

## Расчет возникновения опасных незавершенных восходящих разрядов с взрывоопасных объектов во время грозы

ГУНДАРЕВА С.В., КАЛУГИНА И.Е., ТЕМНИКОВ А.Г.

*Представлена методика расчета возникновения опасных незавершенных восходящих разрядов с элементов конструкции взрывоопасных объектов в электрическом поле ступенчатого отрицательного нисходящего лидера молнии. В основу методики заложен новый вероятностный комбинированный критерий возникновения положительных восходящих стримерных и лидерных разрядов с проводящих элементов конструкции взрывоопасного объекта и вершин молниеотводов, учитывающий случайный характер лавинно-стримерного и стример-лидерного переходов и поджига взрывоопасной смеси восходящим стримерным разрядом в зависимости от выделяемой им энергии. Представлены расчеты возникновения опасных восходящих разрядов в электрическом поле нисходящего лидера молнии для поверхностной газоотсасывающей установки угольной шахты, защищенной одиночным стержневым молниеотводом. Получены зависимости вероятности возникновения стримеров со среза трубы газоотсасывающей установки от удаления места спуска нисходящих лидеров, от значения тока молнии с учетом всего диапазона возможных значений тока молнии и вероятностных характеристик их появления. Показано, что удаление места спуска вертикального лидера молнии, при котором вероятность возникновения восходящих стримерных разрядов с взрывоопасного объекта превышает  $10^{-5}$ , достигает около 700 м. Найдено, что вероятность поджига стримерными разрядами метано-воздушной смеси близка к вероятности возникновения стримеров на вершине трубы газоотсасывающей установки. По разработанной методике для трехмерной модели рассматриваемой системы наземных объектов выполнены расчеты числа восходящих стримерных и лидерных разрядов с трубы газоотсасывающей установки и числа опасных восходящих стримерных разрядов, способных поджечь выбрасываемую взрывоопасную смесь. Выявлено, что отсутствие учета возможности поджига взрывоопасной смеси незавершенными стримерными разрядами, образующимися с элементов конструкции взрывоопасного наземного объекта в поле отрицательного нисходящего лидера молнии, снижает оценку риска возникновения аварийной ситуации в грозовых условиях на 30%.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** молниезащита, стримерные разряды, лидерные разряды, взрывоопасная смесь, газоотсасывающая установка, комбинированный критерий, вероятностный подход, расчет

Несмотря на внимание к проблеме молниезащиты пожаро- и взрывоопасных зданий и сооружений, аварии на взрывоопасных объектах из-за воздействия молнии происходят до сих пор [1–3]. Во многом это связано с одной из отличительных специфических особенностей взрывоопасных объектов – возможностью формирования над ними взрывоопасных областей в результате образования и выбрасывания в атмосферу взрывоопасной смеси газов, паров или пыли с воздухом, формирующихся в условиях нормального технологического процесса или в результате аварий на объекте или нарушения работы технологического оборудования. В этом случае при ударах молнии в молниеотводы или при других близких ударах молнии существует опасность развития встречных (восходящих) незавершенных искровых разрядов с элементов конструкции взрывоопасных объектов в электрическом поле грозового облака и/или нисходящего лидера молнии и их проникновения в области возможного формирования взрывоопасных смесей [4, 5].

Конструктивные элементы верхней части взрывоопасных наземных объектов (выхлопные трубы, клапаны различного назначения, патрубки и дру-

гие), в области пространства над которыми может происходить выброс газов, паров и пыли взрывоопасной концентрации с воздухом, существенно усиливают внешнее электрическое поле. Соответственно, именно с них наиболее вероятно возникновение восходящих незавершенных разрядов стримерной формы (и, возможно, восходящих лидеров) в электрическом поле нисходящего лидера молнии и их мгновенное проникновение в объем взрывоопасной смеси. Причем, эффективное срабатывание внешней молниезащиты не исключает формирования таких опасных незавершенных восходящих искровых разрядов, так как при ориентировке молнии на молниеотвод вблизи вершины защищаемого объекта будут создаваться сильные электрические поля.

Существенным фактором, определяющим последствия воздействия искрового разряда на выбрасываемые взрывоопасные смеси, является характеристика самих смесей. В практике введены понятия о чувствительности веществ, материалов или изделий к зажигающему воздействию электрических разрядов [6]. Одним из них является минимальная энергия зажигания  $W_{\min}$ . Под минималь-

ной энергией зажигания горючей смеси подразумевают наименьшую энергию конденсаторного искрового разряда, которая с вероятностью 0,01 воспламеняет данную газо-воздушную смесь при самых благоприятных для этого условиях. Для распространенных взрывоопасных смесей газов, паров и пыли с воздухом минимальная энергия воспламенения находится в диапазоне от десятых долей мДж до нескольких десятков мДж [6, 7].

При лавинном коронном разряде выделяется энергия порядка  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  мДж, что способно привести к возгоранию лишь самых чувствительных взрывоопасных смесей. Однако средняя энергия одиночного стримера уже составляет в среднем 1–2 мДж и в зависимости от интенсивности и разветвленности стримерной короны достигает десятков–сотен мДж [4, 8, 9]. Выделяемой энергии такого порядка достаточно для воспламенения большинства встречающихся на практике взрывоопасных смесей. В лидерном разряде может выделяться энергия в десятки кДж, что однозначно ведет к воспламенению взрывоопасных смесей при контакте с ними.

Таким образом, для взрывоопасных объектов ключевым критерием возникновения опасного для объекта восходящего искрового разряда является

формирование стримерного разряда, способного поджечь взрывоопасные выбросы, формирующиеся над объектом. В то же время данной особенности уделено мало внимания в действующих нормативных документах по молниезащите наземных объектов [10], за исключением [11], где есть подраздел, относящийся к этой проблематике. В такой ситуации развитие вероятностной методике, направленной на оценку возможного риска возникновения аварийных ситуаций на взрывоопасных наземных объектах в результате формирования с них незавершенных восходящих искровых разрядов в поле нисходящего лидера молнии, является актуальным.

**Развитие основных положений методике для оценки числа случаев инициирования восходящих стримерных и лидерных разрядов, способных поджечь взрывоопасную смесь.** Основные модули алгоритма расчета по предлагаемой методике представлены на рис. 1. Применяемый в методике вероятностный подход более точно описывает физику процессов поражения объектов молнией и может быть наиболее перспективным как для оценки молниезащищенности наземных объектов любой категории, так и для оценки возможного числа катастрофических происшествий на взрывоопасных наземных объектах в грозовых условиях.

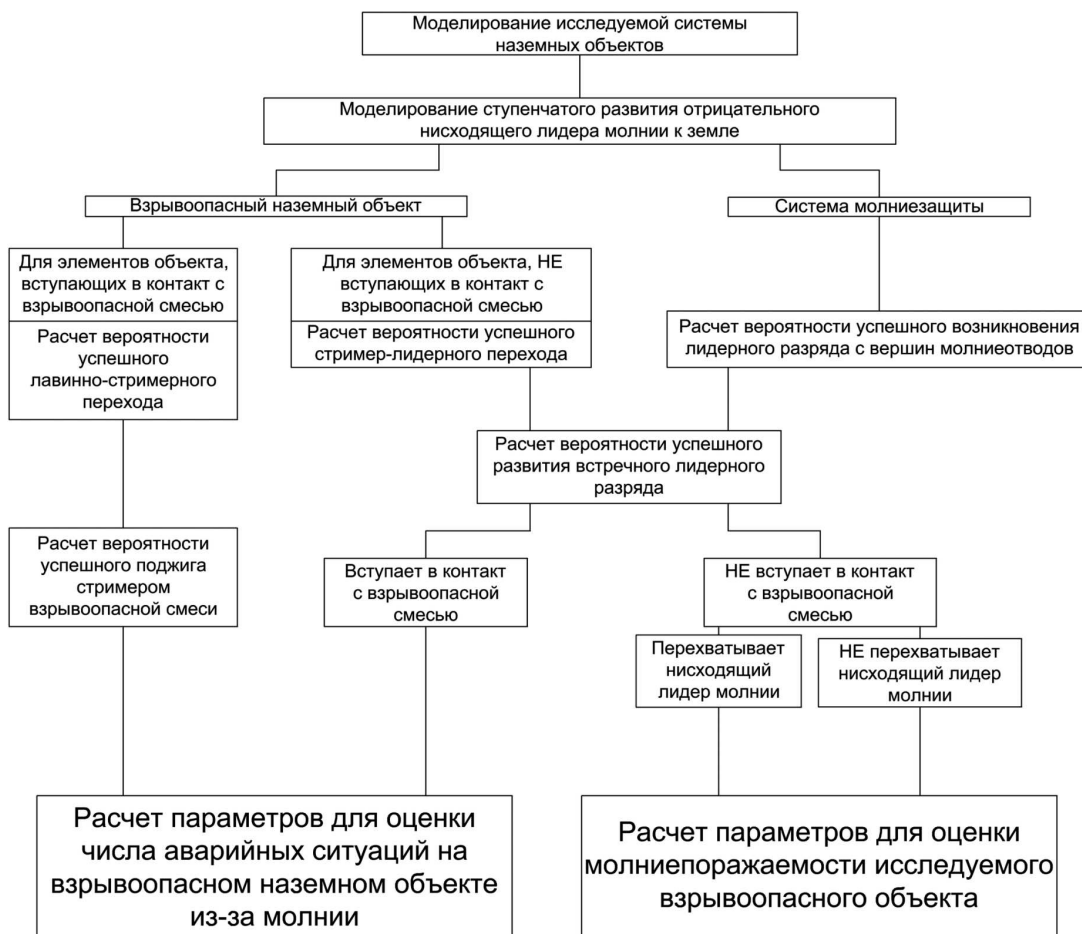


Рис. 1. Алгоритм расчета по методике

В основу методики заложен новый вероятностный комбинированный критерий возникновения положительных восходящих стримерных и лидерных разрядов с проводящих элементов конструкции взрывоопасного объекта и вершин молниеотводов. Отличительной особенностью критерия является учет случайного характера лавинно-стримерного и стример-лидерного переходов, а также анализ способности возникших незавершенных восходящих искровых разрядов, контактирующих с взрывоопасной смесью, поджечь ее и привести к аварийной ситуации.

Случайный характер лавинно-стримерного перехода определяется случайным характером зарождения и распространения электронных лавин (числа начальных электронов, коэффициента ударной ионизации, который, в свою очередь, зависит от атмосферных условий и характера распределения и величины внешнего электрического поля), их числа и взаимодействия друг с другом. Вероятность перехода электронной лавины в положительный стримерный разряд  $P_{str}$  определяется по формуле из [12], согласно которой она зависит от напряженности электрического поля на поверхности элемента конструкции объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью, в грозовых условиях и ее соотношения с критической напряженностью, при которой вероятность лавинно-стримерного перехода принимается равной 0,5:

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

где  $S$  – параметр определен экспериментально: при  $P_{str}(E_{нач}) = 0$ .

Вспышка стримерной короны с одинаковым значением протекающего через основание заряда при различных условиях выделения и отвода тепловой энергии может поджечь или не поджечь взрывоопасную смесь, т.е. воспламенение смеси является случайным событием. К основным влияющим факторам на успешность данного события можно отнести меняющиеся атмосферные условия, скорость потока, формирующего выброс, изменение концентрации вещества, случайный характер развития и прорастания самого разряда. Очевидно, что оперирование лишь минимальной энергией воспламенения смеси при исследовании воспламеняющей способности незавершенных восходящих стримерных разрядов, возникающих с элементов взрывоопасных объектов в грозовой ситуации, не позволяет количественно оценить риск поджига ими взрывоопасной смеси. Поэтому в методике определяется вероятность поджига взрывоопасной смеси  $P_{ign}$  восходящим стримерным раз-

рядом в зависимости от энергии разряда  $W$  и ее отношения с минимальной энергией воспламенения  $W_{min}$  рассматриваемой смеси по следующей формуле:

$$P_{ign} = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(S_w \frac{W - W_{50\%}}{W_{50\%}}\right)},$$

где  $S_w$  – параметр, принятый на основе экспериментальных данных [8] таким, что  $P_{ign}(W_{min}) = 0,01$ .

Моделирование ступенчатого развития отрицательного нисходящего лидера молнии подразумевает определение положений головки лидера с заданными значениями его параметров (принятое распределение заряда вдоль канала лидера  $\tau_l$ , связанное с амплитудой тока обратного разряда молнии  $I_M$  выражением из [13], угол подхода к земле относительно вертикали  $\gamma lz$ ) вдоль траектории распространения от облака к земле (рис. 2).

Вероятность возникновения аварийной ситуации на взрывоопасном объекте из-за проникновения незавершенных стримерных разрядов в область взрывоопасной смеси определяется при каждом положении головки нисходящего лидера молнии:

$$P_{acc} = P_{str} P_{ign}.$$

Вероятность формирования восходящих стримерных разрядов с вершины взрывоопасного объекта  $P'_{str}$  и вероятность возникновения аварийной ситуации на взрывоопасном объекте  $P'_{acc}$ , вызванной их проникновением в область взрывоопасной смеси, при развитии к земле отрицательного нисходящего лидера молнии с конкретными заданны-

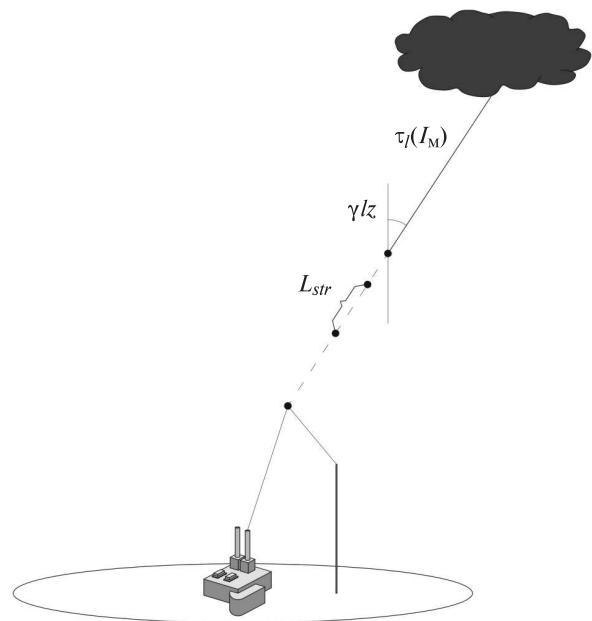


Рис. 2. К описанию моделирования ступенчатого развития отрицательного нисходящего лидера молнии в представленной методике

ми параметрами тока  $I_M$  и угла наклона относительно вертикали  $\gamma_{Lz}$  рассчитываются как усредненные значения полученных на каждой ступени вероятностей  $P_{stri}$  и  $P_{aci}$ :

$$P'_{str} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{stri} L_{sti}}{\sum_{i=1}^N L_{sti}}; \quad P'_{acc} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{aci} L_{sti}}{\sum_{i=1}^N L_{sti}},$$

где  $i$  – текущий номер положения головки отрицательного нисходящего лидера молнии, развивающегося ступенчато;  $N$  – общее число положений головки ступенчатого отрицательного нисходящего лидера молнии на всем пути от облака к земле;  $L_{sti}$  – длина ступени отрицательного нисходящего лидера молнии между  $i$ -м и  $(i-1)$ -м положением головки лидера молнии, м.

Вероятность стример-лидерного перехода (возникновения восходящего лидера) определяется по экспериментальным данным, полученным с использованием искусственных грозовых облаков [14, 15], согласно которым она зависит от заряда  $Q_{cor}$ , протекшего через основание первичной импульсной вспышки стримерной короны.

По принципу, аналогичному формированию восходящих незавершенных стримерных разрядов, определяется вероятность возникновения встречного лидерного разряда  $P'_l$  с элементов объекта, не контактирующих с взрывоопасной смесью, и вершин молниеотводов в электрическом поле отрицательного нисходящего лидера молнии с конкретными заданными параметрами тока  $I_M$  и угла наклона относительно вертикали  $\gamma_{Lz}$ :

$$P'_l = \frac{\sum_{i=1}^N P_{stri} P_{li} L_{sti}}{\sum_{i=1}^N L_{sti}}.$$

Результатами расчетов по методике являются число успешных формирований стримерных и лидерных разрядов в год с элементов исследуемого объекта и системы его молниезащиты при ее наличии с учетом возможности появления молнии с разными токами и по-разному ориентированными по направлению к земле, а также число возможных аварийных ситуаций в год на исследуемом взрывоопасном объекте из-за успешного поджига взрывоопасных смесей восходящими искровыми разрядами  $N_{up}$ :

$$N_{acc} = n_0 \Delta I_M \Delta \gamma_{Lz} \sum_{k=1}^K S_k \sum_{j=1}^M f(\gamma_{Lzj}) f(I_{Mj}) P'_{acj}; \quad (1)$$

$$N_{up\_str} = n_0 \Delta I_M \Delta \gamma_{Lz} \sum_{k=1}^K S_k \sum_{j=1}^M f(\gamma_{Lzj}) f(I_{Mj}) P'_{strj}; \quad (2)$$

$$N_{up\_l} = n_0 \Delta I_M \Delta \gamma_{Lz} \sum_{k=1}^K S_k \sum_{j=1}^M f(\gamma_{Lzj}) f(I_{Mj}) P'_{lj}; \quad (3)$$

где  $n_0$  – показатель интенсивности грозовой деятельности, уд/(км<sup>2</sup>·год);  $M$  – число рассмотренных нисходящих отрицательных лидеров молнии с заданными значениями тока молнии  $I_{Mj}$  и углом подхода  $\gamma_{Lzj}$ ;  $\Delta I_M$ ,  $\Delta \gamma_{Lz}$  – шаги интервалов, на которые разбиты возможные диапазоны токов молнии и углов подхода лидера молнии к земле, соответственно;  $\Delta I_M \sum_j f(I_{Mj})$  – нормирование вероятностей появления молнии с током  $I_{Mj}$  для всего расчетного диапазона токов к единице;

$\Delta \gamma_{Lz} \sum_j f(\gamma_{Lzj})$  – нормирование вероятностей подхода молнии к земле под углом  $\gamma_{Lzj}$  для всего расчетного диапазона углов к единице;  $K$  – общее число ячеек, на которые разбивается территория вокруг исследуемой системы объектов;  $S_k$  – площадь  $k$ -ой ячейки расчетной области.

**Результаты расчетов по предлагаемой методике для исследуемого взрывоопасного объекта, оборудованного молниеотводом.** Газоотсасывающие вентиляторные установки (ГОУ) предназначены для обеспечения надежного проветривания выемочного участка угольной шахты и предупреждения формирования местных скоплений метано-воздушной смеси (минимальная энергия воспламенения 0,28 мДж) [16]. Над обрезом трубы сброса (выхлопного патрубка) ГОУ могут образовываться взрывоопасные смеси, способные взрываться при возникновении источника зажигания, одним из которых может являться молния.

Основные геометрические параметры объекта: высота трубы от земли 6 м; высота установки 2,2 м; диаметр трубы 0,75 м; толщина стенок трубы 5 мм. Форма факела взрывоопасной области для трубы сброса, у которой на обрезе отсутствует колпак, представляет собой согласно [17] круглый усеченный конус с радиусом у основания 5 м, у вершины 2 м, высотой 10 м.

Система молниезащиты поверхностной ГОУ состоит из отдельно стоящего одиночного стержневого молниеотвода высотой 26 м, мачта которого находится на расстоянии 10 м от защищаемого объекта. Радиус кривизны вершины молниеотвода составляет 5 мм.

В качестве первоначального расчетного случая для оценки возникновения опасных восходящих

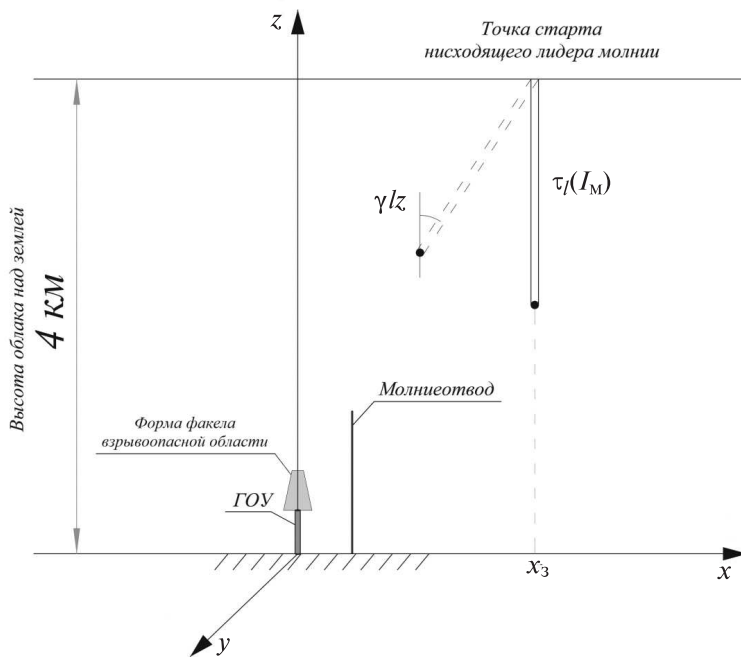


Рис. 3. К описанию расчетов по методике для исследуемого взрывоопасного объекта, оборудованного молниеотводом

разрядов с исследуемого взрывоопасного объекта принималось перемещение возможной точки старта нисходящего лидера молнии вдоль оси  $x$ , при этом предполагаемое облако находилось на высоте 4 км над землей (рис. 3).

На рис. 4 показаны зависимости вероятности возникновения стримеров со среза трубы ГОУ в зависимости от удаления точки старта вертикально

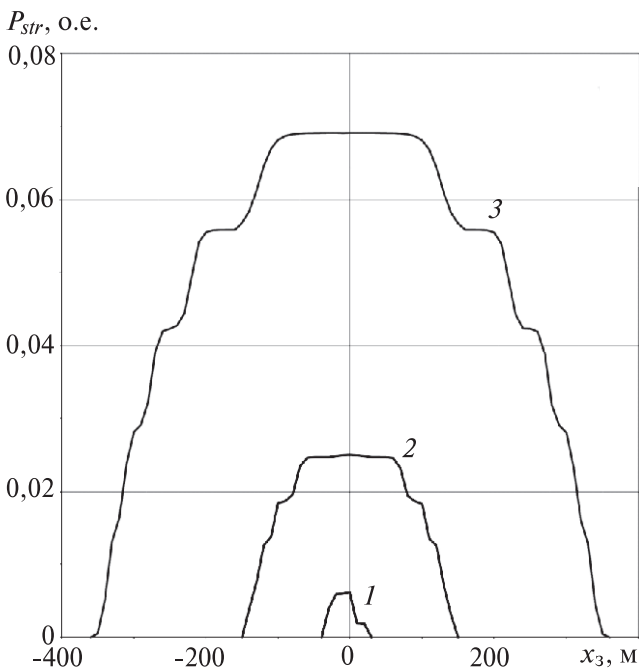


Рис. 4. Вероятность возникновения стримерных разрядов на вершине взрывоопасного объекта при удалении вертикального нисходящего лидера с различными значениями тока молнии: 1 – 6 кА (радиус области около 30 м); 2 – 30 кА (радиус – около 140 м); 3 – 90 кА (радиус – около 350 м)

направленных лидеров с различными значениями тока молнии  $I_M$ .

Результаты расчетов показывают, что значения вероятности  $P_{str}$  закономерно растут с увеличением тока молнии. С увеличением тока молнии увеличивается размер области вокруг исследуемого взрывоопасного объекта, спуск лидера в которой может приводить к возникновению опасных искровых разрядов с объекта. При этом с ростом тока молнии все слабее просматривается зависимость значений рассматриваемой вероятности от того, развивается ли лидер молнии со стороны объекта или со стороны молниеотвода. Предположительно это связано с увеличением длины ступеней при увеличении тока молнии.

Результаты расчетов вероятности возникновения стримерных разрядов с учетом всего диапазона возможных значений тока молнии (от 1 до 300 кА) и вероятностных характеристик их появления

представлены на рис. 5. Расчеты показали, что ширина области спусков вертикальных лидеров молнии, которые способны с вероятностью более  $10^{-5}$  вызвать возникновение восходящих стримерных разрядов с рассматриваемого взрывоопасного объекта, достигает около 700 м.

Вероятность поджига стримерными разрядами рассматриваемой метано-воздушной смеси близка (на несколько процентов меньше) к вероятности возникновения стримеров на вершине трубы ГОУ (рис. 5), что связано с быстрым увеличением вероятности поджига взрывоопасной смеси с превышением значения выделяемой в разряде энергии над

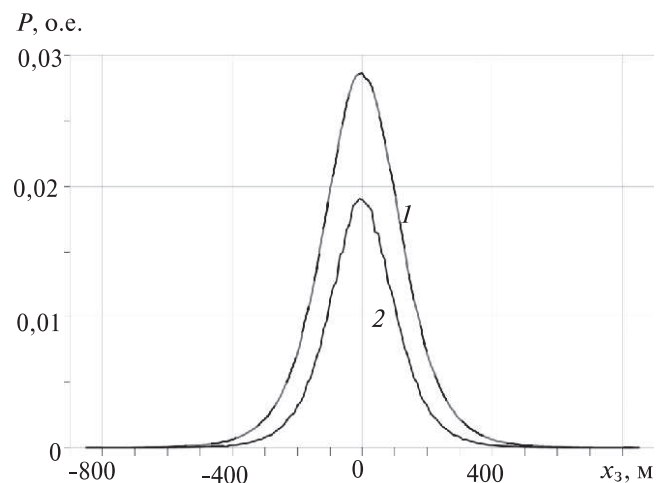


Рис. 5. Вероятность возникновения стримеров на срезе трубы газоотсасывающей установки при развитии вертикального лидера с учетом всего возможного диапазона значений тока молнии

уровнем минимальной энергии, необходимой для поджига.

Для сравнения на рис. 5 также показана нормированная по токам вероятность возникновения с вершины трубы ГОУ встречных лидерных разрядов, которую традиционно принято учитывать при оценке молниепоражаемости наземных объектов. Кривая вероятности возникновения восходящих лидеров проходит значительно ниже кривой вероятности воспламенения взрывоопасной смеси стримерными разрядами (расхождение значений в максимуме составляет 33%) и достигает нулевых значений на более близких к взрывоопасному объекту расстояниях.

Результаты расчетов, выполненных для трехмерной модели рассматриваемой системы наземных объектов с учетом возможности формирования молнии над объектом в пределах области площадью более 10000 м<sup>2</sup> и различных направлений траектории ее развития, позволяют по формулам (1)–(3) получить:

общее число возникновений стримерных разрядов с вершины трубы поверхностной ГОУ –  $N_{up\_str} = 10,7 \cdot 10^{-5}$  в год;

число возникновений с нее восходящих лидеров –  $N_{up\_l} = 7,1 \cdot 10^{-5}$  в год;

число возможных аварийных ситуаций на объекте из-за поджига опасными незавершенными восходящими искровыми разрядами взрывоопасной смеси –  $N_{ac} = 10,6 \cdot 10^{-5}$  в год.

Таким образом, отсутствие учета возможности поджига взрывоопасной смеси незавершенными стримерными разрядами, образующимися с элементов конструкции взрывоопасного наземного объекта в поле отрицательного нисходящего лидера молнии, снижает оценку риска возникновения аварийной ситуации в грозовых условиях на 30%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krausmann E., Renni E., Campedel M., Cozzani V. Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. – Nat. Hazards, 2011, vol. 59, No. 1, pp. 285–300.
2. Renni E., Krausmann E., Cozzani V. Industrial accidents triggered by lightning. – J. Hazard. Mater, 2010, 184, pp. 42–48.
3. Necci A., Argenti F., Landucci G., Cozzani V. Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks. – Rel. Eng. & Sys. Safety, 2014, 127, pp. 30–46.
4. Flisowski Z., Stanczak B., Mazzetti C., Pompili M. Hazard of explosion due to upward streamers and secondary discharges at lightning stroke. – Proc. of the 20th ICLP, Switzerland, 1990, pp. 1–5.
5. Rock M. and Shulzhenko E. Reduction of field intensity on lightning protected installations with Ex zones to avoid upward leaders. – Proc. of the 32th ICLP, China, 2014, pp. 898–903.
6. Верёвкин В.Н., Смелков Г.И., Черкасов В.Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. – М.: МИЭЭ, 2006, 170 с.

7. Hearn G. Static electricity. Guidance for plant engineers. – Wolfson Electrostatics Limited, 2002.

8. Mazzetti C., Flisowski Z., Stanczak B. Investigation of upward discharge parameters in correlation with ignition of explosive mixtures at impuls voltages. – Proc. of the 21st ICLP, Germany, 1992, pp. 463–468.

9. Gundersen M. and Ronney P. Transient plasma ignition for clean, fuel-efficient transportation vehicle engines. – Metrans. proj., 2007, No. 07–20.

10. Дегтярев Д.В., Печеркин А.С. Требования промышленной безопасности в области молниезащиты резервуарных парков нефти и нефтепродуктов. – Безопасность труда в промышленности, 2010, № 2, с. 28–30.

11. СТО Газпром 2-1.11-170-2007. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и коммуникаций ОАО «Газпром». – М.: ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», 2008, 37 с.

12. Fridman A. Plasma chemistry. Published by Cambridge University Press, 2008, New York (USA).

13. Cooray V. Lightning protection. – IET Power and Energy, Series 58. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2010.

14. Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенок Т.К., Темников А.Г. Методика расчета поражаемости молнией наземных взрывоопасных объектов. – Материалы IV Международной конф. по молниезащите. Санкт-Петербург, 2014, с. 42–50.

15. Темников А.Г., Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенок Т.К. О критерии возникновения восходящего лидера с наземных объектов. – Письма в ЖТФ, 2014, т. 40, № 3, с. 42–48.

16. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Серия 05. Вып. 21. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности», 2012, 128 с.

17. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации наземной газоотсасывающей вентиляционной установки на угольных шахтах Кузбасса. – Кемерово: ООО «Научно-производственное предприятие «Шахтпожсервис», 2005, 44 с.

*Авторы: Гундарева Светлана Вячеславовна окончила Институт электроэнергетики Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в 2011 г. Младший научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ».*

*Калугина Инна Евгеньевна окончила электроэнергетический факультет (ныне Институт электроэнергетики) МЭИ в 1985 г. В 2003 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка уточненной методики расчета числа ударов и прорывов молнии через тросовую защиту линий электропередачи» в МЭИ. Доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».*

*Темников Александр Георгиевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1991 г. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование электрогазодинамических аэрозольных потоков и электрических разрядов из них» в МЭИ. Доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».*

## Calculation of hazardous upward incomplete spark discharges formation on facilities with explosive atmosphere in thunderstorm conditions

**GUNDAREVA Svetlana Vyacheslavovna** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) – Junior Scientific Researcher

**KALUGINA Inna Yevgen'yevna** (NRU «MPEI» Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**TEMNIKOV Aleksandr Georgiyevich** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*Method of calculation of hazardous reciprocal upward incomplete spark discharges formation on the external structural components of a facility with explosive atmosphere in an electric field of stepped negative downward lightning leader has presented. New probabilistic combined criterion of estimation of the positive upward streamer and leader formation on conductive structural components and lightning rods has used taking into account the random character of avalanche-to-streamer and streamer-to-leader transitions, and ignition probability of the considered flammable mixture by the upward streamer discharge in dependence on the energy dissipated in the discharge channel. Calculation results of the hazardous upward discharges for the case of the coal mine gas suction facility protected with the lightning rod system in the electric field of the downward lightning leader have presented. Dependences of probability of the streamer appearance from a tip of the gas suction facility on the distance of downward leader propagation place, on the lightning current value taking into account all ranges of the lightning current values and the probabilistic characteristics of their appearance have determined. It has shown that distance from the vertical downward lightning leader when the probability of the upward streamer discharge appearance on the explosive object exceeds 10<sup>-5</sup> could achieve up to 700 m. It has found that the ignition probability of the considered methane-air mixture by streamer discharge is close to streamer formation probability on a top of the emission pipe. Using the developed method, calculations of the number of the upward streamer and leader discharges on the pipe of the considered gas suction facility, the number of dangerous upward streamer discharges capable to ignite the explosive gas mixture have carried out for three-dimension model of the considered system of grounded objects. It has found that the absence of the consideration of the explosive mixture possibility by the incomplete streamer discharges developing on the explosive grounded object in the field of the negative downward lightning leader could decrease the estimation of the dangerous situation appearance in the thunderstorm conditions up to 30%.*

**Key words:** lightning protection, streamer and leader discharges, explosive mixture, gas suction facility, combined criterion, probabilistic approach, calculation

### REFERENCES

1. **Krausmann E., Renni E., Campedel M., Cozzani V.** Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. – *Nat. Hazards*, 2011, vol. 59, No. 1, pp. 285–300.
2. **Renni E., Krausmann E., Cozzani V.** Industrial accidents triggered by lightning. – *J. Hazard. Mater.*, 2010, 184, pp. 42–48.
3. **Necci A., Argenti F., Landucci G., Cozzani V.** Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks. – *Rel. Eng. & Sys. Safety*, 2014, 127, pp. 30–46.
4. **Flisowski Z., Stanczak B., Mazzetti C., Pompili M.** Hazard of explosion due to upward streamers and secondary discharges at lightning stroke. – *Proc. of the 20th ICLP, Switzerland*, 1990, pp. 1–5.
5. **Rock M. and Shulzhenko E.** Reduction of field intensity on lightning protected installations with Ex zones to avoid upward leaders. – *Proc. of the 32th ICLP, China*, 2014, pp. 898–903.
6. **Verevkin V.N., Smelkov G.I., Cherkasov V.N.** *Elektrostaticheskaya iskrobezopasnost' i molniyezashchita* (Electrostatic spark safety and lightning). Moscow, Moscow Institute of Energy Security and Energy Saving, 2006, 170 c.
7. **Hearn G.** Static electricity. Guidance for plant engineers. – Wolfson Electrostatics Limited, 2002.
8. **Mazzetti C., Flisowski Z., Stanczak B.** Investigation of upward discharge parameters in correlation with ignition of explosive mixtures at impuls voltages. – *Proc. of the 21st ICLP, Germany*, 1992, pp. 463–468.
9. **Gundersen M. and Ronney P.** Transient plasma ignition for clean, fuel-efficient transportation vehicle engines. – *Metrans. proj.*, 2007, No. 07–20.
10. **Degtyarev D.V., Pecherkin A.S.** *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – in Russ. (Safety in Industry)*, 2010, No. 2, pp. 28–30.
11. **STO Gazprom 2-1. 11-170–2007.** *Instruktsiya po ustroystvu molniyezashchity zdanii, soorizhenii i kommunikatsii AOA «Gazprom».* – IRTs Gasprom (Instructions for lightning protection of buildings, structures and communications), Moscow, «Information and Advertising», 2008, 37 p.
12. **Fridman A.** Plasma chemistry. Published by Cambridge University Press, 2008, New York (USA).
13. **Cooray V.** Lightning protection. – *IET Power and Energy. Series 58. The Institution of Engineering and Technology*, London, United Kingdom, 2010.