

УДК 621.317.318

В.В. КНЯЗЕВ, В.Н. ДРОНОВ**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА УДАРОВ МОЛНИИ В ОБЪЕКТ**

Представлены результаты расчетной оценки количества ожидаемых разрядов молнии в конструкцию типа ангара, проведенные двумя методами: с использованием прикладной программы «Вероятность», разработанной авторами, и формул «3Н» из действующих стандартов. В программе реализован электрогеометрический метод (EGM), который является базовым при оценке зон защиты молниеприемников. Расчеты проведены с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в стандарте в стандарте ДСТУ EN 62305-1:2012. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА, что соответствует I уровню молниезащиты. Вероятность того, что сила тока молнии превысит значение 200 кА не более 1 %. Формулы «3Н», применяемые для оценки «площади стягивания» дают завышенный в несколько раз (для рассмотренного объекта в 2,67 раза) результат, поскольку не учитывают реальную форму объекта и статистическое распределение силы тока молнии, определяющего радиус катящейся сферы в EGM методе

Ключевые слова: молния, сила тока, статистическое распределение вероятности, электрогеометрический метод, число ударов молнии, прикладное программное обеспечение.

Введение. Определение требуемого уровня системы молниезащиты объектов базируется на оценке вероятности возникновения ущерба и возможных жертв в случае удара молнии в объект. Метод такой оценки регламентируется стандартом [1]. Важным исходным положением является оценка количества молниевых разрядов, которые попадут в объект в течение заданного времени эксплуатации. Стандарт [1] учитывает все основные факторы, влияющие на этот процесс. В том числе: габаритные размеры объекта, значение частоты ударов молнии в землю в районе расположения объекта, наличие окружающих объект высотных зданий и сооружений. Эффективную площадь «стягивания» для объекта в виде параллелепипеда с габаритными размерами $L \times W \times H$ определяют, как показано на рис. 1.

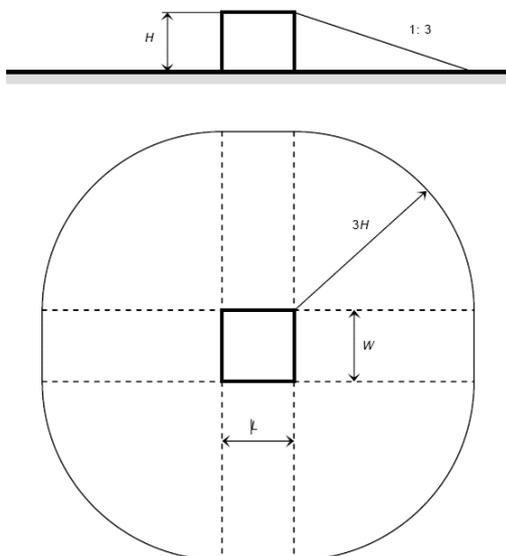


Рисунок 1 – Определение площади стягивания молний объектом по методу «3Н» [1]

Представленный метод базируется на эмпирических данных, полученных в основном для высотных сооружений. Естественно, возникает вопрос: почему 3Н? Современные знания о физике молнии трансформированы в практические рекомендации, которые

сконцентрированы в стандарте МЭК [2] и публикации СИГРЕ [3]. Важными для рассматриваемой задачи положениями являются такие:

- расстояние, с которого лидер молнии ориентируется на объект однозначно связано с величиной силы тока главного разряда (фактически с величиной напряжения грозового облака). Это утверждение обосновывает метод «катящейся сферы», который сегодня считается наиболее достоверным при определении зон защиты молниеприемников;

- вероятность появления молнии с силой тока, превышающей заданную величину, определена на основании обработки большого числа экспериментальных данных.

Очевидно, что площадь «стягивания» однозначно связана с радиусом катящейся сферы и габаритными размерами объекта. Следовательно, можно достаточно точно в рамках сформулированной модели оценить размеры площади стягивания и сравнить их с результатами по эмпирическому методу «3Н». В ряде работ [4-6], представлены некоторые полученные результаты.

Целью работы является доказательство эффективности использования электрогеометрического метода для оценки количества ожидаемых разрядов молнии в объект в течение заданного времени.

Постановка задачи. Объект имеет форму ангара, кровля которого является частью цилиндрической поверхности. Кровля выполнена из листов металла. При оценке количества ожидаемых разрядов молний в объект принять конкретные числовые значения габаритных размеров объекта и плотность разрядов молнии.

Методы исследования. Для расчетной оценки использован электрогеометрический метод (ЭГМ) с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Реализуемая в программе вычислительная модель описана далее.

Имеется исследуемый объект, представляющий собой территорию, на которой размещены элементы

объекта (строения). Пробивное расстояние, соответствует радиусу «катящейся сферы», определяется по заданному значению силы тока молнии следующей формулой [2]:

$$R = k \cdot I^c, \quad (1)$$

где R , м – пробивное расстояние (радиус сферы) в методе EGM; I , кА – сила тока молнии; k и c – константы, равные: 10,0 и 0,65, соответственно [2–3].

С некоторым шагом на поверхности земли задается сетка. Если по оси X узлы сетки индексировать значением i , а по оси Y – значением j , то произвольный узел сетки обозначается как (i, j) . Для каждого узла сетки определяется максимальная высота, при которой «катящаяся сфера» касается земли или – для любого строения – любой точки, проекция на землю для которой соответствует любому узлу сетки. Эта высота пропорциональна количеству поражений молнией той точки земли или строения, для которой зафиксировано касание.

Если таких точек несколько – обозначим их количество как k – то, полагая, что из данного центра «катящейся сферы» они будут поражаться равновероятно, делается вывод, что количество поражений молнией любой из этих точек будет в k раз меньше.

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ имеет место только поражение точки строения, проекция которой соответствует узлу сетки (m, n) , то характеристика поражения такой точки сооружения обозначена как ${}_{ij}H_{mn}$ и справедливо (2):

$${}_{ij}H_{mn} = {}_{ij}h. \quad (2)$$

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ имеет место только поражение земли в этом узле сетки, то характеристика поражения такой точки сооружения обозначается как ${}_{ij}H$ и справедливо равенство (3):

$${}_{ij}H = {}_{ij}h. \quad (3)$$

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ могут быть поражены k точек строений или узловая точка земли, то справедливо (4):

$${}_{ij}H = {}_{ij}H_{mn} = \frac{{}_{ij}h}{k}. \quad (4)$$

Тогда H_{mn} – суммарная характеристика поражения точки сооружения, проекция которой соответствует узлу сетки (m, n) , определяется формулой (5):

$$H_{mn} = \sum_i \sum_j {}_{ij}H_{mn}. \quad (5)$$

Суммарный показатель поражения всех точек объекта H определяется в соответствии с формулой (6):

$$H = \sum_m \sum_n (H_{mn} + {}_{mn}H). \quad (6)$$

На основании полученных показателей может быть вычислена p_{ij} – оценка вероятности поражения молнией для узла сетки (i, j) в соответствии с (7):

$$p_{ij} = \frac{{}_{ij}H + H_{ij}}{H}. \quad (7)$$

В дальнейшем, зная значения оценки вероятно-

стей поражения молнией для всех узлов сетки, можно вычислять все необходимые нам вероятностные оценки.

С этой целью определяется ряд статистических показателей для некоторых элементов сооружений.

В рамках решаемой задачи рассмотрен только вариант троса, поскольку поверхность объекта моделируется системой 75 тросов.

Элементами троса являются:

– его конечные точки (края);

– неконечные точки (точки средней части троса).

Для конечных точек троса вероятности их поражения, которые обозначим как ${}_{\tau}p_1$ и ${}_{\tau}p_2$, определяются в соответствии с формулой (7).

Кроме этого вычисляется вероятность поражения средней части троса. С этой целью для средней части троса в процессе моделирования фиксируется некоторое множество точек (${}_{\tau}n \geq 1$), размещенных вдоль троса таким образом, что расстояние между ними и от углов троса к ближайшим «средним» точкам не превышает выбранного шага сетки. Для каждой из этих точек в процессе моделирования определяется характеристика ее поражения, а затем, в соответствии с (7), вычисляется вероятность ее поражения. Вероятность поражения i -й точки средней части троса обозначим как ${}_{\tau}p_{ci}$.

Сумма вероятностей поражения средних точек троса, вычисляемая в соответствии с (8) образует суммарную вероятность поражения средней зоны троса (${}_{\tau}p_c$).

$${}_{\tau}p_c = \sum_{i=1}^{{}_{\tau}n} {}_{\tau}p_{ci}. \quad (8)$$

Тогда полная вероятность поражения троса (${}_{\tau}p$) определяется в соответствии с (9):

$${}_{\tau}p = {}_{\tau}p_c + {}_{\tau}p_1 + {}_{\tau}p_2. \quad (9)$$

Теперь условные вероятности поражения элементов троса при условии его поражения, можно вычислить в соответствии с (10):

$$\left. \begin{aligned} {}_{\tau}p_c^y &= \frac{{}_{\tau}p_c}{{}_{\tau}p} \\ {}_{\tau}p_i^y &= \frac{{}_{\tau}p_i}{{}_{\tau}p} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где ${}_{\tau}p_c^y$ – условная вероятность поражения средней зоны троса при условии поражения самого троса; ${}_{\tau}p_i^y$ – условная вероятность поражения i -й конечной точки троса при условии поражения самого троса.

Программа предполагает, что закон распределения тока молнии описывается следующей моделью:

Вероятность P того, что пиковое значение тока молнии превысит значение I , определяется в соответствии с формулой (11) [1, 3]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{a}\right)^b}, \quad (11)$$

где: P – искомая вероятность; I – граничное значение тока молнии [кА]; a и b – неотрицательные параметры, имеющие в соответствии с [1, 3] следующие зна-

чения: $a = 31[\text{kA}]$, $b = 2,6$.

Значения параметров a и b могут, как иметь указанные выше значения по умолчанию, так и значения по желанию пользователя программы.

Кроме перечисленных элементов модели в программе обеспечивается вычисление радиуса «катящейся сферы» (R) в соответствии с формулой (1).

В случае необходимости предусмотрена возможность выбрать режим исследования с непосредственным заданием числового значения радиуса «катящейся сферы». Этот режим принципиально важен для использования программного обеспечения при анализе результатов лабораторных исследований, когда длина модельной молнии не превышает 10 м.

Результаты численного моделирования. Оценим значение вероятности поражения объекта в течение одного года эксплуатации. Габаритные размеры объекта в виде ангара, примем по аналогии с работой [5], такими: ширина 250 м, длина 165 м, высота 110 м. Для определенности задана плотность разрядов молнии $n = 4,69$ разрядов/(год·км²), характерная для районов центральной Украины. Для описания поверхности объекта, в данном случае, удобно применить комбинацию тросовых молниеприемников. Моделирование выполнено 75-ю горизонтальными тросами, с заземляющими спусками, в том числе:

- средний (по гребню укрытия);
- правый и левый на грунте;
- промежуточные с шагом не более 5 м.

Изображение тросовой модели представлено на рис. 2. Для удобства анализа полученных результатов, объект размещен на участке земли квадратной формы площадью 1 км².

Расчетная оценка произведена с использованием разработанной авторами прикладной программы [7], в которой реализован электрогеометрический метод, с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами, заданными в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА. В соответствии с IEC 62305-1:2010 (таблица А.3), вероятность того, что сила тока молнии выйдет за пределы указанного диапазона не более 2 %. Результаты расчетов для двух вариантов расчетной сетки представлены в таблице 1. Пример иллюстрации результатов в виде 2D изображения с зонами равной вероятности установленного цвета, представлен на рис. 3, а в варианте 3D – на рис. 4.

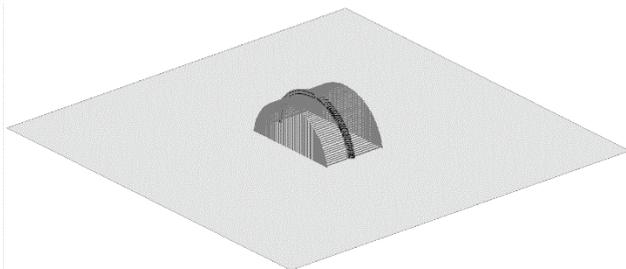


Рисунок 2 – Модель объекта в виде 75 горизонтальных тросов с соответствующим заземляющими спусками, расположенного на площади 1 км² (темная полоса по средней линии – номера тросов, физического смысла не имеет)

Таблица 1 Результаты расчетной оценки:

Диапазон тока, кА	Вероятность удара в землю	Вероятность удара в укрытие	Количество ударов в год	Шаг расчетной сетки, м
2 – 200	0,7522	0,2478	1,162	2,500
2 – 200	0,7519	0,2481	1,164	0,314

Примечание: Расчеты проведены для двух вариантов шага расчетной сетки, отличающихся между собой в 8 раз. Результаты в обоих случаях практически одинаковые (отличие менее чем на 0,2 %).

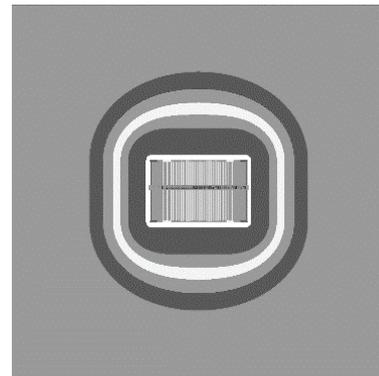


Рисунок 3 – Распределение вероятности поражения объекта и земли на участке площадью 1 км²

Следует отметить, что определение относительной вероятности удара осуществляется по каждому объекту отдельно (в рассматриваемом случае это объект и земля). Поэтому, максимальные значения находятся как на поверхности объекта, так на земле вдали от него (в черно-белом изображении информативность рисунка 3 низкая).

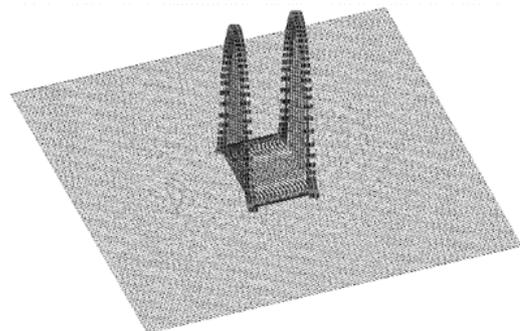


Рисунок 4 – 3D изображение распределения вероятности ударов молнии в объект

Результаты расчетной оценки таковы:

Количество ожидаемых разрядов молнии в объект 1,16 в год. Следовательно, за 100 лет эксплуатации число ударов молнии в объект составит 116. Погрешность оценки в пределах +3%.

Сравним полученный результат с результатами по стандартизированной методике [1]. В стандарте IEC 62305-2 [1, формула А.2] представлена формула (12), которая позволяет оценить площадь зоны возможного стягивания молний для изолированного сооружения в виде параллелепипеда с длиной L , шириной W , и высотой H , расположенного на равнинной местности, в соответствии с рис. 1.

$$A_d = L \cdot W + 6 H (L + W) + 9\pi (H)^2. \quad (12)$$

Значения габаритных размеров совпадают с приведенными выше для ангара. В этом случае, значение $A_d = 660214 \text{ м}^2$ или 0,66 часть от числа ударов в площадь 1 км^2 . С учетом средней плотности $n = 4,69$ разрядов/(год·км²), число ударов молнии в объект оценивается величиной 3,095 в год. Следовательно, на протяжении 100 лет ожидается 310 ударов молнии, что в 2,67 раза больше числа ударов, рассчитанных выше с помощью прикладной программы. Следует отметить, что наличие существенной разницы между результатами оценки числа ударов молнии в объект по стандартизированной методике и методике, учитывающей статистическое распределение, отмечены также в работах [5, 6].

Причины отличия обуславливаются следующими обстоятельствами:

- стандартизированная методика не учитывает реальную форму объекта, отличную от параллелепипеда;
- стандартизированная методика не учитывает статистического распределения силы тока молнии;
- стандартизированная методика основана на результатах экспериментальных исследований, полученных в основном для объектов типа мачта или стержень.

Выводы. Расчетная оценка количества ожидаемых разрядов молнии в объект произведена с использованием прикладной программы [7]. В программе реализован электрогеометрический метод (EGM), который является базовым в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Расчеты проведены с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в упомянутом выше стандарте. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА, что соответствует I уровню молниезащиты. В соответствии с IEC 62305-1:2011 (таблица А.3), вероятность того, что сила тока молнии превысит значение 200 кА не более 1 %.

Доказано, что используемые в разделе А.2.1. стандарта IEC 62305-2:2012 формулы для оценки «площади стягивания» дают завышенный в несколько раз результат (в рассмотренном случае в 2,67 раза),

поскольку не учитывают реальную форму объекта и статистическое распределение силы тока молнии, определяющего радиус катящейся сферы в EGM методе. Кроме того, из рис. 4 очевидно, что вероятность удара молнии по поверхности объекта распределена неравномерно. Значительная часть сконцентрирована вблизи торца объекта. Следовательно, целесообразно эту часть поверхности объекта выполнить из листового металла толщиной большей, чем среднюю зону.

Список литературы: 1. IEC 62305-2: 2010. Protection against lightning – Part 2: Risk management. 2. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. 4. Cooray V. On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height / V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci // Electric power systems research. – 2014. – Vol. 113. – P. 79-87. 5. Shostak V. Statistical Distributions of Current Amplitudes and Lightning Incidence Number to Structures of Various Configurations / V. Shostak, V. Tyulyukov // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. – P. 1289–1296. 6. Gao Lei How to Calculate the Collection Area of Non-isolated Structure / Gao Lei, Ye Yisong // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. – P. 280-285. 7. Дронов В.Н. Компьютерная программа «Расчет вероятностей уровней молниезащиты зданий и сооружений» / В.Н. Дронов, В.В. Князев // Свидетельство о регистрации авторского права № 60092 от 09.06.2015. Выдано государственной службой интеллектуальной собственности Украины.

Bibliography (transliterated): 1. IEC 62305-2: 2010. Protection against lightning – Part 2: Risk management. Print. 2. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. Print. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Print. 4. Cooray V. On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height. V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci. Electric power systems research. 2014. Vol. 113. 79-87. Print. 5. Shostak V. Statistical Distributions of Current Amplitudes and Lightning Incidence Number to Structures of Various Configurations. V. Shostak, V. Tyulyukov. Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. 1289-1296. Print. 6. Gao Lei How to Calculate the Collection Area of Non-isolated Structure. Gao Lei, Ye Yisong. Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. 280-285. Print. 7. Dronov V.N. Komp'yuternaya programma «Raschet veroyatnostey urovnej molniezashhity zdaniy i sooruzhenij». V.N. Dronov, V.V. Kniaziev. Svidetel'stvo o registracii avtorskogo prava No 60092 ot 09.06.2015. Vydano gosudarstvennoj sluzhboj intellektual'noj sobstvennosti Ukrainy. Print.

Посмунила (received) 8.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник; тел.: (057) 707 68 68; email: knyaz2@i.ua.

Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych, Ph.D., Senior Research Fellow, Research & Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", leading researcher; Phone: (38057) 707 68 68; email: knyaz2@i.ua.

Дронов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «ХПИ», доцент кафедры «Системы информации», тел.: (057) 719 90 77

Dronov Volodymyr Mykolaiovych, Ph.D., Associate Professor, National Technical University "KhPI", associate professor of "Information Systems" department, Phone: +(38057) 719 90 77