

7. Vereschagin I.P., Koshelev M.A., Makalskiy L.M., Syssoev V.S. Preliminary results of the application of the generator of the charged aerosol for the modeling of atmospheric discharges. Proc. 3d All-Russian Symposium on Atmospheric Electricity, Tartu, 1986. L.: Gydrometeoizdat, 1988, pp.119-123.
8. Antsupov K.V., Vereschagin I.P., Koshelev M.A., Lupeiko A.V., Makalskiy L.M., Syssoev V.S., Chernov E.N. The study of spark discharges from the cloud of charged aerosol particles. Izv. AN USSR, Energetics and Transport, 1990. N4, pp.158-162.
9. Temnikov A.G., Orlov A.V., Chernensky L.L., Pisarev V.P. Effect of model hydrometeors on the development of discharge from an artificial cloud of charged aqueous aerosol. Technical Physics Letters, 2007. Vol. 33, No. 5, pp. 441-443.
10. Gorin B.N., Shkilev A.V. The development of electrical discharge in long gaps rod-plane with a negative voltage pulse. Elektrichestvo, 1976, N6, pp.31-39,
11. Biagi, C. J. Uman, M. A. Hill, J. D. Jordan, D. M. Rakov V. A., and Dwyer J. Observations of stepping mechanisms in a rocket-and-wire triggered lightning flash. JGR, 2010, V. 115, D23215.
12. Petersen, D. Bailey, M. Beasley, W.H. and Hallett J. A brief review of the problem of lightning initiation and a hypothesis of initial lightning leader formation. Journal of Geophysical Research, V. 113, D17205, 2008.
13. Evtushenko A.A., Mareev E.A. Simulation of chemical perturbation in mesosphere caused by sprite. Radiophys. Quantum Electron. 2011. № 2. P. 123–140.
14. Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere. J. Atmos. Terr. Phys. 2013. Vol. 102. P. 298–310.
15. S. V. Anisimov, E. A. Mareev, N. M. Shikhova, M. V. Shatalina, S. V. Galichenko, S. S. Zilitinkevich, Aeroelectric structures and turbulence in the atmospheric boundary layer. Nonlin. Processes Geophys., 20, 819–824, 2013.
16. Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Kalinin A.V., Zhidkov A.A. Influence of Large-scale Conductivity Inhomogeneities in the Atmosphere on the Global Electric Circuit. J. Atmos. Sci. 2014 (submitted).
17. Williams E. and E. Mareev. Recent progress on the global electrical circuit. Atm. Res., 2014, 135-136, pp. 208-227.
18. Klimenko V.V., Mareev E.A., Shatalina M.V., Shlyugaev Yu.V., Sokolov V.V., Bulatov A.A., Denisov V.P. On the statistical characteristics of electric fields of thunderstorm clouds in the atmosphere, Radiophys. Quantum Electron. 2013. № 11-12. P. 856–874.
19. Bogatov N.A. Study of threshold characteristics of the discharge on aerosol particles. Radiophys. Quantum Electron. 2013. № 11-12. P. 921-931.

**С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков**

## **ОРИЕНТИРОВКА МОЛНИИ И МОЛНИЕЗАЩИТА ПО Г.Н. АЛЕКСАНДРОВУ**

В основу инженерных методов молниезащиты положено понятие зоны защиты молниеотводов. Задача проектировщика – расположить объект внутри зоны защиты, куда вероятность прорыва молнии  $p$  мала, а объект защищен с надежностью не менее  $P_h=1-p$ .

Зоны защиты молниеотводов в России определены РД 34.21.122-87 (далее РД) и СО-153-34.21.122-2003 (далее СО). Скорее всего, они требуют сокращения (или снижения уровня надежности) в свете работ Г.Н. Александрова [1], экспериментов В.М. Куприенко [2] и А.С. Гайворонского [3,4], резонансных аварий на объектах Транснефти. Результаты В.М. Куприенко отражены в нормативах ВСП 22-02-07/МО РФ/ (далее ВСП).

Каким бы способом не строились зоны защиты, они не позволяют определить реальную надежность молниезащиты и «толкают» проектировщика на затратные

решения. Пусть часть объекта не попадает в зону защиты. Проектировщик будет двигать молниеотводы, увеличивать высоту или их количество, что ухудшит электромагнитную обстановку и потребует дополнительных затрат при реконструкции объекта. Поэтому при выборе молниеотводов следует опираться на расчеты вероятности прорыва и числа прорывов молнии, а зоны защиты молниеотводов и ориентировки молнии рассматривать как способ визуализации решения.

**Метод катящейся сферы (МКС)** – рекомендуемый МЭК (как универсальный) метод построения молниезащиты. Объект с молниеотводами «обкатывается» сферой заданного радиуса и считается защищенным, если его не касается сфера радиусом  $R=20,30,45,60$  м для 1,2,3,4 категорий молниезащиты объекта или  $R=10 \cdot I^{0.65}$  в общем случае, где  $I$  – максимальный ток молнии. «Обкатывая» молниеотводы (без объектов), получаем зоны защиты. Таким образом, имеем простой расчетный метод, принятый в большинстве стран. К недостаткам МКС в иностранной литературе обычно относят упрощенность выбора радиуса  $R$ , завышенную вероятность боковых прорывов и избыточную надежность молниезащиты. Серьёзные возражения к МКС высказаны Э.М. Базеляном [5,6]. Обратим внимание еще на одну характеристику этого метода – он не учитывает взаимное влияние молниеотводов. Например, зона защиты двух молниеотводов не более суммы зон защиты каждого из них. Пусть высота молниеотводов равна радиусу сферы  $R=h$ . Тогда зона защиты двух молниеотводов на уровне земли равна  $2h$ , что существенно меньше аналогичных величин  $4h-6h$ , принятых в российских нормах. В результате объекты с многократными молниеотводами (нефтехранилища, прежде всего), спроектированные по российским нормам, окажутся незащищенными от молний с малыми токами. Можно согласиться с [5], что переход к МКС приведет к дискредитации отечественного опыта молниезащиты, но можно не сомневаться, что в условиях гармонизации российских и международных стандартов, без конструктивных предложений с российской стороны внедрение данного метода лишь дело времени. В этой связи несомненный интерес представляют идеи Г.Н. Александрова к расчетным методам молниезащиты с учетом наведенного заряда защищаемого объекта [1].

**Молниезащита по Г.Н. Александрову.** Пусть заряд молнии сосредоточен в окончании лидера. Часть силовых линий заряда лидера замыкается на землю, остальные замыкаются на объекте с молниеотводами, создавая наведенный заряд. Предполагая равную вероятность развития молнии в направлении каждой силовой линии, вероятность поражения объекта с молниеотводами равна

$$p = -Q/q, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд лидера,  $Q$  – наведенный заряд на объекте с молниеотводами (знак наведенного заряда противоположен знаку  $q$ ). Эту модель ориентировки молнии будем называть электростатической моделью.

Отсюда новый подход к построению зоны ориентировки молнии из условия  $p=\text{const}$  (зона равновероятного появления лидера молнии – в оригинал). Для однозначного построения одна (любая) точка поверхности  $p=\text{const}$  должна быть задана. Располагаем ее над молниеотводом на расстоянии, равном длине стримерной зоны (в оригинал 22-45 м с типичным значением 33 м). Для сопоставления с методом катящейся сферы будем принимать это расстояние равным  $R$ . Поверхность ориентировки молнии получается сложной формы, индивидуальной для каждого объекта, но после того как она построена имеем простую методику расчета вероятности прорыва молнии к объекту. Точки зоны ориентировки, расположенные ближе к объекту, чем к молниеотводам или земле, образуют зону прорыва молнии к объекту. Отношение

площади зоны прорыва к площади зоны ориентировки дает вероятность прорыва. Таким образом, вместо плоскости ориентировки, занижающей вероятность боковых прорывов, или сопряжения сфер (в МКС), их завышающих, имеем априорно не заданную поверхность ориентировки, подлежащую расчету и индивидуальную для каждого объекта.

Понятно, что аналитические методы, использованные в [1], применимы лишь для модельных задач. Для построения поверхности ориентировки и ответа на вопрос о влиянии наведенного заряда объекта на вероятность прорыва молнии на реальных объектах потребуется многократный расчет трехмерного электрического поля с лидером молнии в десятках тысячах пробных точек. Вероятно поэтому, вопрос о реализуемости метода оставался открытым.

**Целью настоящей работы** является изучение и численная реализация метода расчета молниезащиты по Г.Н. Александрова, практическое применение для реальных объектов; сравнение новых результатов с аналогами, полученными по методу катящейся сферы и российским нормам.

**Численная реализация метода Г.Н. Александрова.** Для нахождения зарядов в (1) запишем матричное уравнение

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{B} \cdot q = 0,$$

где  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица потенциальных коэффициентов между элементами объекта с молниеотводами,  $\mathbf{B}$  – вектор-столбец взаимных потенциальных коэффициентов между лидером молнии и объектом с молниеотводами,  $q$  – заряд лидера (скаляр), элементы объекта и молниеотводы имеют нулевой потенциал. Отсюда вектор наведенного заряда равен

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot q.$$

Подставляя его в (1) получим

$$p = \frac{-\sum_{i=1}^N Q_i}{q} = \sum_{i=1}^N \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^N A_{j,i}^{-1} \right) B_j = \sum_{i=1}^N C_i B_i = \mathbf{C} \cdot \mathbf{B}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_N)$  – вектор-строка,  $i$ -ый элемент которого равен сумме  $i$ -го столбца матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$ ,  $N$  – число элементов дискретизации объекта с молниеотводами. Элементы

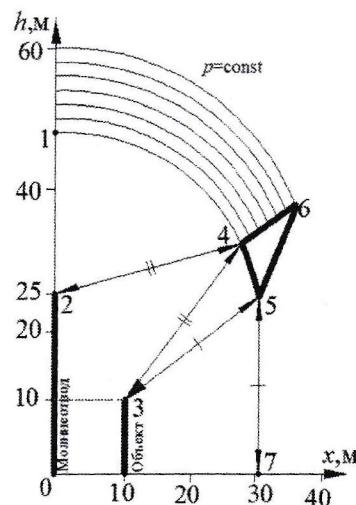


Рис. 1. К определению вероятности прорыва молниезащиты

вектора  $\mathbf{C}$  имеют смысл емкостных коэффициентов (коэффициентов электростатической индукции), их величины не зависят от положения лидера молнии, поэтому вектор  $\mathbf{C}$  вычисляется один раз, что обеспечивает эффективность расчета (2) при многократных изменениях положения лидера молнии. Аналогичные (2) выражения получаются для любых моделей молнии при условии априорно заданного распределения плотности заряда.

**Пример.** Пусть лидер молнии с вероятностью (2) сориентировался в плоскость объекта. В детерминированной модели пробоя лидер замкнется на ближайший элемент молниезащиты, поверхности земли или объекта. Но куда? Двигаясь по линии  $p=\text{const}$  (рис.1) видим, что на участке 1-4 ближайшей точкой является вершина молниеотвода, на участке 4-5 ближайшей точкой является вершина объекта (стержня), который будет поражен

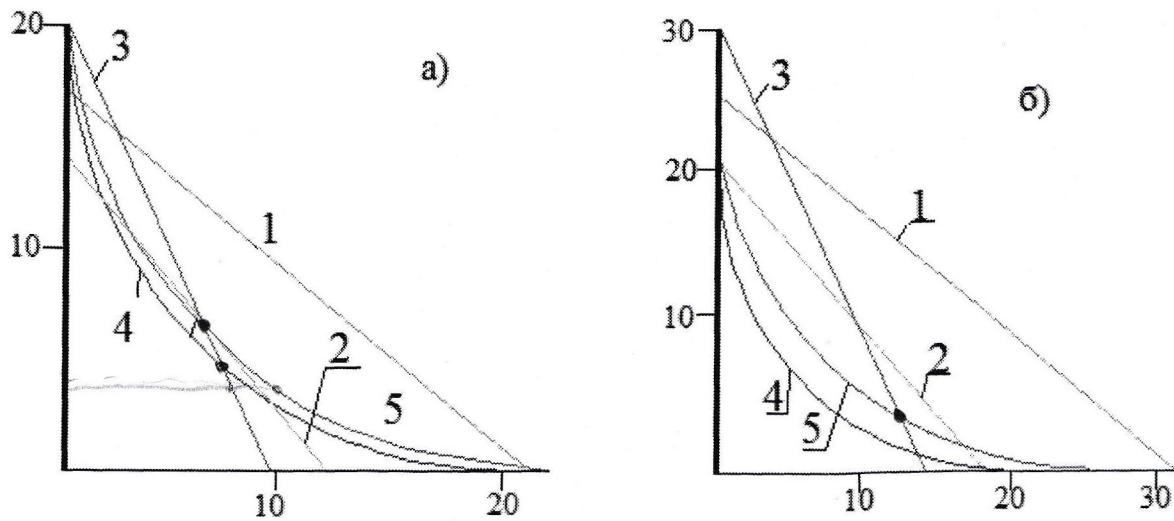


Рис. 2. Зоны защиты стержневого молниеводителя высотой а) 20 метров, б) 30 метров: 1) РД при  $P_H=0,999$ ; 2) СО при  $P_H=0,999$ ; 3) ВСП при  $P_H=0,99$  для объекта площадью  $0,5 \text{ м}^2$ ; 4) МКС при  $P_H=0,99$ ,  $R=20 \text{ м}$ ; 5) метод Александрова,  $R=20 \text{ м}$

молнией. Далее, ближайшей точкой для лидера становится поверхность земли. Вероятность прорыва молнии к объекту равна отношению площади поверхности с контуром 4-5 к общей площади поверхности равной вероятности поражения [1]. С увеличением длины стримера (радиуса поражения) вероятность прорыва защиты уменьшается (рис.1), т.е. молния с большим током имеет меньше шансов прорваться к объекту и скорее будет перехвачена молниеводителем. Для прорыва молниезащиты опасны молнии с относительно малым током. Треугольник 456 (рис.1) определяет опасное положение лидера молнии, приводящее к поражению объекта.

**Одиночный молниеводитель.** Сопоставим зоны защиты одиночного стержневого молниеводителя, полученные разными способами (рис.2). Среди российских норм наибольшую зону защиты дает РД, далее СО, наименьшую зону – ВСП. По объему зоны защиты МКС самый жесткий метод, применение которого ведет к избыточной надежности. Для нас важно, что метод Александрова (во всех решенных задачах) занимает промежуточное положение между МКС и российскими нормами. По РД и СО зона защиты начинается ниже вершины молниеводителя, по ВСП – совпадает с вершиной. В МКС и методе Александрова возможны оба варианта: из вершины при  $R>h$  (рис.2а) и ниже вершины при  $R<h$  (рис.2б), где  $R$  – радиус сферы,  $h$  – высота молниеводителя.

**Двойной молниеводитель.** Сопоставим зоны защиты двойного стержневого молниеводителя, полученные разными способами (рис.3). Среди российских норм ВСП вновь дает наименьшую зону защиты по сравнению с РД и СО. Зоны защиты по МКС самые узкие, они не изменились по сравнению с одиночным молниеводителем, что противоречит экспериментальным данным. Таким образом, МКС не учитывает взаимное влияние молниеводотов, поэтому его применение для объектов с многократными молниеводами некорректно. В методе Александрова взаимное влияние молниеводотов (и других заземленных предметов на территории объекта и вне ее) учитывается взаимными потенциальными коэффициентами в (2). В результате зона защиты (рис.3, кривая 5) заметно отличается от зоны защиты по МКС и хорошо коррелирует с ВСП.

Будем увеличивать расстояние  $l$  между молниеводами (рис.3). Двойной молниевод распадается на два одиночных при:  $l=4h$  по РД и ВСП,  $l=4.25h$  по СО. Зоны защиты молниеводов по ВСП не будут пересекаться уже при  $l=2h$  (рис.3), однако взаимное влияние учитывается, поскольку угол защиты больше угла для одиночного

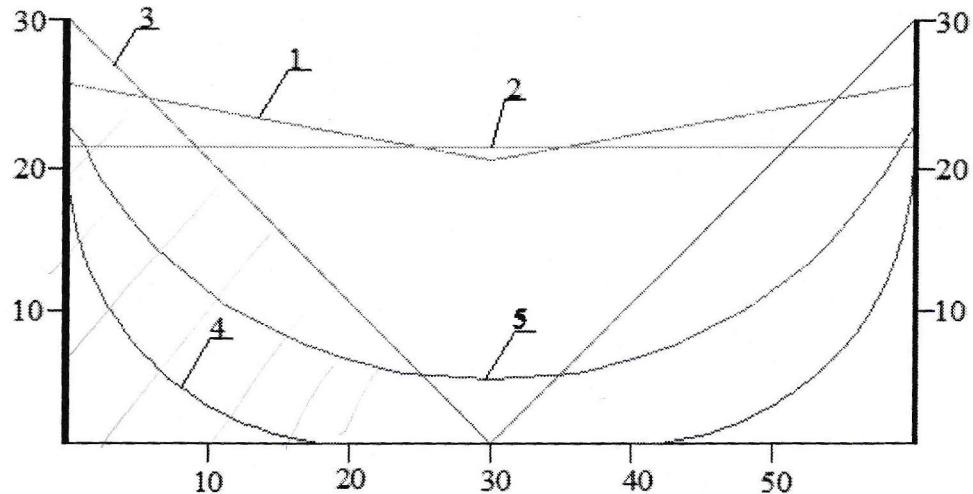


Рис. 3. Зоны защиты двойного стержневого молниеводо: 1) РД при  $P_H=0,999$ ; 2) СО при  $P_H=0,999$ ; 3) ВСП при  $P_H=0,99$  для объекта размерами  $10 \times 10$  м; 4) МКС при  $P_H=0,99$ ,  $R=20$  м; 5) метод Александрова,  $R=20$  м

молниеводо. В методе Александрова, как уже отмечалось, все заземленные предметы оказывают взаимное влияние, нет скачкообразного перехода от многократных молниеводов к одиночным молниеводам.

Влияние наведенного заряда на вероятность прорыва. Площадь защищаемого объекта влияет на угол защиты молниеводов в ВСП. Согласно [1] влияние площади и высоты объекта на вероятность его поражения наиболее точно выражается через наведенный заряд. Вначале исследуем влияние наведенного заряда на зоны защиты одиночного и двойного молниеводов и сравним с результатами ВСП.

Наличие объекта существенно увеличивает защитный угол и зону защиты одиночного молниеводо в ВСП, что полностью согласуется с результатами по методу Александрова (рис.4). Причина – наведенный на объекте заряд выравнивает зону ориентировки молнии, отодвигает зону защиты от объекта и уменьшает вероятность прорыва. Результат неожиданный, но далее мы увидим, что наведенный заряд одновременно увеличивает площадь стягивания, поэтому число прорывов возрастает.

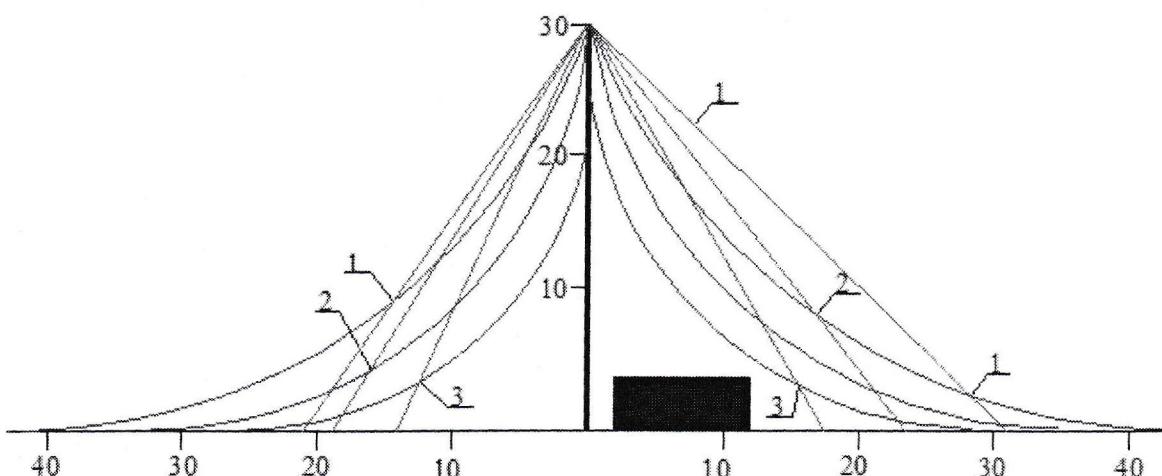


Рис.4. Зона защиты одиночного молниеводо: прямолинейные графики – по ВСП с надежностью (1) 0,9; (2) 0,95; (3) 0,99; криволинейные графики – по методу Александрова с надежностью (1) 0,91; (2) 0,97; (3) 0,99; справа при наличии объекта  $10 \times 10$  м высотой 4 м

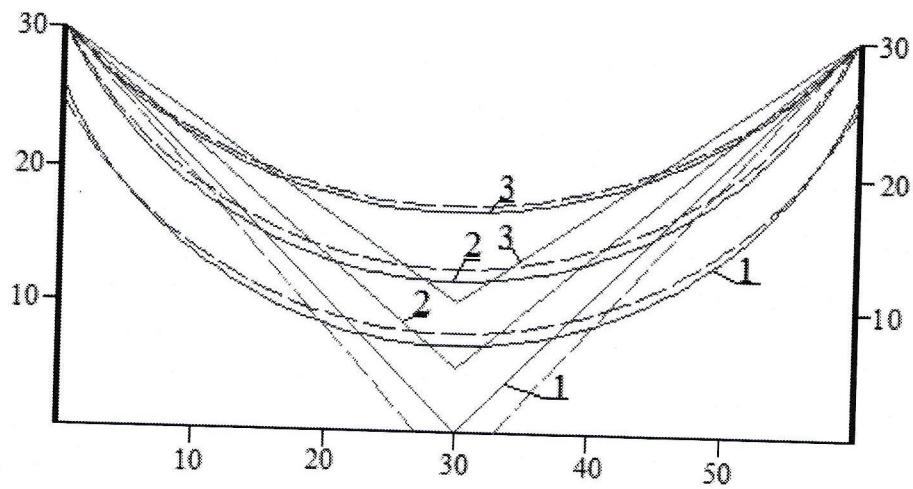


Рис. 5. Зона защиты двойного молниеприемника: прямолинейные графики – по ВСП с надежностью (1) 0,9; (2) 0,95; (3) 0,99; криволинейные графики – по методу Александрова с надежностью (1) 0,91; (2) 0,97; (3) 0,99; площадь объекта: 10x10 м – сплошные графики, 20x20 м – пунктирные графики; высота объекта 4 м

Некоторое увеличение зоны защиты по методу Александрова из-за наведенного заряда объекта мы наблюдаем и для двойного молниеприемника (рис.5). Здесь первое различие с ВСП, где увеличение площади объекта уменьшает защитный угол и зону защиты молниеприемников. Возможно вопросы к ВСП, где появление объекта в зоне одиночного молниеприемника увеличивает защитный угол на 5-11° (рис.4), но уменьшает его на 4-6° в зоне двойного молниеприемника (рис.5).

**Влияние наведенного заряда на площадь стягивания.** Число прорывов молний пропорционально площади стягивания, которая для одиночных объектов рассчитывается по известной формуле

$$S = (a+6h)(b+6h) - 7.7h^2 = ab + 6h(a+b) + \pi(3h)^2, \quad (3)$$

где  $a, b, h$  – длина, ширина и высота объекта. Для высоких объектов последнее слагаемое (3) доминирует и площадь стягивания представляет собой круг радиусом  $3h$ . Вероятно (3) следует рассматривать как верхнюю оценку площади стягивания. Применение (3) затруднительно на сложных объектах, где площади стягивания отдельных элементов перекрываются. Надежной оценкой снизу площади стягивания в этом случае является площадь зоны защиты объекта на уровне земли.

В электростатической модели ориентировки молний площадь стягивания может быть определена по формуле

$$S = S_0 \cdot q/q_0,$$

где  $S_0 = ab$  – площадь основания объекта,  $q_0$  – наведенный заряд на поверхности земли площадью  $S_0$  (на уровне земли),  $q$  – наведенный заряд объекта. Таким образом, площадь стягивания объекта больше площади его основания во столько раз, во сколько раз наведенный заряд объекта больше наведенного заряда на поверхности «чистой» земли равной площади. Увеличение числа заземленных конструкций увеличивает наведенный заряд объекта, следовательно, возрастает площадь стягивания и число ударов молний в объект.

**Тросовая защита.** Тросовые молниеотводы или грозозащитные тросы при численных расчетах дробятся на элементы малой длины, узлы которых рассматриваются как вершины стержневых молниеотводов, поэтому методика расчетов не меняется. Все выводы, сделанные ранее, применимы и для тросовой защиты.

**Решение задач.** Метод молниезащиты по Г.Н. Александрову и МКС реализованы в программе ZYM, что позволяет сравнить их на примере конкретных объектов.

**Молниезащита электрической подстанции** (рис.5) рассчитана МКС. Подстанция защищена при радиусе сферы  $R=45$  м (рис.5а), но не защищена при  $R=30$  м (рис.5б) и  $R=20$  м (рис.5в). Поскольку это объект 3 категории, то выбор молниезащиты обоснованный. Расчеты показывают, что удары молнии возможны в молниеотводы на порталах, рядом с которыми проходят контрольные кабели. Отсюда проблемы с ЭМС.

Теперь проектирование молниезащиты выполним по электростатической модели ориентировки молнии. Даже при  $R=20$  м (1 категория молниезащиты) подстанция надежно защищена от прямого удара молнии (рис.5г). Ударов в молниеотводы на порталах нет, следовательно, и указанных ранее проблем с ЭМС не существует. Таким образом, применение МКС ведет к дополнительным (часто несуществующим) проблемам с ЭМС на электрических подстанциях.

**Молниезащита ЛДПС «Конда»,** где в августе 2009 г. произошел пожар после вероятного удара молнии в резервуар с нефтью, выполнена по РД с надежностью 0.999. Однако расчет молниезащиты по МКС показывает, что объект не только не

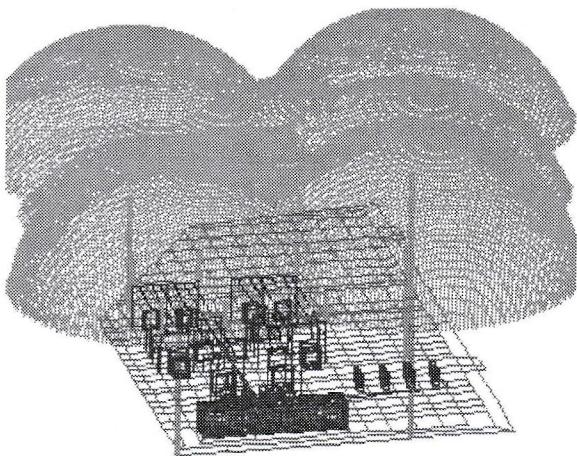


Рис. 5а. Зона ориентировки молнии по МКС,  $R=45$ м

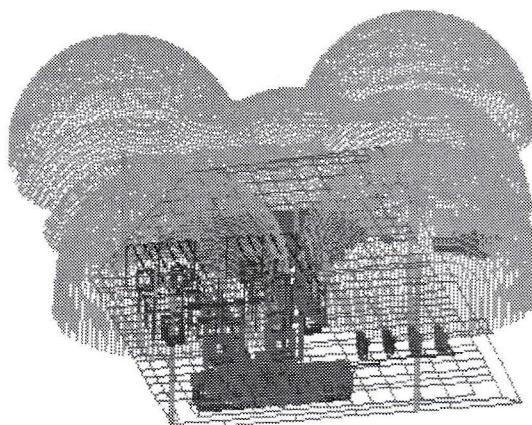


Рис. 5б. Зона ориентировки молнии по МКС,  $R=30$ м

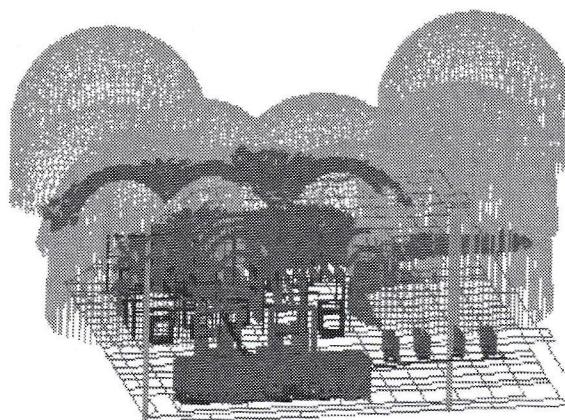


Рис. 5в. Зона ориентировки молнии по МКС,  $R=20$ м

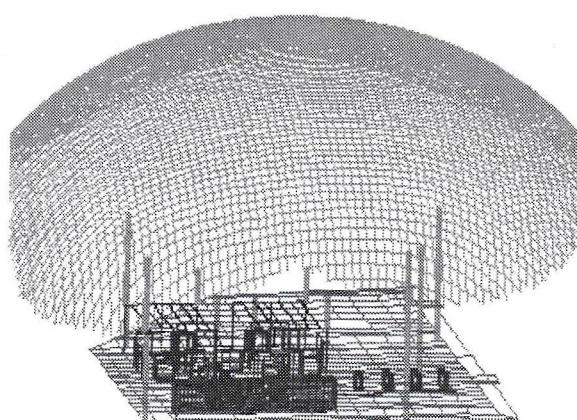


Рис. 5г. Зона ориентировки по методу Александрова,  $R=20$ м

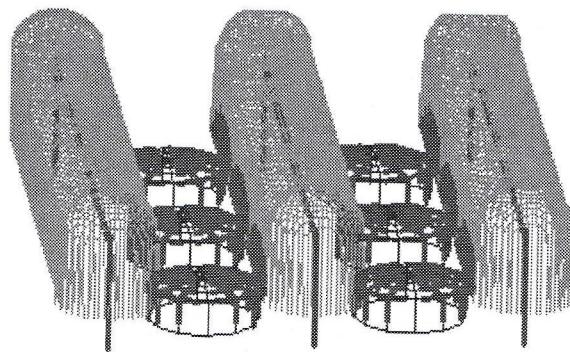


Рис. 6а. Зона ориентировки молнии по МКС,  
 $R=20\text{м}$

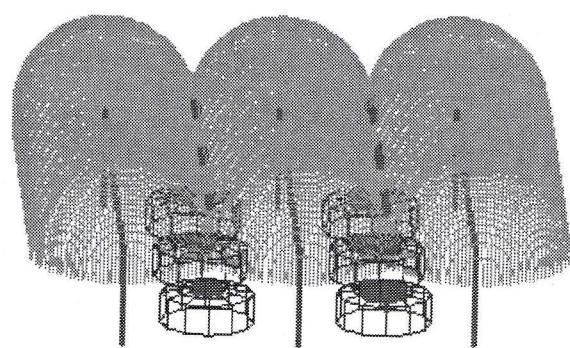


Рис. 6б. Зона ориентировки молнии по  
МКС,  $R=45\text{м}$

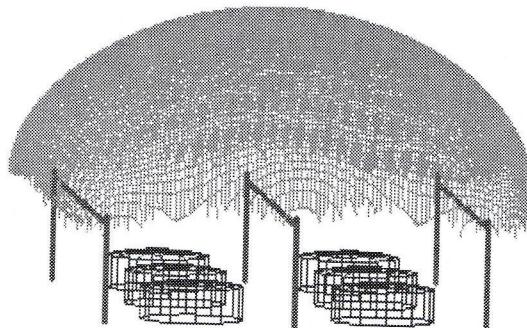


Рис. 6в. Зона ориентировки по методу  
Александрова,  $R=20\text{м}$

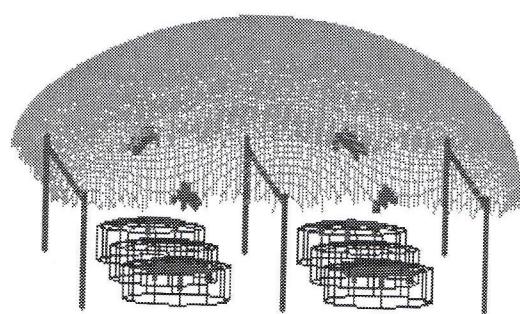


Рис. 6г. Зона ориентировки по методу  
Александрова,  $R=10\text{м}$

зашщен с надежностью 0.99 (рис.6а), но и с надежностью 0.91 (рис.6б). Так ли это. Применение метода Александрова показывает, что надежность объекта не ниже 0.99 (рис.6в), а прорыв защиты (в крайний резервуар) возможен при токах молнии порядка 1 кА (рис.6г). Для защиты от них крайние мачты следует выдвинуть. Таким образом, метод Александрова подтверждает надежность молниезащиты объекта с надежностью 0.99 и дает рекомендации по ее повышению. Применение МКС потребовало бы необоснованной кардинальной реконструкции систем молниезащиты на объектах нефтяной промышленности.

**Выводы.** Метод Г.Н. Александрова, основанный на электростатической модели ориентировки молнии, сводится к: 1) построению зоны ориентировки молнии из условия равной вероятности поражения объекта с молниеводами; 2) определению вероятности прорыва молнии как отношение площади, откуда молния поражает объект, к общей площади зоны ориентировки. Молниезащита по Г.Н. Александрову приводит к более «жестким» решениям в сравнении с РД, СО и более «мягким» решениям по сравнению с методом катящейся сферы. Наведенный молнией заряд объекта увеличивает площадь стягивания молнии, но уменьшает вероятность прорыва защиты за счет «отталкивания» зоны ориентировки, т.е. действует разнонаправленно на число прорывов молнии к объекту, что не учитывается в российских и международных нормах. Метод Г.Н. Александрова с электростатической моделью ориентировки молнии – реальная альтернатива методу катящейся сферы.

### Литература

1. Александров, Г.Н. Молния и молниезащита. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007 – 280 с.
2. Куприенко В.М. Анализ методик расчета и выбора параметров зоны защиты стержневых молниеводов. Электричество. 2012. №9. – С.39-43.
3. Гайворонский А.С., Овсянников А.Г. Методы физического моделирования

грозопоражаемости наземных объектов. Труды Первой Российской конференции по молниезащите. Новосибирск. 2007.

4. Базелян Э.М., Гайворонский А.С., Сысоев В.С. Испытания зон защиты типовых молниеотводов методом имитационного физического моделирования. III Российская конференция по молниезащите. 2012. С.384-398.

5. Базелян Э.М. Анализ исходных посылок и конкретных рекомендаций стандарта МЭК 62305 при защите от прямых ударов молнии. Первая Российская конференция по молниезащите. Новосибирск. 2007. С.129-139.

6. Базелян Э.М. Нормирование молниезащиты в России. Основные проблемы и пути совершенствования. III Российская конференция по молниезащите. 2012. С.372-382.

**Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенок Т.К., Темников А.Г.**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОРАЖАЕМОСТИ МОЛНИЕЙ НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

К настоящему времени в области молниезащиты широко используются методы оценки поражаемости наземных объектов, основанные на эмпирическом, электрографическом или вероятностном подходах. Эмпирический подход опирается на данные, полученные в результате эксперимента, он прост в употреблении и пригоден для решения типовых задач по молниезащите (защита воздушных линий электропередачи на типовых опорах). По электрографической концепции место поражения молнией однозначно предопределется соотношением электрических прочностей разрядных промежутков, образованных лидером молнии, достигшим критического расстояния, и заземленными наземными сооружениями. В частности, стандарты Международной электротехнической комиссии (МЭК) в качестве основного метода оценки молниезащищенности наземных объектов предлагают метод «катящейся сферы», в котором для расстановки молниеотводов используется фиктивная сфера с радиусом, равным так называемому радиусу поражения, понятие которого берет начало из электрографической концепции. Уточнение радиуса поражения приводится и в ряде работ [1-5]. При этом современные разработки, основанные на электрографическом подходе, уже включают в себя вопросы моделирования развития исходящего отрицательного лидера молнии, возникновения и прорастания встречного лидера с объекта [4, 6-10].

В нашей стране наиболее перспективным считается вероятностный подход к оценке молниезащищенности наземных объектов. По вероятностной концепции траектория лидера молнии, достигшего критического расстояния, еще не определена однозначно, с различной вероятностью лидер молнии может поразить любой элемент рассматриваемой наземной системы. Основные методики, развивающие этот подход, представлены в работах [11-15].

Отсутствие учета особенностей взрывоопасных объектов в упомянутых методиках не позволяет корректно, без ограничений применять их для оценки молниепоражаемости таких объектов. Их специфика заключается в образовании и выбрасывании в атмосферу взрывоопасной среды по условиям технологического процесса или в результате аварии оборудования, нарушения работы вентиляции. Контакт взрывоопасной смеси с каналом не только восходящего лидера, но и