

01
Об особенностях методики расчета поражаемости наземных взрывоопасных объектов молнией

© С.В. Гундарева, И.Е. Калугина, А.Г. Темников

Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“,
 111250 Москва, Россия
 e-mail: gundareva-sv@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2016 г.)

Представляется новая вероятностная методика расчета и оценки поражения молнией наземных взрывоопасных объектов, использующая комбинированный критерий возникновения восходящих стримерных и лидерных разрядов с элементов защищаемого объекта и молниеотводов с учетом вероятностного характера лавинно-стримерного и стример-лидерного перехода, траектории нисходящего ступенчатого лидера молнии и тока молнии. Показано, что неучет возможности формирования в электрическом поле нисходящего лидера молнии с элементов объекта незавершенных стримерных разрядов, способных поджечь взрывоопасные выбросы, занижает в несколько раз расчетную вероятность выхода из строя объекта из-за воздействия молнии.

Одной из особенностей молниезащиты взрывоопасных объектов является необходимость учитывать наличие у них элементы конструкции, которые имеют контакт с взрывоопасными газо-, паро-, пылевоздушными смесями, выбрасываемыми в атмосферу. В этом случае в грозовых условиях возможно развитие встречных (восходящих) незавершенных искровых разрядов с этих элементов и их проникновение в места возможного формирования взрывоопасных смесей. Такие незавершенные восходящие разряды в стримерной форме с защищаемого объекта могут поджечь более 50% типов выбрасываемых в атмосферу вблизи объекта паро-, газо- и пылевоздушных смесей [1], несмотря на работу системы молниезащиты, успешно перехватившую нисходящий лидер молнии. В то же время современные методы расчета молниепоражаемости наземных объектов основываются только на критериях формирования восходящих (встречных) лидерных разрядов с вершины молниеотвода или объекта [2], не принимая во внимание особенностей взрывоопасных объектов.

В работе впервые представляется в рамках вероятностного метода [3] методика оценки молниепоражаемости наземных взрывоопасных объектов на основе комбинированного критерия, учитывающего возможность одновременного формирования с них в электрическом поле нисходящего отрицательного ступенчатого лидера молнии восходящих лидерных и стримерных разрядов, способных привести к их взрыву. Комбинированный критерий учитывает для элементов объекта, контактирующих с взрывоопасной смесью, стадию формирования стримерного разряда (лавинно-стримерный переход, критерий 1 на рис. 1), а для молниеотводов и элементов, не контактирующих с взрывоопасной смесью, стадию перехода импульсной вспышки стримерной короны в восходящий лидерный разряд (стример-лидерный переход, критерий 2 на рис. 1). На каждом шаге продвижения нисходящего лидера молнии к земле рассчитываются

вероятности того, что рассматриваемые переходы разрядов из одной формы в другую могут произойти в заданных грозовых условиях.

Условие стример-лидерного перехода в комбинированном критерии заключается в расчете заряда Q_{cor} импульсной вспышки стримерной короны у элементов объекта (молниеотвода) и последующем определении вероятности стример-лидерного перехода по данным экспериментов с использованием искусственных грозовых облаков [4,5].

Для определения успешности лавинно-стримерного перехода используется расчет напряженности электрического поля на поверхности элемента объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью [6]. Вероятность перехода электронной лавины в положительный стримерный разряд определяется как

$$P_{str}(E) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(S \cdot \frac{E - E_{cr}}{E_{cr}}\right)}, \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля на поверхности элемента конструкции объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью, в грозовых условиях, E_{cr} — значение напряженности электрического поля на поверхности элемента объекта, при котором вероятность лавинно-стримерного перехода составляет 0.5, S — параметр, определенный экспериментально, например, $S = 45$ [6]. Значение E_{cr} определяется с учетом формы и размеров исследуемых элементов защищаемого взрывоопасного объекта по [7].

Расчет вероятностей возникновения восходящих искровых разрядов с элементов взрывоопасного объекта и системы его молниезащиты проводится следующим образом. На высоте нижней границы облака выделяется область прямоугольной формы, откуда в сторону рассматриваемой системы наземных объектов могут стартовать отрицательные нисходящие лидеры молнии.

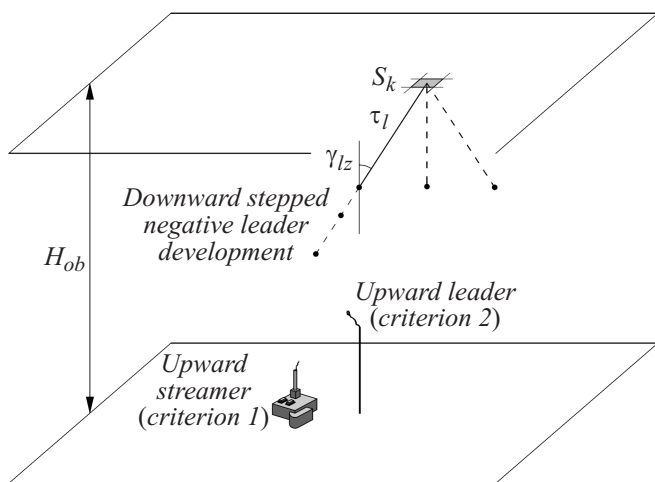


Рис. 1. К описанию алгоритма расчета вероятностей возникновения опасных восходящих искровых разрядов с элементов конструкции взрывоопасного объекта и системы его молниезащиты, где H_{ob} — высота грозового облака над землей, м; S_k — ячейка расчетной области, m^2 ; τ_l — распределение заряда вдоль канала отрицательного нисходящего лидера молнии, C/m ; γ_{Lz} — угол наклона лидера молнии относительно вертикали, deg .

Область делится на ячейки, из центра которых начинается ступенчатое развитие отрицательного нисходящего лидера молнии с линейным зарядом, который соответствует определенному значению тока главного разряда молнии I_m при фиксированном значении угла распространения нисходящего лидера молнии к земле γ_{Lz} .

При движении головки заданного нисходящего лидера молнии от облака к земле при каждом ее i -м положении после формирования ступени рассчитываются распределения напряженности электрического поля $E_i(x)$ вдоль прямых, соединяющих i -е положение головки с выбранными точками на поверхности элементов конструкции наземных взрывоопасных объектов и вершин молниеотводов, с которых ожидается формирование восходящих стримерных и лидерных разрядов. Далее при выполнении условия самостоятельности разряда на выбранных элементах объекта и его системы молниезащиты проверяется выполнение представленного комбинированного критерия:

а) по значениям напряженности электрического поля E , создаваемой нисходящим лидером молнии, и критической напряженности электрического поля E_{cr} для выбранных элементов объекта и его системы молниезащиты по формуле (1) определяется вероятность формирования с них стримерного разряда P_{stri} , $i = 1 \dots N$, где i — номер текущего положения головки лидера при его продвижении к земле (или число ступеней);

б) затем для выбранных элементов объекта и его системы молниезащиты рассчитывается заряд Q_{cor} , протекающий через основание вспышки формирующейся с

них стримерной короны [5], и определяется вероятность успешного перехода ее в восходящий положительный лидерный разряд P_{li} .

Для элементов взрывоопасного объекта, контактирующих с взрывоопасной смесью, оценивается возможность формирования с них восходящих положительных стримерных разрядов. Вероятность возникновения стримерного разряда с такого элемента объекта при движении лидера молнии от облака к земле вдоль выбранного направления с заданным током молнии I_{mj} определяется как

$$P_{exj} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{stri} \cdot l_{stepi}}{\sum_{i=1}^N l_{stepi}}, \quad (2)$$

где l_{stepi} — текущее значение длины ступени отрицательного нисходящего лидера молнии, на которую продвигается к земле головка лидера в заданном направлении.

Для элементов конструкции защищаемого объекта, не имеющих в грозовых условиях контакта с взрывоопасной областью, и вершин молниеотводов проводится оценка возможности формирования с них восходящих положительных лидеров. Вероятность возникновения восходящего (встречного) положительного лидерного разряда с таких элементов при движении лидера молнии от облака к земле вдоль выбранного направления γ_{Lzj} с заданным током молнии I_{mj} определяется как

$$P_{upwj} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{stri} \cdot P_{li} \cdot l_{stepi}}{\sum_{i=1}^N l_{stepi}}. \quad (3)$$

Далее расчет повторяется для нисходящих лидеров молнии, имеющих линейный заряд, соответствующий другим значениям тока главной стадии разряда молнии I_m в диапазоне от 1 до 300 кА при том же значении угла распространения нисходящего лидера молнии к земле γ_{Lz} . Затем эта последовательность расчетов повторяется при другом угле развития нисходящего лидера молнии, который меняется в диапазоне от -90° до 90° относительно вертикальной оси.

Число возможных возникновений стримерного разряда с элемента объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью и способного привести к катастрофическим последствиям на защищаемом объекте, с учетом возможности появления молнии с разными токами и по-разному ориентированными к земле определяется выражением

$$n_{ex} = n_0 \Delta I_m \Delta \gamma_{Lz} \sum_{k=1}^K S_k \sum_{j=1}^M f(\gamma_{Lz}) \cdot f(I_m) \cdot P_{exj}, \quad (4)$$

где n_0 — интенсивность грозовой активности, M — число нисходящих отрицательных лидеров молнии с заданными значениями тока молнии I_{mj} и углом распространения γ_{Lzj} ; ΔI_m , $\Delta \gamma_{Lz}$ — шаги интервалов, на которые

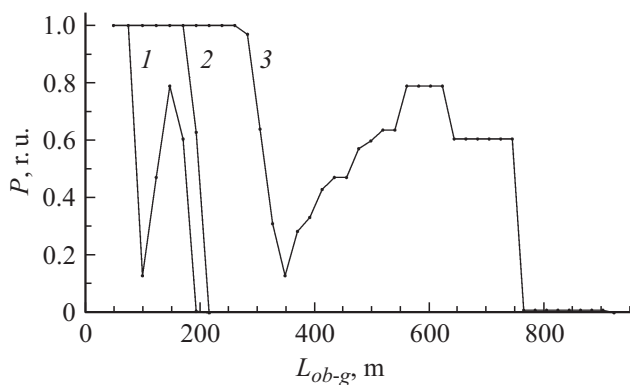


Рис. 2. Вероятности возникновения опасных восходящих искровых разрядов (1 — лидерного разряда с поверхности трубы взрывоопасных выбросов, 2 — стримерного разряда с поверхности трубы взрывоопасных выбросов, 3 — лидерного разряда с вершин молниеотводов) при движении молнии от облака к объекту с углом подхода $\gamma_{lz} = 10^\circ$ и током молнии $I_m = 30$ kA.

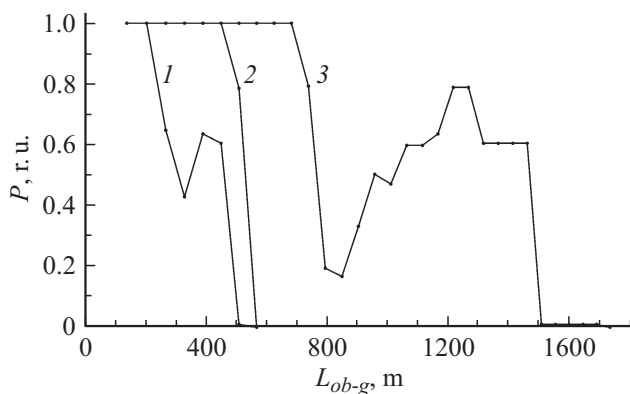


Рис. 3. Вероятности возникновения опасных восходящих искровых разрядов (1 — лидерного разряда с поверхности трубы взрывоопасных выбросов, 2 — стримерного разряда с поверхности трубы взрывоопасных выбросов, 3 — лидерного разряда с вершин молниеотводов) при движении молнии от облака к объекту с углом подхода $\gamma_{lz} = 10^\circ$ и током молнии $I_m = 110$ kA.

разбиты возможные диапазоны тока молнии и угла подхода лидера молнии к земле относительно вертикали соответственно; $\Delta I_m \sum_j^M f(I_m)$ и $\Delta \gamma_{lz} \sum_j^M f(\gamma_{lz})$ — нормирование вероятностей появления молнии с током I_{mj} для всего расчетного диапазона токов и вероятностей подхода молнии к земле под углом γ_{lzj} для всего расчетного диапазона углов соответственно; S_k — площадь ячейки расчетной области; K — число ячеек, на которое разбита расчетная область.

Для элементов конструкции защищаемого объекта, не имеющих в грозовых условиях контакта с взрывоопасной областью, и молниеотводов оценка числа успешных формирований восходящего (встречного) положительного лидерного разряда с каждого такого элемента

выполняется по следующей формуле:

$$n_{upw} = n_0 \Delta I_m \Delta \gamma_{lz} \sum_{k=1}^K S_k \sum_{j=1}^M f(\gamma_{lz}) \cdot f(I_m) \cdot P_{upw j}. \quad (5)$$

Численные расчеты, проведенные по предлагаемой методике для системы наземных объектов (рис. 1), показали, что возникновение опасных стримерных разрядов происходит при более высоких положениях головки лидера молнии (кривая 2 на рис. 2, 3), чем возникновение встречного лидерного разряда с объекта (кривая 1 на рис. 2, 3). Такой характер наблюдается во всем диапазоне значений тока молнии I_m и угла распространения нисходящего лидера γ_{lz} .

Обобщение и анализ результатов расчетов по формулам (2)–(5) показали, что учет возможности формирования в электрическом поле нисходящего лидера молнии с элементов объекта незавершенных стримерных разрядов, способных поджечь взрывоопасные выбросы, занижает в несколько раз расчетную вероятность выхода из строя объекта из-за воздействия молнии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-01000-а) и Министерства образования и науки РФ (проект № 14.132.21.1803).

Список литературы

- [1] Верёвкин В.Н., Смелков Г.И., Черкасов В.Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. М.: МИЭЭ, 2006.
- [2] Lightning protection / Ed. by V. Cooray. IET Power and Energy Series 58. Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2010.
- [3] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [4] Темников А.Г., Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенюк Т.К. // Письма в ЖТФ, 2014. Т. 40. Вып. 3. С. 42–48.
- [5] Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенюк Т.К., Темников А.Г. // IV Междунар. конф. по молниезащите. СПб., 2014. С. 42.
- [6] Alexander Fridman. Plasma chemistry. Published by Cambridge University Press, NY, USA, 2008.
- [7] Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М.: Энергия, 1977.