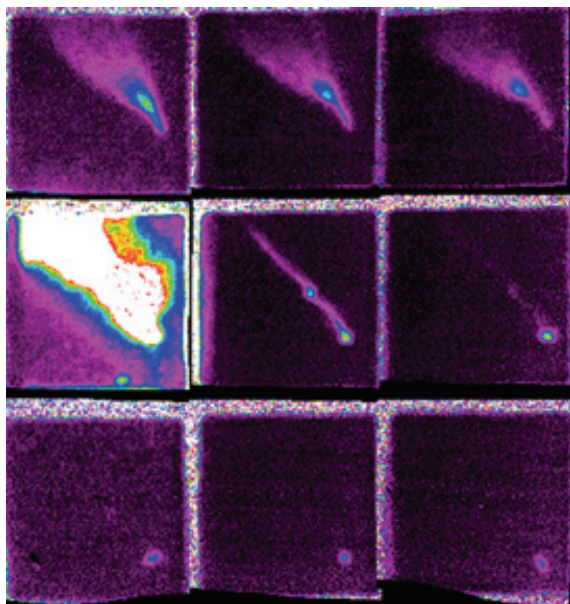


Рисунок 4 – Покадровая развертка процесса поражения разрядом модели стержневого молниеотвода (размер кадра 70×70 см, длительность кадра 2 мкс, междукадровая пауза 0,1 мкс)



Рисунок 5 – Определение вероятности поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели стержневого молниеотвода и модели защищаемого объекта

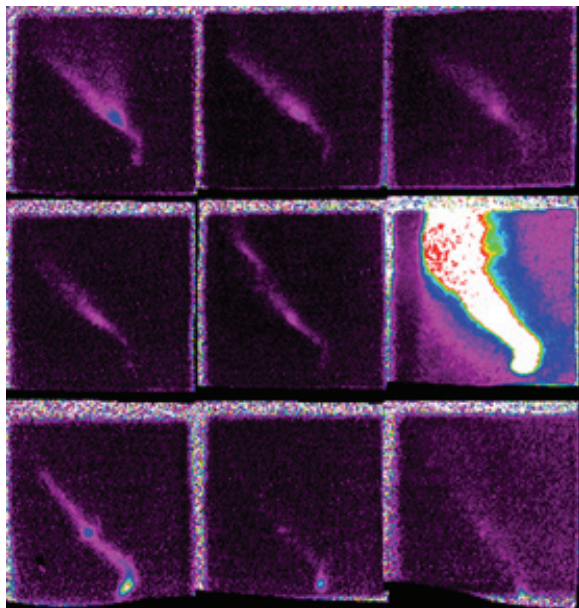


Рисунок 6 – Покадровая развертка процесса поражения разрядом модели сосредоточенного объекта (размер кадра 70×70 см, длительность кадра 2 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на заземленной плоскости» показана на рис. 3. Покадровая развертка процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода показана на рис. 4.

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели сосредоточенного объекта в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на заземленной плоскости» показана на рис. 5. Покадровая развертка процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели сосредоточенного объекта показана на рис. 6.

При экспериментальных исследованиях поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля учитывались все канальные разряды в промежутке «облако заряженного аэрозоля – система заземленных электродов на плоскости», которые были подразделены на два вида: «Т» – разряды, не перешедшие после поражения модели объекта или молниеотвода в ярко выраженную главную стадию разряда; «Я» - разряды, поражение объектов которыми сопровождалось главной стадией разряда, характеризующейся мощным свечением канала разряда.

В случае, когда радиусы кривизны вершины модели объекта и модели молниеотвода были одинаковы $r_m = r_{об}$, эксперименты были выполнены для нескольких вариантов расстояния между моделями объекта и молниеотвода. При этом, в каждой серии высота модели объекта не изменялась, а высота модели молниеотвода увеличивалась. Для сравнения полученных результатов использовался так называемый угол защиты стержневого молниеотвода α , который определялся следующим образом:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{h_m - h_o}, \quad (1)$$

где α – угол, образованный линией, проходящей через вершину молниеотвода и вершину объекта и осью молниеотвода; a – расстояние между моделью молниеотвода и моделью объекта; h_m – высота модели молниеотвода; h_o – высота модели объекта.

В первой серии экспериментов расстояние между моделями молниеотвода и объекта $a = 18,5$ см, радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта 2,0 см, высота модели защищаемого объекта 19,5 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 1. Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от угла защиты стержневого молниеотвода α показана на рис. 7.

Во второй серии экспериментов: расстояние между моделями молниеот-

вода и объекта: $a = 13,5$ см; радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта 2,3 см; высота модели защищаемого объекта 17,0 см.

Таблица 1 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m = r_{об} = 2,0$ см

Высота ММ, см		31,0	33,5	36,0	38,0	40,0	42,0	45,0	48,0
Угол защиты α , град		58,1	52,9	48,3	45,0	42,1	39,4	36,0	33,0
Число разрядов в МО	Т	54	34	30	10	10	8	4	1
	Я	90	59	32	14	10	6	2	1
	Т+Я	144	93	62	24	20	14	6	2
Число разрядов в ММ	Т	246	162	198	254	478	476	469	438
	Я	466	471	550	456	690	562	482	529
	Т+Я	712	633	748	710	1168	1038	951	957
Всего разрядов		856	726	810	734	1188	1052	957	959
Вероятность поражения МО разрядом	Т	0,1800	0,1734	0,1316	0,0379	0,0205	0,0165	0,0085	0,0023
	Я	0,1618	0,1113	0,0550	0,0298	0,0143	0,0106	0,0041	0,0019
	Т+Я	0,1682	0,1281	0,0765	0,0327	0,0168	0,0133	0,0061	0,0020

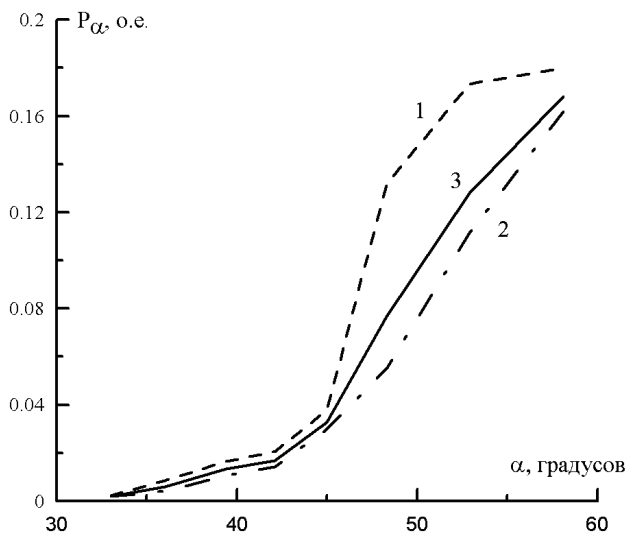


Рисунок 7 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_m = r_{об} = 2,0$ см:

1 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Т», 2 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Я», 3 – общая вероятность поражения модели объекта

Таблица 2 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m = r_{об} = 2,3$ см

Высота ММ, см	28,0	30,0	32,0	34,0	36,0	38,0	40,0
Угол защиты α , градусов	50,0	46,1	42,0	38,5	35,4	32,7	30,4
Число разрядов в МО	108	22	12	6	2	1	1
Число разрядов в ММ	952	1120	1528	1293	1383	1412	1898
Всего разрядов	1060	1142	1540	1299	1385	1413	1899
Вероятность МО поражения разрядом из облака	0,1019	0,0193	0,0078	0,0046	0,0014	0,0007	0,0005

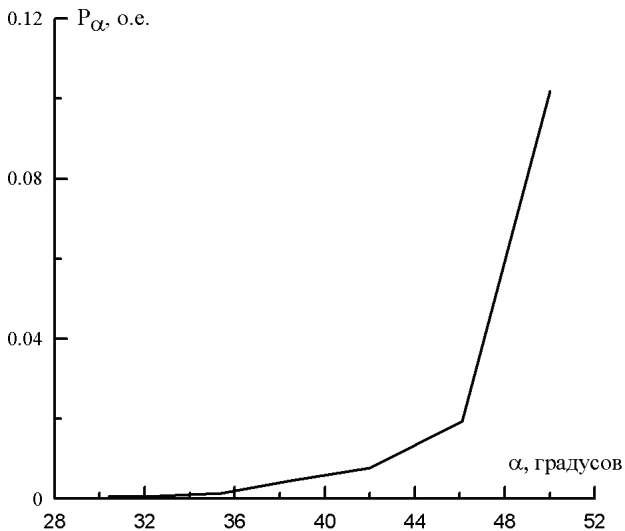


Рисунок 8 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_m = r_{об} = 2,3$ см

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 2. Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели стержневого молниеотвода α показана на рис. 8.

Несколько серий экспериментов были выполнены для моделирования часто встречающейся при молниезащите энергетических объектов ситуации,

когда радиус кривизны вершины стержневого молниеотвода существенно меньше возможных радиусов кривизны вершины защищаемых объектов ($r_m < r_{об}$).

В первой серии экспериментов для такого соотношения между параметрами моделей стержневого молниеотвода и защищаемого объекта было принято следующее: расстояние между моделями молниеотвода и объекта составляло 18,5 см; радиус кривизны вершины модели молниеотвода 0,4 см и модели объекта 2,0 см, соответственно; высота модели защищаемого объекта 19,5 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии экспериментов, и рассчитанные на основе полученных экспериментальных данных вероятности поражения модели разрядом из облака, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 2,0$ см)

Высота ММ, см		36,0	38,0	40,0	42,0	44,5	47,5	50,0
Угол защиты α , градусов		48,3	45,0	42,1	39,4	36,5	33,5	30,4
Число разрядов в МО	Т	95	73	71	22	14	10	5
	Я	70	77	66	16	14	8	4
	Т+Я	165	150	137	38	28	18	9
Число разрядов в ММ	Т	345	363	417	352	362	308	390
	Я	192	262	402	480	476	376	362
	Т+Я	537	625	819	832	838	684	752
Всего разрядов		702	775	956	870	866	702	761
Вероятность поражения МО разрядом из облака	Т	0,2159	0,1674	0,1455	0,0588	0,0372	0,0314	0,0127
	Я	0,2671	0,2271	0,1410	0,0322	0,0286	0,0208	0,0109
	Т+Я	0,2350	0,1935	0,1433	0,0437	0,0323	0,0256	0,0118

Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от угла защиты стержневого молниеотвода α показана на рис. 9.

Как видно из полученных результатов, на зависимостях вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля можно выделить несколько участков. При углах защиты модели молниеотвода более 40° (когда радиус кривизны вершины молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели защищаемого объекта) или более 45° (когда радиус кривизны вершины молниеотвода практически равен радиусу кривизны вершины модели защищаемого объекта) наблюдается резкий рост вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень сильно уменьшается как

по площади, так и в объеме, то есть он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля).

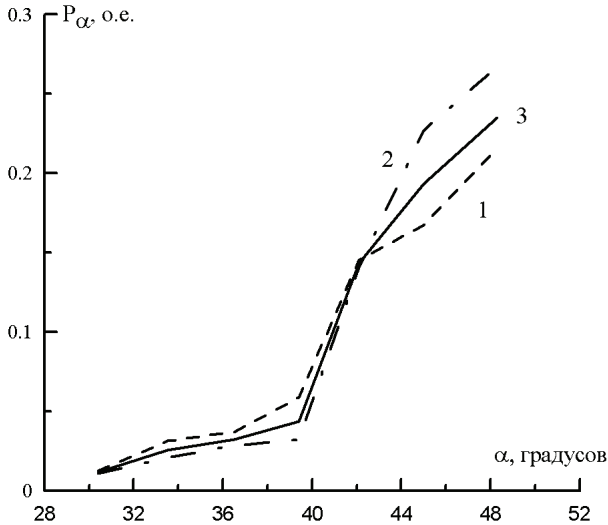


Рисунок 9 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 2,0$ см):

1 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Г», 2 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Я», 3 – общая вероятность поражения модели объекта

При углах защиты модели стержневого молниеотвода от 40 до 30° во всех случаях наблюдается практически пропорциональное снижение вероятности поражения модели объекта с уменьшением угла защиты. При углах защиты модели стержневого молниеотвода менее 30°, вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля становится менее 0,01.

Результаты экспериментальных исследований с применением моделей стержневых молниеотводов и сосредоточенных объектов показали существенное влияние соотношения радиусов кривизны вершины моделей объекта и стержневого молниеотвода на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Для случаев, когда радиус кривизны вершины модели стержневого молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта, наблюдается существенное увеличение вероятности поражения модели объекта по сравнению со случаями, когда радиусы кривизны вершины моделей объектов и молниеотводов приблизительно равны (рис. 10).

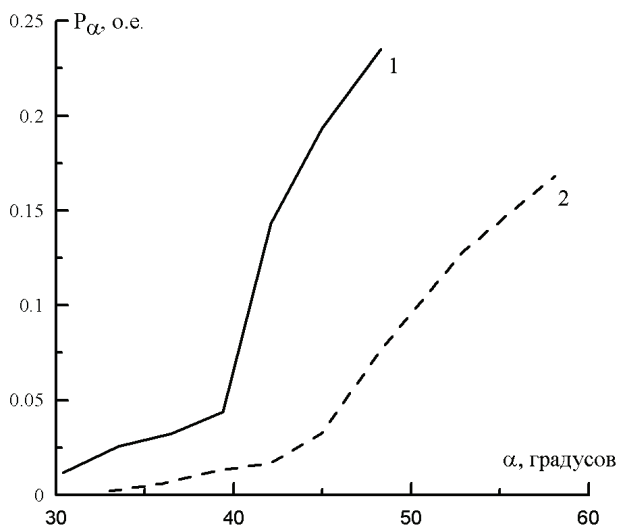


Рисунок 10 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака:

- 1 – вероятность поражения модели объекта при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 2,0$ см),
 2 – вероятность поражения модели объекта при $r_m = r_{об} = 2,0$ см

Таким образом, уменьшение радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода в пять раз приводит к росту вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от трех до пяти раз.

Для того чтобы выяснить влияние радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода на вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели защищаемого объекта была выполнена специальная серия экспериментов при следующих условиях: расстояние между моделями молниеотвода и объекта 13,5 см; радиус кривизны вершины модели объекта 2,3 см; высота модели защищаемого объекта 17,0 см; высота модели стержневого молниеотвода 30,0 см. Радиус кривизны вершины модели молниеотвода менялся в диапазоне от 0,03 до 2,00 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели защищаемого объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 4.

Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от радиуса кривизны вершины модели молниеотвода показана на рис. 11. При уменьшении радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода менее 0,7 см наблюдается резкий рост вероятности поражения модели защищаемого объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Это объясняется тем, что при малых радиусах кривизны вершины молниеотвода на его вершине сильно усиливается

внешнее электрическое поле, что приводит к раннему появлению коронного разряда, который, в значительной мере, экранирует вершину молниеотвода от действия электрического поля облака заряженного аэрозоля и нисходящего отрицательного лидера.

Таблица 4 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае изменения радиуса вершины модели молниеотвода

Радиус кривизны вершины ММ, см	0,1	0,3	0,5	0,7	1,2	1,5	2,0	2,3
Число разрядов в МО	672	421	189	120	64	46	27	22
Число разрядов в ММ	102	320	550	702	657	706	953	1120
Всего разрядов	774	741	739	822	721	752	980	1142
Вероятность поражения МО	0,8682	0,5681	0,2558	0,1460	0,0888	0,0611	0,0276	0,0193

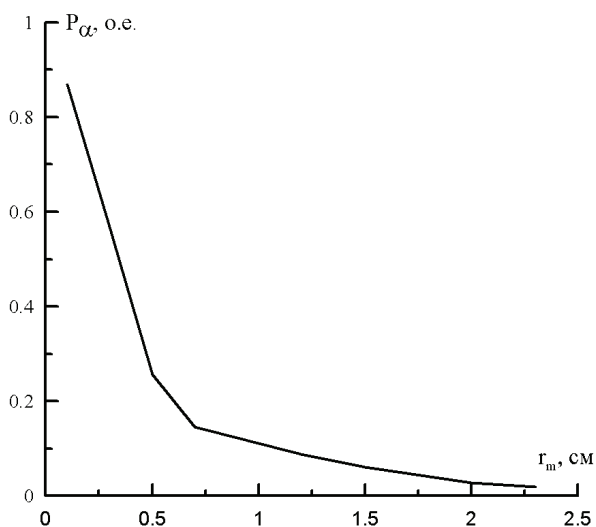


Рисунок 11 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при изменении радиуса кривизны вершины модели молниеотвода

В результате, суммарное поле вблизи вершины молниеотвода становится меньше, и ухудшаются условия для старта с вершины молниеотвода восходящего встречного лидера. Все это значительно увеличивает вероятность по-

явления разряда с вершины электрода с большим радиусом кривизны вершины (модели защищаемого молниеотводом объекта) и, соответственно, вероятность поражения модели защищаемого объекта разрядом из искусственного облака заряженного водного аэрозоля.

Оптимальный с точки зрения условий формирования лидерного разряда с вершины модели молниеотвода радиус кривизны его вершины находится в диапазоне от 2,0 до 2,5 см. В этом случае достигается наименьшая вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля защищаемой им модели объекта. При таких размерах вершины модели стержневого молниеотвода значительно увеличивается площадь поверхности электрода, на которой создаются условия для возникновения и последующего распространения восходящего или встречного лидерного разряда с модели молниеотвода. Фактически, это означает рост числа точек возможного старта лидерного разряда с вершины модели молниеотвода.

Дальнейшее увеличение радиуса кривизны вершины стержневого молниеотвода может оказаться не эффективным, так в этом случае коэффициент усиления электрического поля на вершине электрода будет относительно небольшим, и условия для формирования с него встречного (восходящего) лидера потребует достаточно сильного внешнего электрического поля. В результате, может наблюдаться задержка со стартом лидерного разряда с вершины молниеотвода, во время которой может успеть сформироваться восходящий разряд с защищаемого объекта. В этом случае защитное действие молниеотвода в этом случае станет менее эффективным.

3 Сопоставление результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты объектов

Для сопоставления результатов экспериментов с действующими методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов были выполнены расчеты по молниезащите стержневым молниеотводом, используя действующие нормативные документы по молниезащите: Инструкцию по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87 [3], Инструкцию по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003 [4], Стандарт международной электротехнической комиссии МЭК 62305 Молниезащита [6], Расчеты проводились при масштабировании условий эксперимента к расчетным характеристикам в соотношении 1:100.

В сводной табл. 5 приведены экспериментальные результаты и расчетные данные, полученные по различным нормативным документам по молниезащите.

Сравнивая полученные результаты, нужно выделить влияние формы молниеотвода на его защищающую способность. Согласно различным нормативным документам при расчетах зон защиты форма вершины молниеотвода

не учитывается. Однако форма вершины вносила существенное влияние число поражений объекта: при различных высотах надежность стержневого молниеотвода со сферической вершиной превосходила надежность остроконечного молниеотвода. Так, при высотах молниеотвода 36 и 38 м, когда объект попадал в зону защиты с надежностью $Q = 0,95$, экспериментальная надежность защиты соответствовала ей только в случае равных сферических вершин моделей объекта и молниеотвода. Причем, разница в вероятности поражения объекта, защищенного молниеотводом с разными вершинами, могла достигать почти порядка величины.

Таблица 5 – Сводная таблица результатов определения вероятности поражения объекта разрядом

Высота молниеотвода, м	Вероятности поражения объекта разрядом молнии (согласно действующим нормативным документам)			Экспериментальная вероятность поражения объекта	
	по [3]	по [4]	по [6]	1 серия	2 серия
31	$> 0,05$	$> 0,1$	от 0,05 до 0,1	0,168	-
33,5	от 0,005 до 0,05	$> 0,1$	от 0,05 до 0,1	0,128	-
36	от 0,005 до 0,05	$> 0,1$	от 0,05 до 0,1	0,077	0,235
38	от 0,005 до 0,05	$> 0,1$	от 0,05 до 0,1	0,033	0,194
40	от 0,005 до 0,05	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,017	0,143
42	$< 0,005$	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,013	0,044
44,5	$< 0,005$	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	-	0,032
45	$< 0,005$	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,006	-
47,5	$< 0,005$	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	-	0,026

В случаях относительно невысокого молниеотвода (высотой 31,5 и 33,5 м) моделируемый в экспериментальных исследованиях сосредоточенный объект даже не попал ни в одну из построенных нормативных зон защиты, что подтвердилось в эксперименте: $P = 0,168$ и $P = 0,128$, соответственно.

В целом, эксперимент дал результаты, более близкие к расчетам по [3] для первой серии экспериментов. Результаты второй экспериментальной серии были ближе к расчетам, выполненным согласно [4].

В общем же в большинстве случаев опытная вероятность поражения объекта соответствовала зоне защиты, в которую попадал объект в результате построения. Однако, как правило, эта зона соответствовала наименьшей надежности защиты, то есть зоне в которой допустим наибольший разброс значений вероятности поражения объекта (от 0,005 до 0,050 для [3] и от 0,01 до 0,10 для [4]). В случаях, когда согласно расчету объект должен был входить в более надежную зону защиты, были получены существенные отклонения от нее при экспериментах, особенно для молниеотводов без сферической вершины.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процес-

сов поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля и их сопоставление с существующими расчетными методами определения молниезащищенности объектов позволяют сформулировать следующее.

1) Существующие нормативные документы по молниезащите при расчетах зоны защиты и определении вероятности прорыва молнии в зону защиты стержневых молниеотводов фактически оперируют только высотой стержневого молниеотвода, но никак не учитывают форму его вершины (молниеприемника). В подавляющем большинстве случаев молниеприемник представляет собой острый металлический стержень, для которого нормируется только минимальное поперечное сечение с точки зрения обеспечения протекания по нему тока молнии.

В тоже время экспериментальные исследования процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов показали, что защитное действие модели стержневого молниеотвода уменьшается, если он имеет маленький радиус кривизны вершины. Это связано с тем, что на острой вершине молниеотвода будет возникать коронный разряд, который будет создавать вблизи вершины молниеотвода объемный заряд, ограничивающий внешнее поле вблизи вершины и, соответственно, затрудняющий возникновение с молниеотвода встречного или восходящего лидерного разряда.

Эксперименты показали, что есть оптимальный диапазон размеров (радиусов кривизны) вершины стержневого молниеотвода, при которых обеспечиваются лучшие условия для старта с него лидера. Он находится в диапазоне от 2,0 см до 4,0 см. Стримерная корона, которая будет возникать на вершине стержневого молниеотвода с таким радиусом, будет иметь характеристики, способствующие ее быстрому переходу в лидерный разряд [13, 15-17].

2) Экспериментальные исследования показали, что поражение моделей объектов и молниеотводов является конкурирующим процессом. Во многом, конечная точка поражения определяется тем, с какого электрода раньше возникнет встречный (восходящий) лидерный разряд. Поэтому надо обращать внимание не только на форму вершины стержневого молниеотвода, но и на выступающие части самих защищаемых объектов. Значительная часть из них может иметь эквивалентные радиусы кривизны как раз в том диапазоне величин, когда создаются условия, оптимальные для старта отсюда встречного (восходящего) лидера в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования и физическое моделирование процессов поражения молнией моделей сосредоточенных объектов для исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков. Экспериментально оп-

ределены вероятности поражения и зоны защиты моделей молниеотводов. Исследовано влияние характеристик моделей молниеотводов и объектов на процесс их поражения разрядом из облака. Найдено существенное влияние соотношения размеров (радиусов кривизны вершины сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов) на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля и размер зоны защиты молниеотвода.

Для случаев, когда радиус кривизны вершины модели стержневого молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта, наблюдается существенное увеличение вероятности поражения модели объекта по сравнению со случаями, когда радиусы кривизны вершины моделей объектов и молниеотводов приблизительно равны. Оптимальный с точки зрения условий формирования лидерного разряда с вершины модели молниеотвода радиус кривизны его вершины находится в диапазоне от 2,0 см до 4,0 см. В этом случае достигается наименьшая вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля защищаемой им модели объекта. Установлено, что при таких размерах вершины модели стержневого молниеотвода также значительно увеличивается площадь поверхности электрода, на которой создаются условия для возникновения и последующего распространения восходящего или встречного лидерного разряда с модели молниеотвода.

Выполнено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты различных энергетических объектов, используя действующие нормативные документы по молниезащите. Проведенные расчеты с масштабированием условий экспериментов в соотношении 1:100 показали, что для стержневых молниеотводов в большинстве случаев экспериментальная вероятность поражения объекта соответствовала зоне защиты, в которую попадал объект по результатам расчетов. Но, как правило, эта зона соответствовала наименьшей надежности защиты, то есть зоне, в которой допустим наибольший разброс значений вероятности поражения объекта. Особенно большие отличия между расчетными и экспериментальными данными были для случаев моделей стержневых молниеотводов с острой вершиной.

Список литературы: 1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 2. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. – Cambridge University Press, 2003. 3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО – 153 – 34.21.122-2003. – М.: МЭИ, 2004. 5. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. – С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 6. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning - Part I: General principles. 2005. 7. *P. Laroche* Recent progress and open questions on the physics of lightning // Proceedings of 13th International Conference on Atmospheric Electricity. – Beijing, China, 2007. 8. *L. Arevalo, V. Cooray* 'The mesh method' in lightning protection standards – Revisited // Journal of Electrostatics. – 68 (2010). – P. 311-314. 9. *V. Rakov* A Review of Triggered-Lightning Experiments // Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection. – Cagliari, Italy, 2010. 10. *C. Vou-*

quegneau A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. – 65 (2007). – P. 395-399. **11.** *Александров Г.Н.* Физические основы моделирования разрядов молнии при лабораторных исследованиях молниезащиты // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. – Новосибирск, 2007. – С. 63-70. **12.** *Гайворонский А.С., Овсянников А.Г.* Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. – Новосибирск, 2007. – С. 85-90. **13.** *А.Г. Темников, А.В. Орлов* Экспериментальное исследование характеристик стебля стримерной короны с использованием искусственного облака заряженного водного аэрозоля // Электричество. – № 12. – 2005. – С. 14-21. **14.** *Темников А.Г., Орлов А.В., Соколова М.В., Синкевич О.А., Фирсов К.Н., Василяк Л.М.* и др. Исследование электрических разрядов вблизи искусственного заряженного аэрозольного облака и их взаимодействие с лазерной искрой // Теплофизика высоких температур. – Т. 41, № 2. – 2003. – С. 200-210. **15.** *F. Rizk* Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 4, no. 4. – 1989. – P. 2187-2195. **16.** *I. Gallimberti* The mechanism of long spark formation // J. Physique Coll. – Vol. 40, No. C7. – 1972. – P. 193-250. **17.** *M. Baccerra, V. Cooray* A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 21, No. 2. – April 2006. – P. 897-908.

Поступила в редколлегию 24.10.2011