

## ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Троицкий О. А., Рябов Ю. Г., Ермаков К. В.

*НПП «Институт ЭПДМ»,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
[ootroitsky@rambler.ru](mailto:ootroitsky@rambler.ru)*

Существует три основных вида молний: линейные, четочные и шаровые. К этому классу явлений относятся также коронный разряд («огни Святого Эльма»), разного рода газовые разряды (несамостоятельный, самостоятельный, тлеющий и дуговой), северное сияние трех видов (полос и дуг диффузного рассеянного свечения; короны и драпри, а также сполохов и языков), «электронный ветер» от Солнца в сторону Земли и другие явления (рис.1). Можно считать, что молнии, а также другие указанные электрические явления в близком окружении Земли являются периодическими прорывами к Земле и к ее термосфере основного вещества Вселенной – плазмы [1].

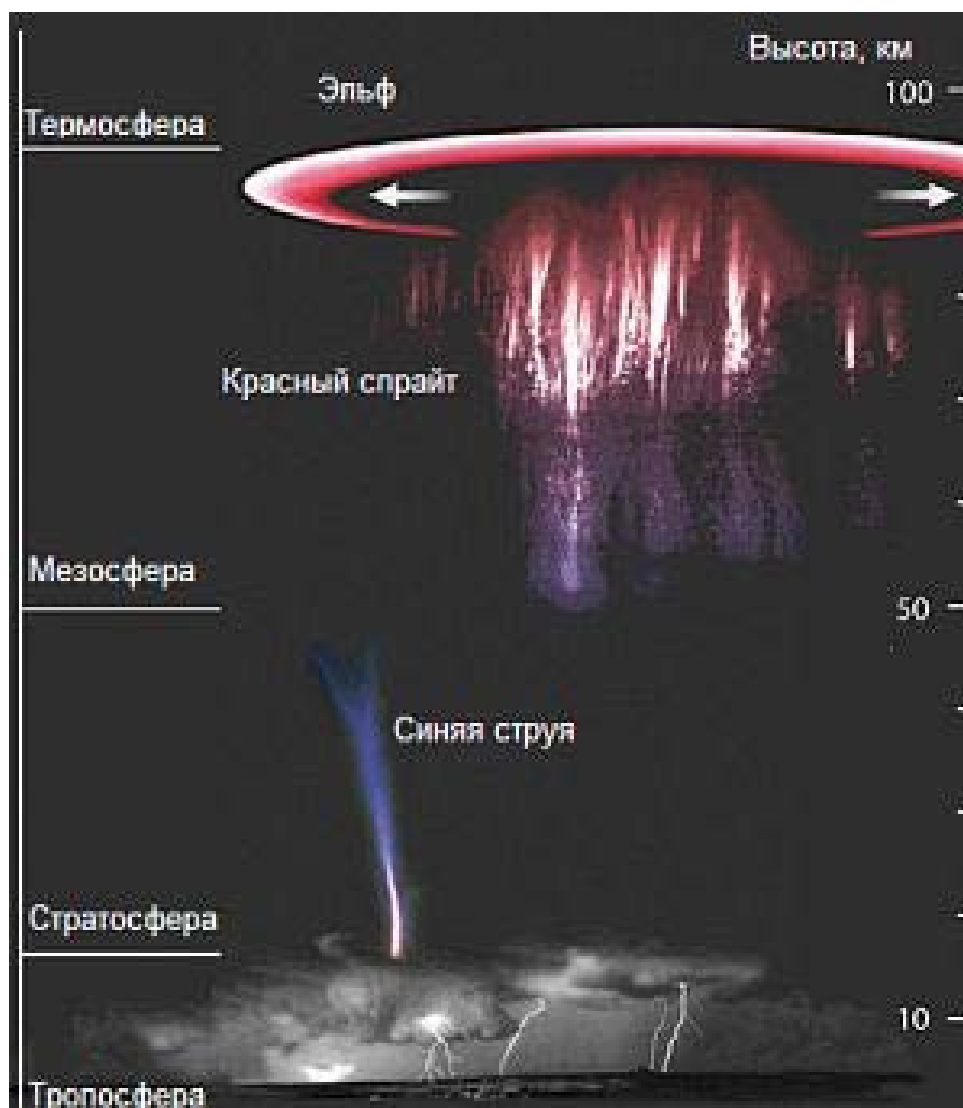


Рис. 1. Электрические явления вокруг Земли

В предгрозовых условиях облака в нижней части на 80% заряжаются отрицательным электричеством. Это вызывает между ними и Землей появление электрического поля (ЭП) высокой напряженности  $E = 8-30$  кВ/м, которое индуцирует, в свою очередь, на поверхности

Земли заряды противоположного знака. После этого от облака ступенями начинает двигаться и развиваться нисходящий «лидер», подготавливающий канал будущей молнии путем его ионизации. В это же время на Земле на площади примерно  $1,0-2,0 \text{ км}^2$  под облаками и, преимущественно, на высотных объектах под действием высокого напряжения  $U = h \cdot E$  (где  $h$  – высота объекта) возникает коронный разряд, из которого может возникнуть и развиваться восходящий «лидер», который также продвигается ступенчатым образом, но только снизу вверх. Восходящие «лидеры» могут начинаться и от основания зданий. Их длина может достигать сотен и даже тысяч метров, пока они не встретятся с ниспадающими «лидерами» или напрямую с облаками. «Лидерные» разряды, таким образом, бывают ниспадающие и восходящие. Они приближаются друг к другу со стороны грозовых облаков и от Земли толчкообразно, ступенями и зигзагами, нащупывая пути легкой ионизации воздуха. Периодические остановки «лидеров» объясняются тем, что лавина ионизированного воздуха периодически выдыхается по энергии и истощается. Однако в общем электрическом поле за счет высасывания зарядов из объема туч вновь происходит усиление электрического поля в голове затормозившихся «лидеров», вновь возникает локальная концентрация электрического поля, что сопровождается ультрафиолетовым излучением, а также слабым рентгеновским излучением и возобновляет процесс ионизации воздуха. Ступенчатый стреловидный «лидер» вновь начинает движение с высокой скоростью, но уже в несколько ином направлении, в котором двум указанным факторам энергетически легче продолжать готовить плазменный канал будущей молнии. Небольшие отклонения от прежнего направления движения «лидера» могут происходить по причине конвективных потоков воздуха, неизбежных в грозовых условиях. Некоторые направления по сложившимся физическим условиям становятся для «лидера» тупиковыми. Тогда он прорывается в другом направлении, вновь индуцируя впереди себя мощное электрическое поле и два указанных излучения. Так «лидер», периодически останавливаясь на сотые и десятые доли секунды и вновь начиная движение с высокой скоростью порядка  $10^7 \text{ м/сек}$ , достигает какого-либо объекта на поверхности Земли или поверхности воды, либо, наконец, встречается с восходящим «лидером». С бока высотного объекта путем образования плазменного отростка может сформироваться мощный боковой восходящий «лидер». После встречи нисходящего и восходящего «лидеров» или по плазменным каналам отдельных «лидеров» начинается процесс быстрой нейтрализации зарядов, накопленных в облаках путем разряда молний. Сила тока каждой молнии может достигать значений в миллион ампер, но большей частью, это сотни кА. Длительность разряда молнии составляет примерно 100 мкс. Вслед за первым мощным импульсом тока по готовому плазменному каналу следуют без остановки несколько вторичных разрядов меньшей амплитуды, всего до 50 молний. Все молнии двигаются также зигзагами, повторяя путь ступенчатых «лидеров», расширяя лишь в десятки раз диаметр плазменного канала. Молнии могут быть как нисходящими, если их основной «лидер» развивался от облака к Земле, так и восходящими, если их «лидер» развивался со стороны Земли к облакам. При этом, чем выше высота объекта, тем заметнее доля восходящих молний. Так, например, если среди ударов в объект высотой 200 м доля восходящих молний составляет около 50%, то для Останкинской телебашни (высота которой составляет 540 м) их доля увеличивается до 90%. Это обусловлено тем, что во время грозы при напряженности ЭП  $5 \text{ кВ/м}$  потенциал на вершине башни составляет величину  $Un = 5 \text{ кВ/м} \cdot 540 \text{ м} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ В}$ . Это приводит к стягиванию зарядов с окружающей башню площади Земли (обычно радиуса, равного высоте самой башни) и к формированию мощного заряда восходящей молнии.

Пинч-эффект является причиной возникновения так называемых четочных молний (рис.2) [ 1 ].



Рис. 2. Четочная молния.

Это более редкое явление, чем линейные и шаровые молнии. По свидетельству очевидцев (опрос проведен NASA), это особая форма линейной молнии, которая по каким-то причинам распадалась на глазах наблюдателей на крупные фрагменты или бусинки – ряд светящихся, выстроенных в ряд областей, разделенных темными перетяжками. Яркий канал линейной молнии виден, как известно, за много километров. Также далеко видна четочная молния. По нашим предположениям, четочная молния – это пережатая местами линейная молния за счет пинч-эффекта (ПЭ), его разновидностью  $\Theta$ -пинч-эффектом, показанным на рис 3 [ 1 ].

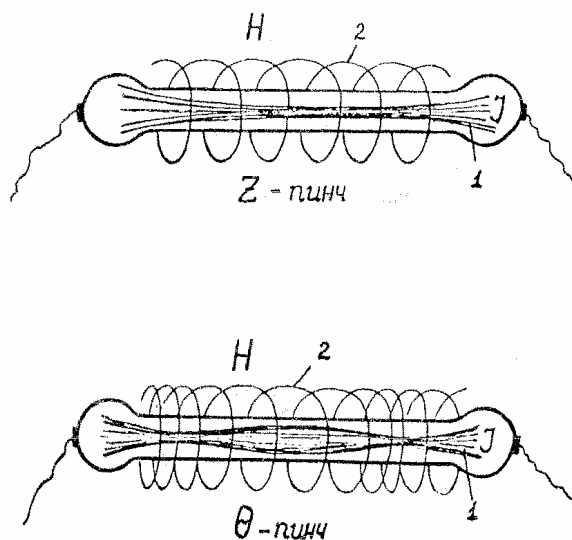


Рис. 3. Z- и  $\Theta$ -пинч-эффекты.

1 – линии тока; 2 – линии магнитного поля.

Существует два вида пинч-эффекта, показанные на рис.3: Z- и  $\Theta$ - ПЭ. Пинч-эффект действует на металлические элементы систем молниезащиты (МЗ) при экстремальных проявлениях молниевых разрядов (МР). Характерные результаты этих экстремальных проявлений необходимы для оценки надежности, порога пластической деформации металлических элементов конструкции МЗ и установления наличия побочных эффектов, которые могут привести к снижению заявленного ресурса конструкции.

Авторами моделировалось действие  $\Theta$  – пинч-эффекта на плазму твердого тела в лабораторных условиях на металлических образцах, имея в виду то, что проводимость плазмы металла имеют одинаковый порядок величины. Длительность импульсов тока  $10^{-4}$  сек, равную времени жизни одной молнии, легко создавать в лабораторных условиях. Амплитуда тока  $I_m$  составляла

величину от 200 кА до 1000 кА, или по плотности тока, имея в виду диаметр столба молнии 40–50 см, амплитудное значение плотности тока  $J_m$  должно составлять величину  $(2-5) \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>, что также легко реализовать в эксперименте на металлических образцах.

В результате проведенных экспериментов на двойных образцах, имеющих деформируемую и недеформируемую часть, было установлено, что под влиянием пинч-эффекта (действия собственного магнитного поля тока, охватывающего проводник), происходит оттеснение электронов проводимости и линий тока от поверхности вглубь металла, как показано на рис.3а.

Возникающие при этом значительные механические напряжения, обусловлены влиянием поперечного поля Холла на ионный остов решетки. Они действуют в радиальном направлении и вызывают упругие колебания образца. Это, в свою очередь, вызывает интенсификацию и скачки пластичности металла даже если импульсы тока пропускаются в недеформируемой части двойного образца. Таким образом, пондеромоторный пинч-эффект импульсного тока существует в плазме твердого тела и даже вызывает пластическую деформацию металла, поскольку возникающие механические напряжения в металле в радиальном направлении достигают значений, превышающих предел текучести металла.

Оценим и сопоставим величину напряженности  $H$  собственного магнитного поля молнии с модельными опытами на пластичном металле, используя формулу  $H = 2I_m/10R$ , где  $I_m$  – ток молнии максимальных значений, достигающий величины  $10^6$  А, и  $R$  – радиус канала молнии 0,2–0,6 м (для расчетов принимаем 0,2 м). Подстановка численных значений дает для напряженности максимального значения  $H = (0,8-1,0) \cdot 10^6$  А/м или примерно  $10^4$  эрстед. Давления  $p$ , возникающие в радиальном направлении, под влиянием пинч-эффекта определяются по формуле  $p = 1,6 \cdot 10^2 \mu (J_m R)^2$  или  $p = \mu H^2 / 8\mu$ , где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, равная примерно единице, и  $J_m$  – амплитудная плотность тока в канале молнии, равная примерно  $8 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Подстановка численных значений дает величину давления  $p$  со стороны собственного магнитного поля молнии на поверхность плазменного канала  $4 \cdot 10^{13}$  дин/см<sup>2</sup>, что достаточно для сжатия плазменного канала. Указанная величина, полученная нами расчетом, значи-

тельно превышает силу поверхностного натяжения вещества молнии  $\sigma$ , равную, по данным разных авторов, примерно 5 дин/см или  $5 \cdot 10^3$  Н/м<sup>2</sup> [3,4]. Очевидно, что при  $p \geq \sigma$  возможна перетяжка плазменного канала молнии, чем можно объяснить возникновение четочной молний, показанной на рис.2.

Как известно, струи поверхностной плазмы Солнца перетекают через силовые линии собственного магнитного поля, как через препятствия, оказывая на них давление и выталкивая магнитное поле, что, как известно, вызывает электромагнитное излучение (ЭМИ), доходящее до Земли [2–5]. Аналогичные процессы происходят при ударе и растекании молнии на Земле, как показано на рис.4.



**Рис.4.** Развитие искрового канала на грунте при молниевом разряде.

При этом возникают искровые разряды вдоль коммуникаций, «разлив» и дробление зарядов. Возникшие в последнее время новые подходы к решению проблемам внешней молниезащиты, включают в себя следующие мероприятия и действия материаловедческой направленности.

1. Установка «конкурирующих» молниеприемников (МП), которые позволяют надежно отвести последующие за главным МР менее мощные МР. Конкурирующие МП рекомендуется устанавливать на границах зон защиты, оцененных по методу защитных углов или катящейся сферы, приведенных в нормативных документах, а также в «благоприятных» местах на высотных объектах.

2. В случаях дорезонансных высот объектов рекомендуется применять МП рассеивающего типа «кактус» (DAS), создающего условия препятствования развитию коронного разряда вверх. Многочисленные иглы МП дробят восходящий разряд, излучая в окружающее пространство ток не более 1мкА, что меньше, чем требуется для развития коронного разряда и, соответственно, для появления встречного «лидера». Нисходящий ступенчатый или стреловидный «лидеры» такой МП не замечают, несмотря на большую высоту объекта, т.к. его многочисленные иглы нейтрализуют заряд, вызванный высоким потенциалом  $U_n = hE$ , и действуют подобно нейтрализатору статического электричества, применяемому в промышленности во многих технологических процессах. Одна из компаний США уже несколько десятилетий успешно применяет подобные системы под названием «Dissipation Array System (DAS)» на объектах в дорезонансных высотах.

3. После стержневого либо тросового МП все отводящие МР шины должны выполняться в форме гусиной лапки с предотвращением изгибов под большими углами, чтобы избежать деформаций и разрушений под действием пондеромоторных сил тока молнии. Шины, соединенные под прямым углом во всех элементах МЗ, должны иметь дополнительные крепления и закругления с обеих сторон угла по тем же причинам, а также во избежание паразитных ис-

крений, вызванных высокой скоростью нарастания тока ( $dI_m/dt$ ) и высоким потенциалом пондеромоторных сил коммутационных устройств.

4. Для снижения деструктивных действия тока молний целесообразно применять в качестве молниеводного токоотвода медный толстый провод – катанку в стальной трубе. Целесообразно применять также металлическое остекление зданий, что уменьшает вероятность коммутационных процессов во время грозы.

5. Существующие в России конструкции внешней МЗ не отвечают современным требованиям по отводу токов молний. Импульсные токи молний за счет действия пинч-эффекта и пондеромоторных сил вызывают деформацию и разрушение токопроводящих материалов, нарушают контакт с почвой вертикальных и горизонтальных заземлителей, разрушают сами заземлители, особенно в местах их соединений с токоотводами. Рекомендуется поэтому, помимо указанных выше мощных медных токоотводов в стальных трубах, применять засыпку места контакта с почвой смесью отожженных металлических опилок и угля.

6. Эффективность системы МЗ, как известно, проверяется ежегодно по критериям параметров заземления. Однако этого не достаточно, т.к. параметры заземления могут быть в норме, а защищаемый объект, например, резервуар нефтеперерабатывающей станции (НПС), к которому подходят трубы, металлоконструкции, кабельные цепи и прочие проводящие коммуникации, могут иметь значительно лучшие параметры заземления. В этом случае основной защищаемый объект будет стягивать на себя заряды с большой площади Земли и создавать благоприятные условия для развития встречного лидера МР. Конкурирующие физические процессы могут вызывать удар молнии прямо в резервуар если не первой компонентой МР, то более вероятно последующими компонентами МР. Такая вероятность не упоминается и не обсуждается ни в одной из национальных программ МЗ и не содержится в нормативных документах (НД).

Приведенные результаты исследований и анализ проблем молниезащиты в случае их использования в практических целях позволят снизить вероятность прорыва молниеводного разряда (МР) в коммутации защищаемых объектов путем применения конкурирующих и рассеивающих молниеприемников, поглощающих заземлений и токоотводов, учета возникновения и действия пинч-эффекта и пондеромоторных сил тока молний во время МР с целью избежания процессов деградаций и разрушений систем МЗ. Рекомендации по организации контроля за условиями прорыва МР и возникновения сопутствующего электромагнитного излучения (ЭМИ) позволят защитить гражданские и военные объекты, а также персонал от действия указанных факторов. Необходимо проведение цикла НИОКР материаловедческой направленности для решения указанных проблем прочности и надежности внешних систем молниезащиты.

## Список литературы

1. О.А.Троицкий, Молнии - оружие богов, М.1998г,РИЦ Информэлектро, с.56
2. А.Б. Прищепенко, Взрывы и волны (взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона), Изд. «БИНОМ»Лаборатория знаний,М.2008г,208 с
3. И.П. Стаханов, Физическая природа шаровых молний, М., Атомиздат,1979,240 с.
4. Б.М. Смирнов, Шаровая молния – что же это такое, ж Природа, 1987 г, №2, с.17-28.
5. Ю.Г. Рябов, Ю.И. Бочков. «Реализация экранирования трансформаторных п/станций, встроенных в здания» «Технологии ЭМС», №2(9), 2004, стр.45-50.