

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

УДК 621.311

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.ГЕРАСТЕНОК, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

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

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА МОДЕЛЯХ

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

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

Представлены результаты экспериментальных исследований и физического моделирования процессов поражения молнией моделей энергетических объектов и исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных туч. Проанализировано влияние характеристик моделей тросовых молниеотводов и проводов на процесс их поражения разрядом из тучи заряженного аэрозолю. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты энергетических объектов. Выработаны рекомендации по совершенствованию молниезащиты существующих и проектируемых энергетических объектов.

Введение. Остается еще много существенных проблем в физике разряда молнии [1], таких как инициирование разряда молнии, процессы перехода от лидерной стадии к главному разряду, формирование внутриоблачной молнии, электромагнитное излучение вспышки молнии и его связь с процессами в грозовом облаке и характеристиками разряда молнии. Одной из таких проблем является и формирование встречных и восходящих разрядов с объектов в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии.

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 трудна из-за ограниченности и неоднозначности собранного материала, малой статистической выборки и дороговизны.

Существующие нормативные методики расчета и определения молниезащищенности различных объектов [2-5], основывающиеся на таком подходе, 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, 6-8]. Однако целостной общепринятой модели этого процесса пока не создано.

В большинстве случаев просто упрощают задачу в стандартах и инженерных методиках (например, [9]), 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 [9, 10]. В результате, проблема совершенствования действующих стандартов по молниезащите и методик расчета молниепоражаемости наземных объектов остается актуальной [11].

Использование экспериментальных методов для исследования физики молнии и молниезащиты являлось и является актуальным [6, 7], так как без них невозможно детально проверить и проанализировать возможную эффективность действующих и перспективных средств защиты от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий. Поэтому не потеряли своей актуальности и развиваются методы физического моделирования разрядов молнии, особенно для решения проблем молниезащиты объектов [6, 7, 12].

Среди методов выделяется моделирование на макетах объектов с использованием длинной отрицательной искры в качестве аналога лидера молнии и имитация восходящих встречных разрядов с объектов [13]. 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 по-

ражения 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 физического моделирования процессов поражения молнией энергетических объектов и исследования 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. Основные параметры экспериментально-измерительного комплекса представлены в [14, 15].

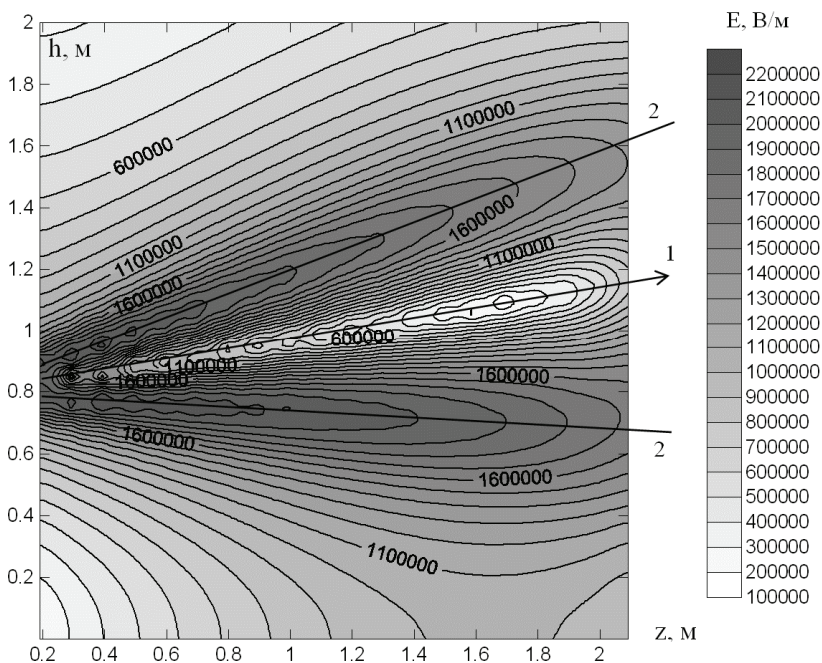


Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении промежутка «облако заряженного аэрозоля – заземленная плоскость», проходящем через ось заряженной струи:

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

Создаваемое аэрозольное облако имеет объем несколько кубических метров. Ток выноса при экспериментах составлял 120 мкА. Потенциал искус-

ственного 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).

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. Его величина меняется с высотой сравнительно медленно (растет с высотой не более чем на 30 %, от 10 кВ/см у самой плоскости до 14 кВ/см на высоте 0,4 м над ней). Таким образом, расположенные в этой области 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.

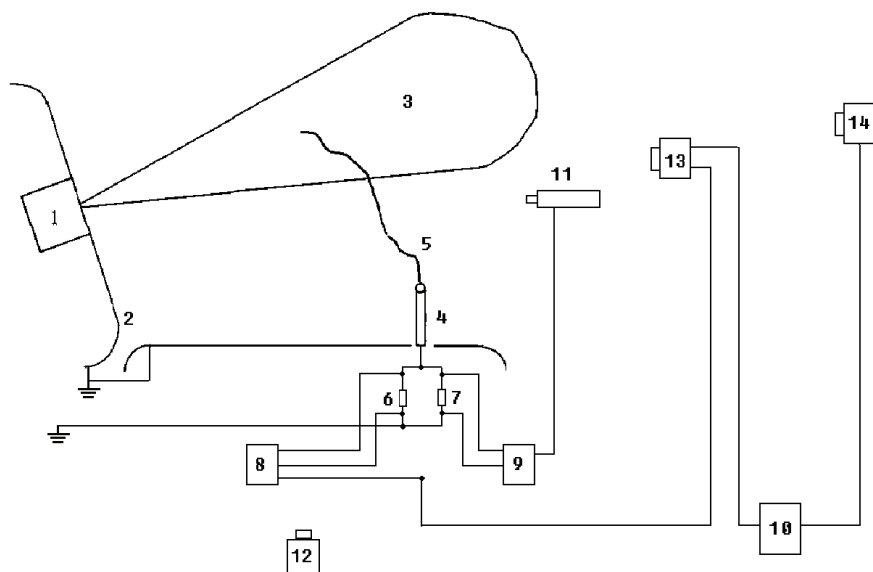


Рисунок 2 – Схема экспериментального комплекса:

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 К-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 модельные протяженные электроды с помощью цифрового запоминающего осциллографа марки Tektronix TDS 3054 или марки Tektronix DPO 7254.

Миниатюрная программируемая 9-кадровая электронно-оптическая камера K011 использовалась для регистрации оптической 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. Угол между направления обзора разрядного явления электронно-оптической камерой и цифровым фотоаппаратом составлял около 30°. Запуск всего измерительного комплекса осуществляется генератором запуска Г5-15, сигнал на который подавался с фотоэлектронного умножителя.

Таким образом, статическая оптическая картина разрядных процессов в промежутке «заряженное аэрозольное облако – система протяженных электродов на плоскости» и их формирование во времени могут фиксироваться цифровыми фотоаппаратами марки Panasonic DMC-50 и программируемой электронно-оптической камерой K-011. Цифровой фотоаппарат используется в режиме ручной выдержки (до 30 с) и запускается вместе с началом процесса зарядки искусственного облака от специализированного источника высокого напряжения, 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 разрядного явления. На осциллограф Tektronix TDS 3054В 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 протяженных объектов на поражения их разрядом из облака заряженного аэрозоля

Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей протяженных объектов (проводов и тросов воздушной линии электропередачи) на поражение их разрядом из облака заряженного водного аэрозоля проводилось путем моделирования защиты протяженного объекта (провода) одиночным тросовым молниеотводом. При моделировании объект и молниеотвод

представлялись цилиндрическими электродами (металлическими проводами или трубами), расположенными над поверхностью заземленного электростатического экрана под облаком заряженного аэрозоля на расстоянии от 1,3 до 1,6 м перпендикулярно направлению распространения струи заряженного аэрозоля 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 молниезащитности различных энергетических объектов масштабирование воздушных линий электропередачи было выполнено в соотношении 1:100.

В ходе экспериментов с протяженными электродами варьировались высота модели защищаемого объекта (модели фазного провода) и высота модели молниеотвода (модели грозозащитного троса), радиус модели тросового молниеотвода и модели протяженного объекта, расстояние между моделями объекта и молниеотвода.

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»: «Т» – разряды, не перешедшие после поражения модели объекта или молниеотвода в ярко выраженную главную стадию разряда; «Я» – разряды, поражение моделей объектов или молниеотводов которыми сопровождалось главной стадией разряда, характеризующейся мощным свечением канала разряда.

При определении вероятности поражения модели энергетического объекта (МО) и защиты его от разрядов из облака заряженного аэрозоля моделью тросового молниеотвода (ММ) было выполнено несколько серий экспериментов:

- 1) при одинаковых радиусах моделей провода и троса;
- 2) для случаев, когда радиус модели тросового молниеотвода существенно меньше радиуса модели фазного провода или ошиновки. 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».

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода модели протяженного объекта (провода) в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели провода и тросового молниеотвода над заземленной плоскостью», показана на рис. 3. В случаях поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели фазного провода значительная часть таких разрядов концентрировалась в областях модели провода, прилегающих к местам, моделирующих опоры, на которых крепились модели фазных проводов (рис. 4). Именно этот участок модели фазного провода или другого протяженного объекта являлся основным местом «старта» восходящих

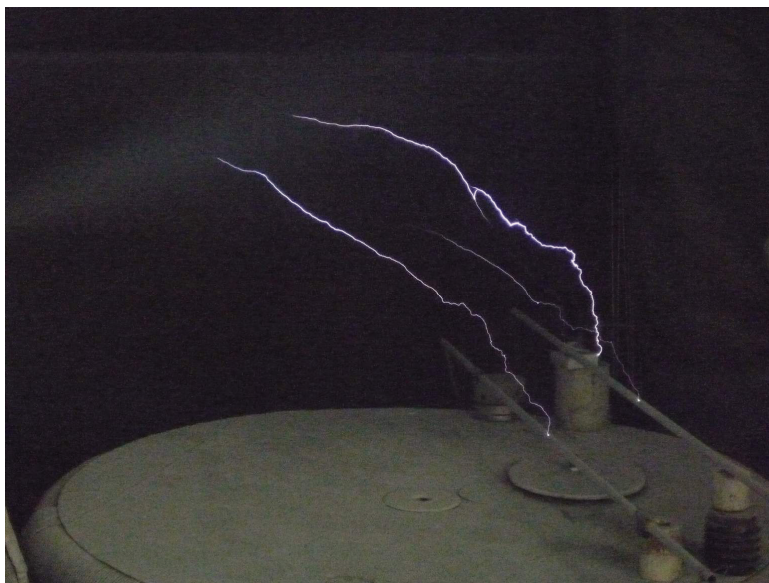


Рисунок 3 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели тросового молниеотвода и модели защищаемого объекта (провода)

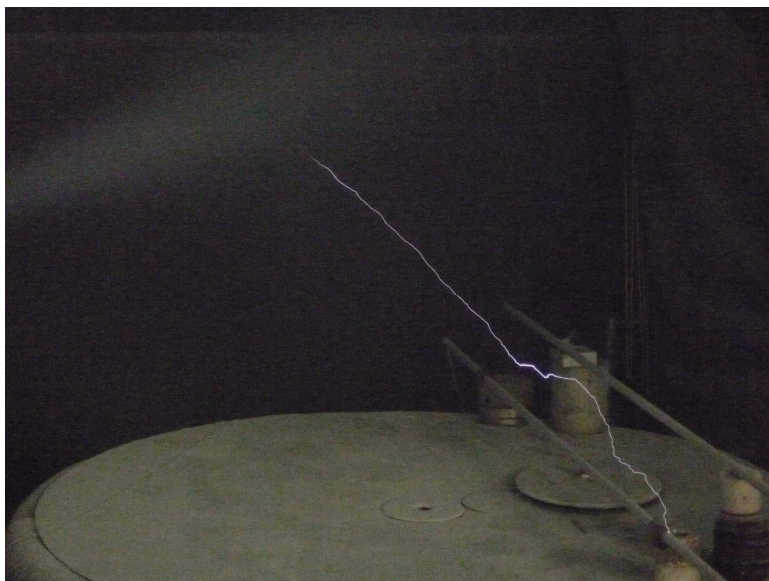


Рисунок 4 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели защищаемого объекта (провода)



Рисунок 5 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели тросового молниеотвода

лидерных разрядов, которые приводили к последующему поражению модели протяженного объекта разрядом и облака заряженного аэрозоля. В отличие от характера поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели фазного провода, поражения разрядом из облака модели тросового молниеотвода чаще проходило на центральном участке такого молниеотвода (рис. 5), где наблюдается большая напряженность электрического поля, создаваемого облаком, и создаются наиболее благоприятные условия для возникновения восходящего или встречного лидерного разряда.

При проведенных экспериментальных исследованиях варьировались высота моделей тросового молниеотвода и модели защищаемого провода, расстояние между протяженными объектами для того чтобы определить вероятность поражения защищаемого провода разрядом из заряженного аэрозольного облака в зависимости от угла защиты α модели тросового молниеотвода (рис. 6).

В первой серии экспериментальных исследований, когда радиусы модели защищаемого провода и модели тросового молниеотвода были одинаковы $r_m = r_{об}$, высота подвеса защищаемого протяженного объекта и высота подвеса модели молниеотвода в рамках каждого экспериментального случая были постоянными и равнялись 11 и 20 см, соответственно. В ходе экспериментальных исследований этой серии изменялось только расстояние между моделями проводов и тросов. Радиус модели защищаемого провода в этой серии был равен радиусу модели тросового молниеотвода и составлял 1,8 см.

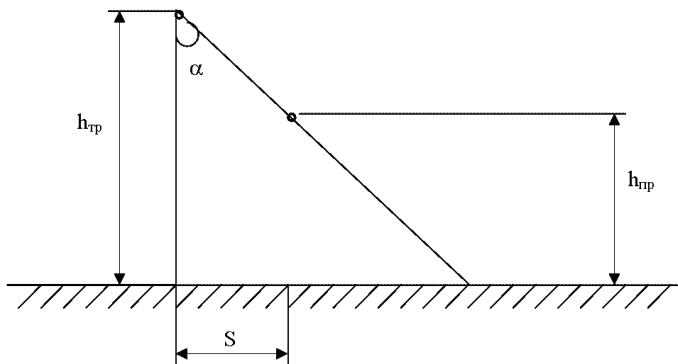


Рисунок 6 – Схематичное представление угла защиты тросового молниеотвода

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 1. Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 7.

Таблица 1 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m = r_{об} = 1,8$ см

Расстояние между моделями троса и провода, см		8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
Угол защиты α , градусов		33,6	39,8	45,0	49,4	53,1	56,3	59,0
Число разрядов в модель объекта	Т	1	2	12	25	25	27	66
	Я	0	1	6	18	25	28	54
	Т+Я	1	3	18	43	50	55	120
Число разрядов в модель молниеотвода	Т	634	494	474	426	385	360	264
	Я	401	361	312	306	310	342	366
	Т+Я	1035	855	786	732	695	702	630
Всего разрядов		1036	858	804	775	745	757	750
Вероятность поражения модели объекта	Т	0,0016	0,0040	0,0247	0,0554	0,0609	0,0698	0,2000
	Я	0,0000	0,0028	0,0189	0,0556	0,0746	0,0757	0,1286
	Т+Я	0,0009	0,0035	0,0224	0,0555	0,0671	0,0727	0,1600

Во второй серии проведенных экспериментов, когда радиус модели защищаемого фазного провода был существенно больше радиуса модели тросо-

вого молниеотвода $r_M < r_{об}$ ($r_M = 0,8$ см; $r_{об} = 1,8$ см), высота подвеса защищаемого протяженного объекта и высота подвеса модели тросового молниеотвода в рамках каждого экспериментального случая были постоянными и равнялись 12 и 20,5 см, соответственно.

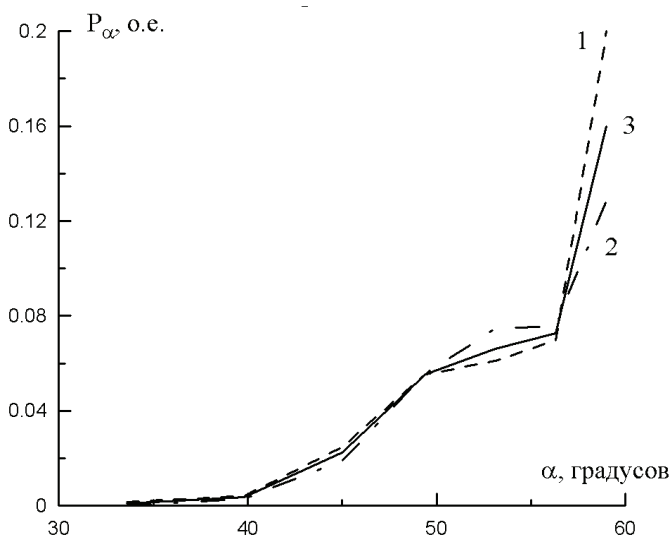


Рисунок 7 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_M = r_{об} = 1,8$ см:

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

В ходе экспериментальных исследований этой серии изменялось только расстояние между моделями проводов и тросов. Радиус модели защищаемого провода в этой серии был равен 1,8 см, радиус модели тросового молниеотвода составлял 0,8 см.

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 2.

Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 8.

В третьей серии экспериментов изменялись расстояние между моделями молниеотвода и объекта, высота модели защищаемого объекта и высота модели тросового молниеотвода. В отличие от предыдущих серий экспериментов в этой серии модели протяженных объектов и тросовых молниеотводов были выполнены не из жестких металлических труб, а из металлических гибких проводов.

Таблица 2 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m < r_{об}$
 ($r_m = 0,8$ см; $r_{об} = 1,8$ см)

Расстояние между моделями троса и провода, см	9,0	11,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	
Угол защиты α , градусов	34,6	40,2	45,0	49,1	52,3	55,6	58,2	
Число разрядов в модель объекта	Т	1	1	1	1	2	12	62
	Я	0	0	1	1	2	11	54
	Т+Я	1	1	2	2	4	23	116
Число разрядов в модель молниеотвода	Т	723	683	502	404	311	388	346
	Я	362	354	682	450	480	444	411
	Т+Я	1085	1037	1184	854	791	832	757
Всего разрядов	1086	1038	1186	856	795	855	873	
Вероятность поражения модели объекта	Т	0,0014	0,0015	0,0020	0,0025	0,0064	0,0309	0,1792
	Я	0,0000	0,0000	0,0015	0,0022	0,0042	0,0248	0,1187
	Т+Я	0,0009	0,0010	0,0017	0,0023	0,0050	0,0269	0,1329

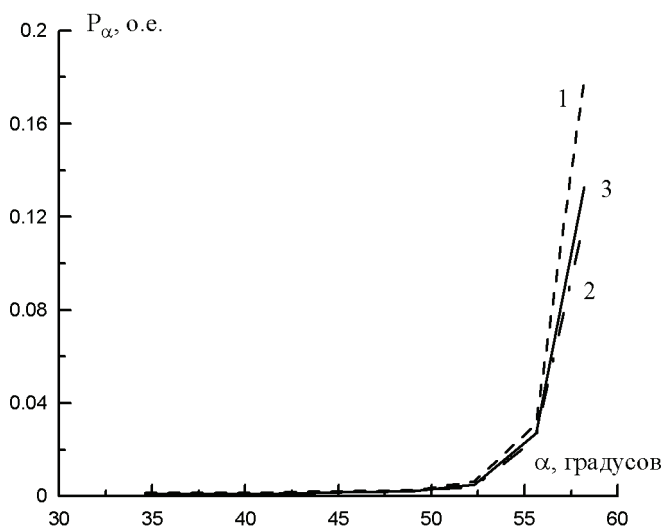


Рисунок 8 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,8$ см; $r_{об} = 1,8$ см):

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

Радиус модели защищаемого фазного провода был существенно больше радиуса модели тросового молниеотвода $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 1,0$ см). Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта (провода) разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 3.

Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта (фазного провода) разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 9.

Таблица 3 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 1,0$ см)

Угол защиты α , градус	31,3	32,3	33,6	38,6	43,4	49,5
Число разрядов в модель объекта	0	0	1	28	62	95
Число разрядов в модель молниеотвода	893	840	1649	1064	983	650
Всего разрядов	893	840	1650	1092	1045	755
Вероятность поражения разрядом из облака модели объекта	0,0000	0,000	0,0006	0,0256	0,0593	0,1258

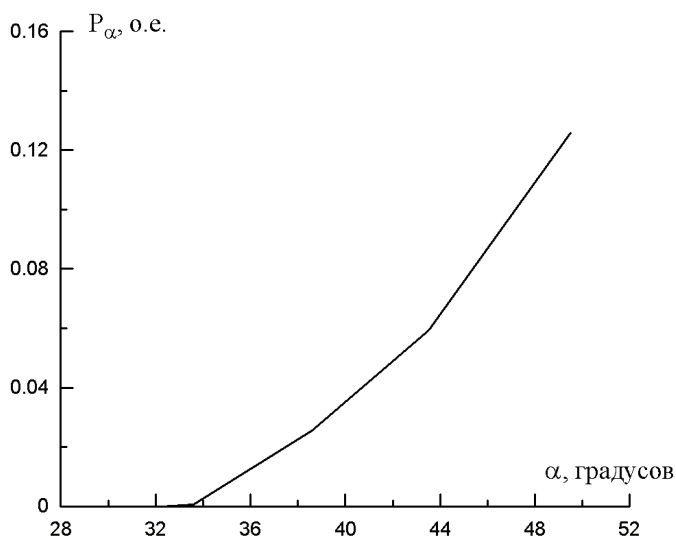


Рисунок 9 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 1,0$ см)

Как видно из полученных экспериментальных результатов, на зависимостях вероятности поражения модели протяженного объекта (провода) разрядом из облака заряженного водного аэрозоля можно выделить общую тенденцию. При превышении определенного угла защиты модели тросового молниеотвода (от 32° для гибких моделей проводов и тросов до 50° для жестких моделей проводов и тросов) наблюдается существенный рост вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень быстро уменьшается по объему, т.е. он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту провода от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля). При углах защиты модели тросового молниеотвода менее 30° во всех случаях наблюдается снижение вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля до уровня менее 0,001.

Если проанализировать полученные экспериментальные результаты, то вероятность поражения модели провода разрядом из облака заряженного аэрозоля существенно зависит от следующих факторов (рис. 10): 1) от соотношения радиусов моделей проводов и тросовых молниеотводов; 2) от гибкого или жесткого варианта выполнения моделей проводов и тросов – вероятность поражения модели гибкого провода существенно выше.

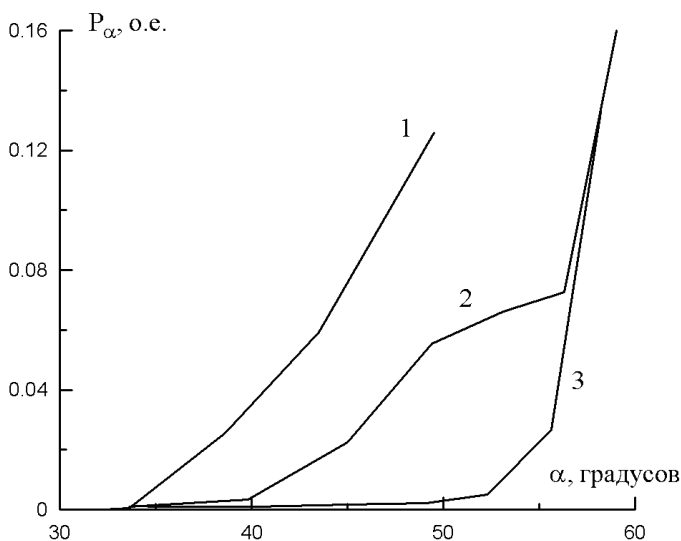


Рисунок 10 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля:

- 1 – вероятность поражения модели гибкого провода при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 1,0$ см),
- 2 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_m = r_{об} = 1,8$ см,
- 3 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,8$ см; $r_{об} = 1,8$ см)

Есть оптимальные размеры (радиус) модели тросового молниеотвода, при которых обеспечивается наибольшая эффективность защиты модели протяженного объекта (провода). Они находятся в диапазоне от 0,7 до 1,1 см. При таких размерах модели тросового молниеотвода коэффициент усиления и характер распределения электрического поля вблизи модели троса создаются наиболее подходящие условия для старта с него восходящего (встречного) лидерного разряда и, соответственно, выполнения своего назначения. В то же время наблюдается существенное уменьшение эффективности защитного действия модели тросового молниеотвода при выполнении моделей из гибкого провода по сравнению с их жестким неподвижным вариантом.

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 тросовым молниеотводом, используя действующие нормативные документы по молниезащите: Инструкцию по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87 [2], Инструкцию по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003 [3], Стандарт международной электротехнической комиссии МЭК 62305 Молниезащита [5], Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений [4].

Расчеты проводились при масштабировании условий эксперимента к расчетным характеристикам в соотношении 1:100.

В табл. 4 и 5 для сопоставления приведены экспериментальные результаты и расчетные данные, полученные по различным нормативным документам по молниезащите.

Таблица 4 – Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов определения вероятности поражения протяженного объекта разрядом (первая серия)

Эксперимент N	по [2]	по [3]	P_{α} (Эксперимент)
1	<0,005	0,001	0,0009
2	0,005<...<0,05	0,01<...<0,1	0,019
3	0,05<	0,01<...<0,1	0,056
4	0,05<	0,01<...<0,1	0,067
5	0,05	0,01<...<0,1	0,073
6	0,05<<	0,1<	0,16

Как уже отмечалось ранее, для модели тросового молниеотвода была установлена тенденция существенного роста вероятности поражения объекта после превышения углом защиты троса определенного значения. И для обеих

серий экспериментов наблюдается корреляция между экспериментальными и расчетными результатами в области углов защиты, не превышающих этого критического угла.

Таблица 5 – Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов определения вероятности поражения протяженного объекта разрядом (вторая серия)

Эксперимент N	по [2]	по [3]	P_α (Эксперимент)
1	0,005	0,001<	0,0009
2	<0,005	0,001	0,001
3	0,005	0,001<	0,002
4	<0,005	0,001	0,003
5	0,005<	0,01<...<0,1	0,006
6	0,05<	0,01<...<0,1	0,027
7	0,05<<	0,1<	0,133

Выполним еще одно сопоставление полученных экспериментальных результатов с расчетами вероятности прорыва молнии к фазным проводам ВЛ.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, то есть поражения фазного провода, может быть оценена в соответствии с опытом эксплуатации по эмпирической формуле

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_{оп}}}{A} - B, \quad (1)$$

где $A = 90$ и $B = 4$ – из анализа опыта эксплуатации линий 110-220 кВ; $h_{оп}$ – высота опоры, м; α – угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Для типовых ВЛ 110-750 кВ при положительных углах защиты троса (трос расположен ближе к оси опоры, чем провод) вероятность прорыва молнии на фазный провод рекомендуется определять по эмпирической формуле [4]:

$$P_\alpha = \exp \left[\frac{1}{D_U} \left(3,2 \frac{\Delta d}{\Delta h} \sqrt{\frac{h_{mp}}{\Delta h}} - \frac{9}{D_U} \right) \right]; \quad (2)$$

$$D_U = 1 + \frac{U_H}{100 \cdot \Delta h} \left(0,75 \frac{h_{mp}}{\Delta h} \frac{Q}{Q + Q_0} \right)^3; \quad (3)$$

$$Q_0 = 200 \left(1 + 0,1 \frac{U_H}{1000} \right); \quad (4)$$

$$Q = \frac{U_H}{\ln \frac{2h_{cp.np}}{r_{np}}}, \quad (5)$$

где U_n – номинальное напряжение линии, кВ; Δh – разность высот подвеса провода и троса на опоре, м; Δd – смещение троса и провода по горизонтали, м; h_{mp} – высота подвеса троса на опоре, м; r_{np} – радиус провода (для расщепленной фазы – эквивалентный радиус r_3), м; $h_{cp,np}$ – средняя высота подвеса провода, м.

Формула (2) «работает» при относительно небольших углах защиты троса. Поэтому при больших углах защиты будет использоваться при сопоставлении экспериментальных и расчетных результатов формула (1).

Рассчитанная зависимость вероятности поражения модели провода от угла защиты троса вместе с экспериментальными результатами показана на рис. 11.

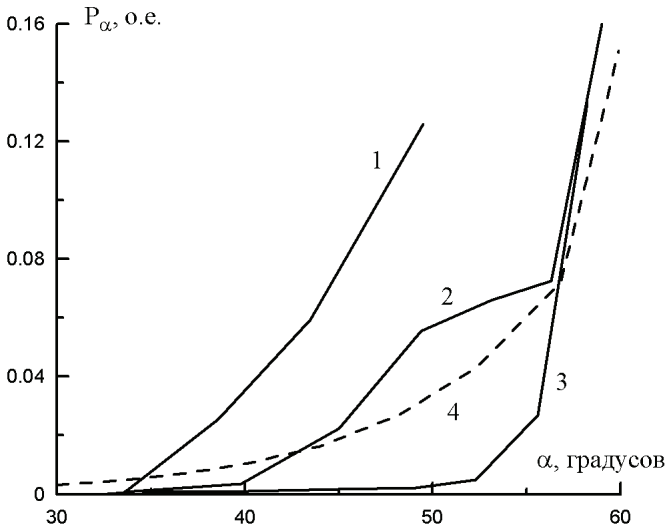


Рисунок 11 – Вероятность поражения модели протяженного объекта (фазного провода) разрядом из облака заряженного аэрозоля (молнией):

- 1 – вероятность поражения модели гибкого провода при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,4$ см; $r_{об} = 1,0$ см),
- 2 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_m = r_{об} = 1,8$ см,
- 3 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_m < r_{об}$ ($r_m = 0,8$ см; $r_{об} = 1,8$ см),
- 4 – вероятность поражения фазного провода, рассчитанная по (1) и (2)

При сравнении результатов, полученных в ходе расчета вероятности поражения объекта по эмпирическим формулам с экспериментально полученными результатами, можно отметить, что при одних и тех же углах, вероятность поражения защищаемого объекта, определенная экспериментально оказывается меньше для случая, когда используются жесткие провода и радиус модели тросового молниеотвода меньше радиуса провода. При этом кривая, отражающая экспериментальные результаты, на отдельных участках по-

вторяет ход расчетной кривой. Особенно это характерно для случая, когда радиусы моделей проводов и тросов равны.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процессов поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля и их сопоставление с существующими расчетными методами определения молниезащищенности объектов позволяют сформулировать следующее.

1) Проведенные экспериментальные исследования поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей протяженных объектов (проводов) и тросовых молниеотводов также показали, что есть оптимальный диапазон радиусов тросовых молниеотводов, при которых увеличивается эффективность их защитного действия. Этот оптимальный диапазон радиусов тросового молниеотвода, при котором обеспечиваются условия для старта с него встречного (восходящего) лидерного разряда, составляет от 0,6 до 1,0 см. Поэтому рекомендуется использовать в качестве тросового молниеприемника тросы (марки С70 или большего сечения) или сталеалюминиевые провода (марки АСК120 или АС50/50), которые параллельно еще будут решать проблему коррозионной стойкости тросов и стойкости к протеканиям токов короткого замыкания по тросам [16, 17].

2) Экспериментальные исследования процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей тросов и проводов показали возможность существенного изменения вероятности поражения модели фазного провода из-за несинфазного раскачивания моделей фазных проводов и молниезащитных тросов под действием электрического поля искусственного облака заряженного аэрозоля и разрядов из облака, когда модели были выполнены из гибких проводников. Причиной такого раскачивания было силовое взаимодействие зарядов облака и разрядов из него с зарядами, наводимыми на моделях проводов и тросов. Раскачка моделей проводов и тросов значительно увеличивала вероятность поражения модели фазного провода (амплитуда колебаний моделей проводов доходила до 7 см, что соответствует 10 м в реальных пролетах ВЛ), в ряде случаев на несколько порядков.

Таким образом, раскачка проводов и грозозащитных тросов может изменить защитные углы тросовой грозозащиты, и фазные провода могут поражаться молнией гораздо чаще из-за противоположного отклонения троса и провода в пролете линии электропередачи. По оценкам [18-20] силы, действующие на провода и тросы со стороны электрических полей грозовых облаков и разрядов молнии из них, могут быть соизмеримы с весом провода и воздействием на провод ветровой нагрузки со скоростью более 20 м/с. Особенно этот эффект может проявиться при мощных продолжительных грозах, когда есть многоударные вспышки молнии, которые длятся несколько секунд, а само грозовое воздействие длится десятки минут. Поэтому рекомендуется при проведении расчетов вероятности поражения фазных проводов ЛЭП учиты-

вать возможность изменения угла защиты троса за счет несинфазного раскачивания проводов и тросов, выбирать и обеспечивать такое соотношение между механическими характеристиками фазных проводов и грозозащитных тросов (натяжение, длина пролета, марка и сечение, стрела провеса, учет климатических факторов), при котором будет раскачивание проводов и тросов под воздействием внешних сил наиболее близкое к синфазному.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования и физическое моделирование процессов поражения молнией моделей протяженных объектов для исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков. Экспериментально определены 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 проводов и тросов) на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля и размер зоны защиты молниеотвода.

Установлена общая тенденция: при превышении определенного угла защиты модели тросового молниеотвода (от 32 градусов для гибких моделей проводов и тросов до 50 градусов для жестких моделей проводов и тросов) наблюдается существенный рост вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень быстро уменьшается по объему, то есть он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту провода от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля). При углах защиты модели тросового молниеотвода менее 30° во всех случаях наблюдается снижение вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля до уровня менее 0,001.

Экспериментальные результаты показали, что вероятность поражения модели провода разрядом из облака заряженного аэрозоля существенно зависит от соотношения радиусов моделей проводов и тросовых молниеотводов и от варианта выполнения моделей проводов и тросов (гибкого или жесткого). Как и в случае моделей сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов найдены оптимальные размеры (радиус) модели тросового молниеотвода, при которых обеспечивается наибольшая эффективность защиты модели протяженного объекта (провода): от 0,7 см до 1,1 см. В то же время наблюдается существенное уменьшение эффективности защитного действия модели тросового молниеотвода для случая выполнения моделей из гибкого провода по сравнению со случаем их выполнения в жестком неподвижном варианте из-за несинфазного раскачивания моделей проводов и тросов под действием электрического поля облака заряженного аэрозоля и разрядов из

него.

Выполнено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты различных энергетических объектов, используя действующие нормативные документы по молниезащите.

Для модели тросового молниеотвода была установлена тенденция существенного роста вероятности поражения объекта после превышения углом защиты троса определенного значения, и наблюдается корреляция между экспериментальными и расчетными результатами только в области углов защиты, не превышающих этого критического угла.

Список литературы: 1. *P. Laroche* Recent progress and open questions on the physics of lightning // Proceedings of 13th International Conference on Atmospheric Electricity. – Beijing, China, 2007. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО – 153 – 34.21.122-2003. – М.: МЭИ, 2004. 4. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. – С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 5. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning – Part I: General principles. 2005. 6. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 7. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. – Cambridge University Press, 2003. 8. *M.R. Bank Tavakoli, B. Vahidi* Shielding failure rate calculation by means of downward and upward lightning leader movement models: Effect of environmental conditions // Journal of Electrostatics. – 68 (2010). – P. 275-283. 9. *L. Arevalo, V. Cooray* ‘The mesh method’ in lightning protection standards – Revisited // Journal of Electrostatics. – 68 (2010). – P. 311-314. 10. *V. Rakov* A Review of Triggered-Lightning Experiments // Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection. – Cagliari, Italy, 2010. 11. *C. Vouqueneau* A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. – 65 (2007). – P. 395–399. 12. *Александров Г.Н.* Физические основы моделирования разрядов молнии при лабораторных исследованиях молниезащиты // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. – Новосибирск, 2007. – С. 63-70. 13. *Гайворонский А.С., Овсянников А.Г.* Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. – Новосибирск, 2007. – С. 85-90. 14. *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. 15. *Темников А.Г., Орлов А.В., Соколова М.В., Синкевич О.А., Фирсов К.Н., Васильяк 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. 16. *В.И. Кузнецов, В.Н. Осотов, А.И. Цыткин, Ю.А. Коржавин, Ю.А. Фоминых* О старении и эксплуатационном ресурсе проводов и тросов воздушных линий электропередачи // Электрические станции. – № 4. – 1994. 17. *А.И. Цыткин, О.Г. Шишкина, А.М. Коротаев* О грозозащите ВЛ 110-500 кВ в Свердловэнерго // Электрические станции. – № 5. – 1992. 18. *Дьяков А.Ф., Макальский Л.М., Никитин О.А., Орлов А.В., Темников А.Г.* Возможные причины поражения линий электропередач сверхвысокого напряжения разрядами молнии // Депонированная Рук. Информэлектро №25-ЭТ94, 1994. 19. *Temnikov A.G., Makalsky L.M., Nikitin O.A., Orlov A.V.* The possible mechanism of the lightning break toward the transmission line wires // Proceedings, 22nd Intern. Conf. on Lightning Protection. – Budapest, Hungary, 1994. – R6b-07. 20. *Temnikov A.G., Makalsky L.M., Orlov A.V.* Possible mechanism of lightning strokes to extra-high-voltage power transmission lines // J. of Electrostatics. – 37. – 1996. – P. 249-260.

Поступила в редколлегию 24.10.2011