

И.Е.КАЛУГИНА, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

А.Г.ТЕМНИКОВ, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

С.В.ГУНДАРЕВА, инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЕРШИНЫ ОБЪЕКТА И МОЛНИЕОТВОДА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ МОЛНИЕЙ

Описана імовірнісна методика розрахунку ,блискавкозахисту зосереджених об'єктів, що базується на фізичних уявленнях про параметри і закономірності розвитку блискавки і поразки нею наземних об'єктів. Представлені і проаналізовані результати числових експериментів з дослідження впливу форми вершини зосередженого об'єкта і стрижневого блискавководводу на їх імовірність ураження розрядом блискавки.

Probabilistic method of the lightning protection calculation of compact slender objects based on the physical representations about the parameters and laws of a lightning development and ground object lightning affection is described. Results of the numerical experiments on the investigations of influence of the compact slender object and lightning rod tip form on a probability of its lightning discharge affection have been presented and analyzed.

Описана вероятностная методика расчета молниезащищенности сосредоточенных объектов, базирующаяся на физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии и поражения ею наземных объектов. Представлены и проанализированы результаты численных экспериментов по исследованию влияния формы вершины сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на их вероятность поражения разрядом молнии.

Введение. Современные высокие требования к качеству производства и электроснабжения, а также внедрение в промышленность микропроцессорной техники поднимают необходимый уровень требований к защите объектов электроэнергетики, связи, транспорта, промышленных и гражданских зданий и сооружений от опасных воздействий прямого удара молнии.

Практика молниезащиты промышленных (в том числе электроэнергетических) объектов продолжает опираться на нормы, правила и технические решения, принятые в основном еще в прошлом веке. Их рекомендации уже не позволяют проектировать системы молниезащиты с достаточной степенью надежности. Усугубляет положение малая статистика закономерностей поражаемости молнией объектов, без которой трудно выявить недостатки существующих решений и предложить более эффективные.

Поэтому вопросы расчета и проектирования молниезащиты становятся все более актуальными [1]. Решением является разработка и развитие достоверных методик расчета показателей молниезащищенности объектов, имею-

щих в своей основе физически обоснованное описание процесса поражения их молнией.

Повышение надежности возможно лишь при условии дальнейшего углубленного развития физических основ молниезащиты и обоснования дифференцированного подхода к выбору средств защиты в зависимости от тяжести ожидаемых последствий при поражении различных объектов молнией. В частности, в настоящее время нигде в нормативной документации [2-4] не рассматривается влияние формы молниеотвода и защищаемого объекта на их вероятность поражения. Считается, что объект, полностью размещенный внутри зоны защиты молниеотвода, защищен с заданной надежностью независимо от его формы.

В то же время в результате экспериментальных исследований установлено, что такое влияние существует [5]. Полевые исследования [6] показали существенное влияние формы вершины сосредоточенного объекта в виде мачты на поражение его разрядом молнии. Наибольшая поражаемость наблюдалась для мачт с вершиной, имеющей промежуточную форму между острой и практически гладкой. Влияние формы вершины объекта и молниеотвода также отмечалось, например, в модельных экспериментах с искусственными облаками заряженного водного аэрозоля [7].

Более того, на принципе изменения радиуса вершины молниеотвода делаются попытки увеличения эффективности его действия. Сейчас уже предлагаются и патентуются технические решения по влиянию на вероятность поражения объектов и на рост эффективности работы молниеотводов через изменение как формы вершины молниеотвода (например, применение системы тороидальных экранов), так и через расположение на вершине объектов металлических конструкции специфической формы [8].

В связи с этим актуальными являются исследования влияния формы вершины объекта и молниеотвода на эффективность молниезащиты сосредоточенных объектов на основе вероятностного подхода. В настоящее время на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений Национального исследовательского университета «МЭИ» разработана вероятностная методика расчета молниепоражаемости объектов, базирующаяся на физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии и поражения ею наземных объектов [9-12].

1 Основные положения методики

Методика развивает традиционный вероятностный подход оценки молниезащищенности наземных объектов с учетом процесса развития нисходящего лидера молнии и поражения им наземного объекта. Принятая модель ориентации молнии на объект базируется на существующих физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии [13], [14]. Условно этот процесс можно разделить на два этапа: до ориентации лидера на объект и собственно сам процесс поражения молнией объекта.

Нисходящий лидер рассматривается как вертикальный или наклонный цилиндрический стержень со сферическим нижним окончанием. Распределение заряда по каналу лидера моделируется линейным зарядом с постоянной плотностью $\tau_{л}$ и точечным зарядом головки $q_{г}$, согласно гипотезе нейтрализации связанными с амплитудой тока обратного разряда молнии [15].

На первом этапе развития отрицательного лидера молнии возможная искривленность его траектории учитывается путем рассмотрения возможности подхода лидера под разными углами к объекту. Отражение ступенчатого характера его движения осуществляется с помощью движения головки лидера по виртуальной пространственной сетке с шагом, соответствующим наблюдаемым длинам ступеней отрицательного лидера молнии.

Начало процесса ориентации молнии на объект и его поражение связывается с развитием с объекта встречного лидера навстречу нисходящему лидеру молнии. Процесс развития встречных лидеров зависит от заряда нисходящего лидера, направления его развития и геометрии заземленных объектов, что определяет распределение напряженности и потенциала электрического поля между ними. На прямых, соединяющих головку лидера с вершиной объекта (S_0), молниеввода (S_M), а также точкой земли непосредственно под головкой лидера (S_3) (рис. 1), выделяются участки одинаковой длины S . При развитии нисходящего лидера молнии на этих участках обеспечиваются разности потенциалов U_0 , U_M и U_3 соответственно.

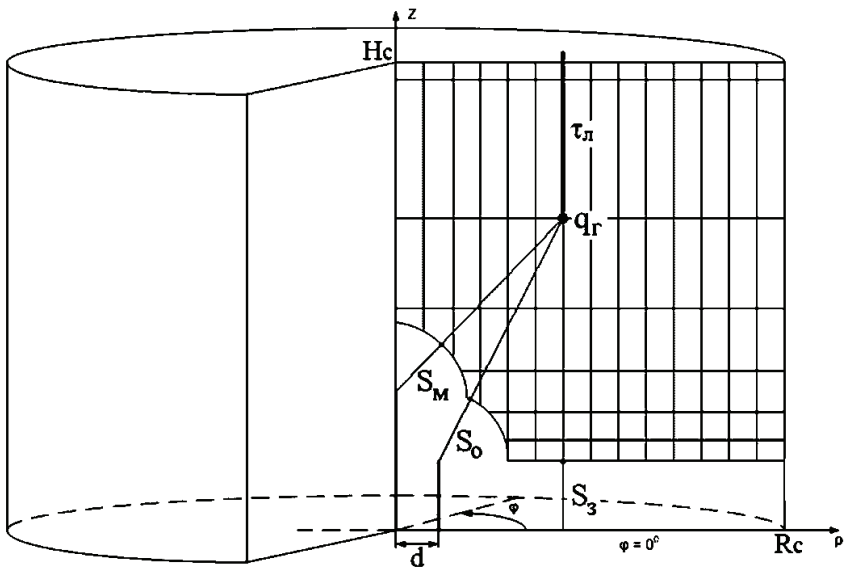


Рисунок 1 – К обоснованию вероятностной методики

Критерием возникновения встречного лидера принимается наличие та-

кой разности потенциалов между заземленным объектом и некоторой точкой на расстоянии от него S , которая обеспечивает пробой этого воздушного промежутка:

$$\int_h^{h+S} E(x) dx \geq U_{50\%}, \quad (1)$$

где h – высота объекта; S – расстояние от объекта до некоторой точки вблизи него; $U_{50\%}$ – пятидесятипроцентное разрядное напряжение, необходимое для пробоя воздушного промежутка S .

Наличие разбросов пробивных напряжений промежутков делает возможным возникновение встречного лидера с любого из исследуемых объектов с некоторой вероятностью.

В случае исследования молниезащиты сосредоточенных объектов необходимо рассматривать задачу в рамках трехмерной модели. Совокупность положений головки лидера, при которых молния может ударить в систему наземных объектов со сколь угодно малой вероятностью, представляет собой объемную область, напрямую зависящую от вида трехмерной системы координат (рис. 1). При каждом положении головки лидера определяется минимальный ток молнии $I_{\text{M min}}$, при котором молния обязательно ударит в один из наземных электродов, и вероятность его появления [15]. При этом токе методом эквивалентных зарядов рассчитываются разности потенциалов на рассматриваемых промежутках S и вероятности возникновения встречного лидера с каждого из рассматриваемых объектов [12].

Таким образом, при каждом положении головки лидера определяется вероятность удара молнии в объект при условии, что она не ударит в молниеотвод или землю. Далее результат суммируется по ячейкам, и определяется общее число ударов молнии в объект $N_{\text{уд}}$ за определенный промежуток времени, а также общая вероятность прорыва молнии к объекту через защиту молниеотводов $P_{\text{пр}}$.

2 Влияние характеристик объекта и молниеотвода на поражение их разрядом молнии

Определение влияния характеристик молниеотвода и самого объекта (в первую очередь, формы и радиусов кривизны их вершин) на вероятность поражения его разрядом молнии сейчас является одним из основных направлений в области физики молнии и молниезащиты [16].

В первой серии численных экспериментов рассматривается простейшая система сосредоточенных наземных объектов состоящая из защищаемого объекта в виде вертикального стержневого электрода высотой h_0 с радиусом кривизны вершины r_0 и одиночного стержневого молниеотвода высотой h_m с радиусом кривизны вершины r_m , находящегося на расстоянии d от объекта (рис. 2).

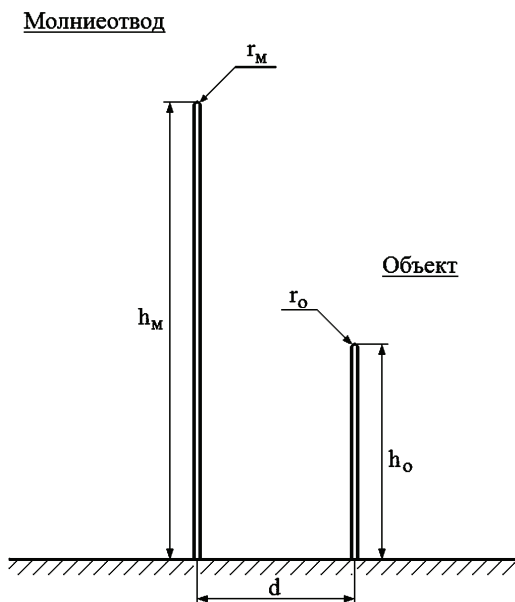


Рисунок 2 – Исследуемая система наземных объектов

Для определения влияния радиусов вершин объекта и молниеотвода на вероятность поражения их разрядом молнии рассматриваются два расчетных случая. Объект высотой 7 метров ($h_o = 7$ м) и молниеотвод высотой 15 метров ($h_M = 15$ м) находятся на расстоянии 5 и 15 метров ($d_1 = 5$ м, $d_2 = 15$ м) друг от друга.

Для каждого расчетного случая по представленной ранее вероятностной методике проведен численный эксперимент, включающий в себя две серии расчетов: 1) при изменении радиуса вершины объекта при фиксированном радиусе вершины молниеотвода ($r_M = 1$ см); 2) при изменении радиуса вершины молниеотвода при фиксированном радиусе вершины защищаемого объекта ($r_o = 1$ см). Выбранный для расчетов диапазон радиусов вершин рассматриваемых электродов охватывает наиболее распространенные значения радиусов вершин реальных молниеприемников: $r = (0,3 \div 10)$ см.

Результаты расчетов по влиянию радиусов вершин сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на вероятность их поражения разрядом молнии представлены на рис. 3-6.

Проведенные численные эксперименты и анализ полученных результатов показали следующее. С увеличением радиуса вершины объекта при фиксированном радиусе вершины молниеотвода вероятность прорыва молнии к объекту уменьшается, а вероятность удара молнии в стержневой молниеотвод растет (см. рис. 3-6). Такие зависимости могут быть связаны с тем, что для используемого критерия возникновения восходящего встречного

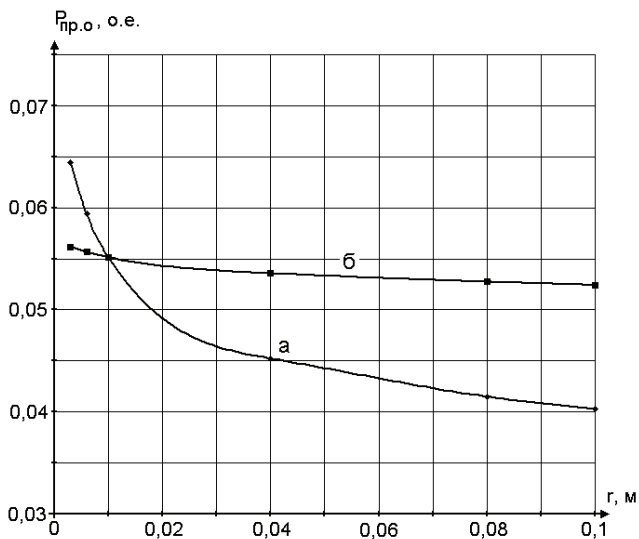


Рисунок 3 – Зависимость вероятности удара молнии в объект от радиуса его вершины или вершины молниеотвода (при расстоянии между объектами $d = 5$ м):
a – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;
б – зависимость от радиуса вершины объекта

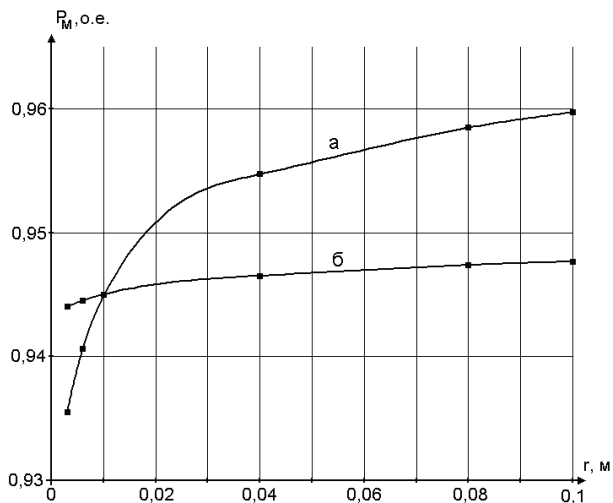


Рисунок 4 – Зависимость вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины объекта (при расстоянии между объектами $d = 5$ м):
a – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;
б – зависимость от радиуса вершины объекта

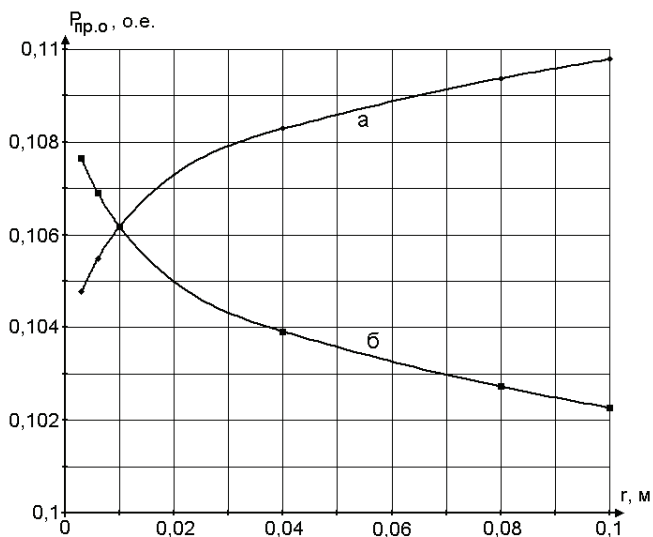


Рисунок 5 – Зависимость вероятности удара молнии в объект от радиуса его вершины или вершины молниеотвода (при расстоянии между объектами $d = 15$ м):
 а – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;
 б – зависимость от радиуса вершины объекта

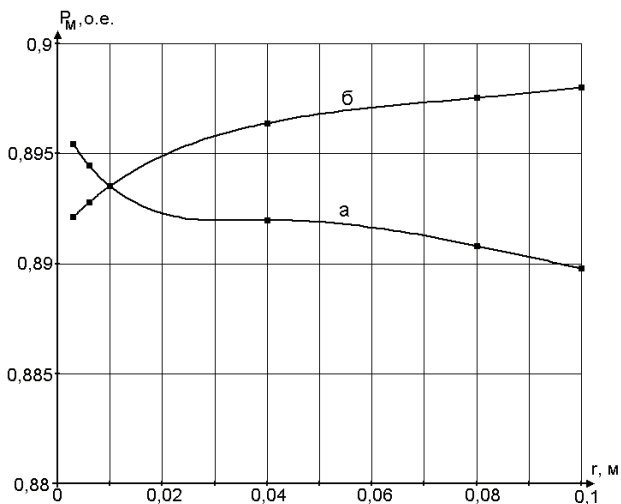


Рисунок 6 – Зависимость вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины объекта (при расстоянии между объектами $d = 15$ м):
 а – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;
 б – зависимость от радиуса вершины объекта

лидерного разряда с наземного объекта (1) существенную роль играет расположение головки нисходящего лидера относительно рассматриваемых промежутков S вблизи вершин объекта и молниеотвода.

Чем ближе объект находится к молниеотводу, тем сильнее различие в радиусах кривизны вершины объекта и вершины молниеотвода отражается на изменении показателей его молниезащищенности. При $d = 5$ м при изменении радиуса вершины объекта от 0,3 см до 10 см вероятность поражения его разрядом молнии уменьшается на 6,7 % (см. рис. 3, б). В то же время при существенном увеличении расстояния между объектом и молниеотводом ($d = 15$ м) расчетная вероятность поражения объекта снижается только на 5,38 % (см. рис. 5, б).

Необходимо отметить, что при изменении радиуса вершины молниеотвода в том же диапазоне для фиксированного радиуса вершины объекта в случае, когда объект находится рядом с молниеотводом, наблюдается существенное снижение (на 62,5 %) вероятности поражения защищаемого объекта (см. рис. 3, а). А при существенном увеличении расстояния между объектом и молниеотводом ($d = 15$ м) расчетная вероятность поражения объекта, наоборот, даже немного растет на 4,77 % (см. рис. 5, а).

Аналогичные, по характеру, тенденции наблюдались и для зависимостей вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины защищаемого объекта (см. рис. 4, б). В случае увеличения радиуса вершины молниеотвода, находящегося достаточно близко от объекта ($d = 5$ м), в указанном выше диапазоне наблюдается рост вероятности удара молнии в молниеотвод на 2,56 % (рис. 4, а), однако количество ударов молнии в молниеотвод становится меньше. При этом, как отмечено выше, существенно уменьшается вероятность поражения молнией защищаемого сосредоточенного объекта. Это может быть связано со следующим. При увеличении радиуса кривизны вершины молниеотвода электрическое поле у его вершины становится более однородным, что, согласно критерию (1), приводит к увеличению величины тока молнии, необходимого для образования встречного лидера с молниеотвода, и, соответственно, к уменьшению числа ударов в него молнии. В то же время при близком расположении объекта и защищающего его стержневого молниеотвода заряды, наводимые на молниеотводе нисходящим лидером молнии, оказывают влияние на электрическое поле вблизи вершины объекта (частично экранируя его), что затрудняет возникновение встречного лидера с защищаемого объекта. Более того, расчеты показали, что увеличение радиуса вершины молниеотвода приводит к уменьшению ударов молнии во всю систему возвышающихся объектов. В случае увеличения расстояния между объектом и защищающим его стержневым молниеотводом взаимное влияние наведенных на заземленных электродах зарядов становится существенно меньше. В результате, наблюдается увеличение доли ударов в объект, а влияние радиуса вершины молниеотвода на вероятность его поражения молнией становится менее ярко выраженной (см. рис. 5, б).

Во второй серии численных экспериментов по исследованию влияния формы защищаемого объекта на параметры его молниезащищенности были выполнены расчеты по вероятностной методике для систем наземных электродов, в которых защищаемые объекты имели различную конфигурацию вершины:

- объект в виде стержня с полусферической вершиной (далее стержень) (см. рис. 2);
- сосредоточенный стержневой объект с тороидальной вершиной, выполненной из цилиндрического проводника (рис. 7).

Система электродов состояла из молниеотвода высотой $h_m = 20$ м и радиусом кривизны вершины $r_m = 0,008$ м. Защищаемый объект располагался на расстоянии $d = 6$ м от него. В расчетах анализировались два значения радиуса тора: $R_{01} = 0,1$ м и $R_{02} = 1,0$ м. Радиус сечения цилиндрического проводника принимался равным $r_k = 0,008$ м.

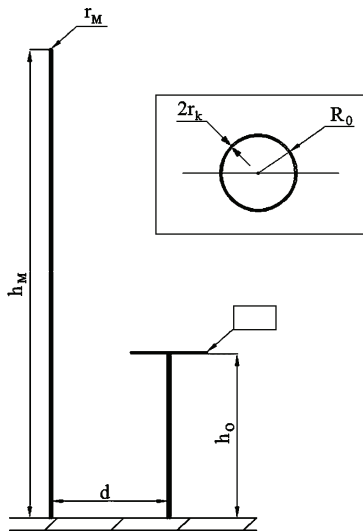


Рисунок 7 – Сосредоточенный стержневой объект с тороидальной вершиной

При проведении расчетов положение вершины объекта менялось по высоте от 5 м до 20 м. Результаты численного эксперимента представлены в таблице. На рис. 8 показаны зависимости вероятности прорыва молнии на защищаемый объект от его высоты для исследуемых форм вершины объекта.

Как видно из зависимостей на рис. 8, стержневой объект с тороидальной вершиной имеет большую вероятность прорыва на него молнии, чем объект с полусферической вершиной с малым радиусом, и разница между значениями увеличивается при увеличении радиуса тора. Таким образом, расчеты по вероятностной методике на основе критерия возникновения восходящего

встречного лидерного разряда с наземного объекта (1) показали существенное влияние формы и размеров защищаемого объекта на эффективность его защиты стержневыми молниеотводами. Такие результаты коррелируются с отмечаемой в большинстве современных работ по молниезащите необходимостью учета такого влияния (например, в [17] или в [18]).

Таблица 1 – Влияние формы объекта на показатели молниезащищенности

$h_0, \text{ м}$	5,0	10,0	15,0	20,0
Стержень	$8,4663 \cdot 10^{-5}$	$4,5900 \cdot 10^{-2}$	$3,9540 \cdot 10^{-1}$	$5,0002 \cdot 10^{-1}$
Тор ($R_{01}=0,1 \text{ м}$)	$9,0894 \cdot 10^{-5}$	$4,6472 \cdot 10^{-2}$	$3,9632 \cdot 10^{-1}$	$5,0062 \cdot 10^{-1}$
Тор ($R_{02}=1 \text{ м}$)	$1,5904 \cdot 10^{-4}$	$5,0576 \cdot 10^{-2}$	$4,0388 \cdot 10^{-1}$	$5,0673 \cdot 10^{-1}$

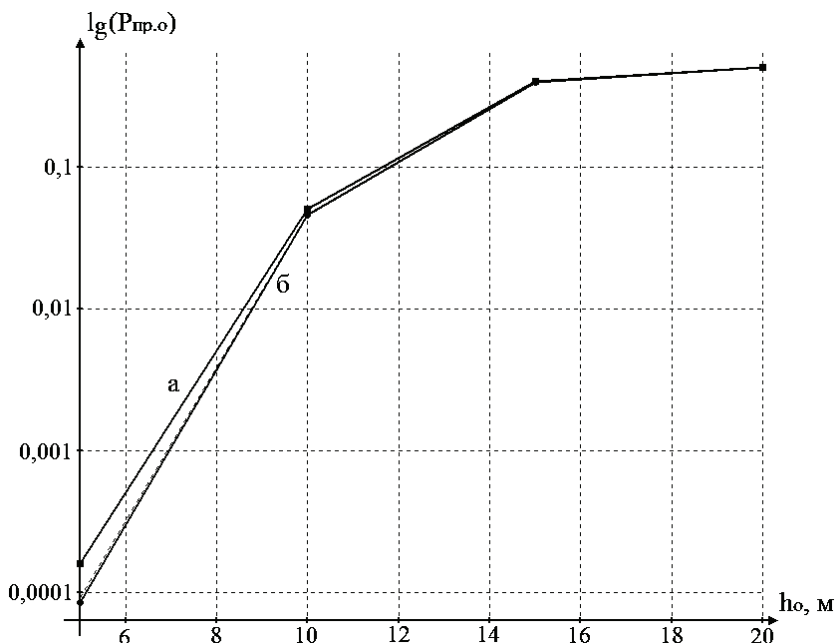


Рисунок 8 – Влияние формы объекта на показатели молниезащищенности: *a* – вероятность прорыва молнии на стержневой объект с тороидальной вершиной радиусом 1 м; *б* – вероятность прорыва молнии на стержневой объект с полусферической вершиной радиусом 8 мм

Ключевым моментом для учета влияния формы вершины защищаемого объекта и стержневого молниеотвода на эффективность молниезащиты является формулирование наиболее физически обоснованного критерия возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземного объекта. Несмотря на то, что используемый в вероятностном методе критерий (1) хо-

рошо зарекомендовал себя при решении ряда проблем молниезащиты, дальнейшее развитие вероятностного метода возможно на основе новых подходов к моделированию возникновения восходящего лидерного разряда в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии или анализа возможности использования в вероятностном методе имеющихся в настоящий момент современных моделей возникновения восходящего лидера [19-23].

Заключение

На основе численных экспериментов по расчету молниезащиты сосредоточенных объектов стержневым молниеотводом по вероятностной методике показано влияние на поражаемость сосредоточенного наземного объекта разрядом молнии не только его расположения относительно молниеотвода, но характеристик самого объекта и защищающего его молниеотвода (в первую очередь, формы радиуса кривизны вершины как самого объекта, так и защищающего его молниеотвода).

Полученные результаты открывают новые возможности для дальнейшего использования вероятностной методики оценки эффективности молниезащиты объектов, особенно при введении в нее физически обоснованного критерия возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземных объектов. Перспективным представляется такой подход при определении молниезащищенности сооружений сложной конфигурации, которыми в большинстве случаев являются реальные промышленные и энергетические объекты и сооружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы: 1. Целебровский Ю. В. Актуальные вопросы молниезащиты объектов электроэнергетики // Первая Российская конференция по молниезащите, Новосибирск, 2007. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО – 153 – 34.21.122-2003. – М.: МЭИ, 2004. 3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. – С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 4. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning. – Part I: General principles. 2005. 5. C. Bouquegneau A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. – 65 (2007). – P. 395-399. 6. C.B. Moore, W. Rison, J. Mathis, G. Aulich Lightning rod improvements // J. Appl. Meteorology. – 39. – 2000. – PP. 593-609. 7. Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Герастенок Т.К., Белова О.С. Применение искусственных заряженных облаков для исследования молниезащиты сосредоточенных объектов на моделях // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – № 49. – 2011. – С. 151-170. 8. F.A.M. Rizk Analysis of Space Charge Generating Devices for Lightning Protection: Performance in Slow Varying Fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 25, No. 3. – July 2010. – PP. 1996-2006. 9. Калугина И. Е. Развитие вероятностной методики расчета молниезащиты линий СВН и УВН // Вестник МЭИ. – 2008. – № 1. – С. 79-83. 10. Калугина И. Е. Развитие вероятностной методики расчета молниезащищенности воздушных линий электропередачи // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 25-30. 11. Никитин О.А., Дьяков А. Ф., Верецагин И. П. Анализ основных влияющих факторов в расчете вероятности поражения молнией наземных объектов в сборнике Теория и практика электрических разрядов в энергетике // Под ред. чл.-кор. РАН А.Ф. Дьякова ЮЦПК РП

«Южэнерготехнадзор». – Пятигорск, 1997. – 314 с. **12.** *Калугина И. Е., Гундарева С. В., Белогловский А. А., Темников А. Г.* Развитие вероятностной методики для оценки поражаемости молнией сосредоточенных объектов. // Вестник МЭИ. – № 2. – 2012. **13.** *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 223 с. **14.** *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. **15.** *Ларионов В.П., Колечицкий Е.С., Шульгин В.Н.* Расчет вероятности прорыва молнии сквозь грозовую защиту // Электричество. – № 5. – 1981. – С. 19-23. **16.** *V. Rakov.* A Review of Triggered-Lightning Experiments // 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, 2010. **17.** *Becerra, M., Cooray, V., Hartono, Z.* Identification of lightning vulnerability points on complex grounded structures // Journal of Electrostatics. – Vol. 65. – 2007. – PP. 562-570. **18.** *F.A.M. Rizk* Modeling of Lightning Exposure of Buildings and Massive Structures // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 24, No. 4. – October 2009. – PP. 1987-1998. **19.** *M. Becerra, V. Cooray.* A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 21, No. 2. – April 2006. – PP. 897-908. **20.** *L. Delleria and E. Garbagnati.* Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part 1: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 5, No. 4. – October 1990. – PP. 2009-2022. **21.** *N. Goelian, P. Lalande, A. Bondiou-Clergerie, G.-L. Bachiega, A. Gazzani, I. Gallimberti* A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps // J. Phys. D: Appl. Phys. – Vol. 30. – 1997. – PP. 2441–2452. **22.** *Farouk A. M. Rizk.* Modeling of Proximity Effect on Positive Leader Inception and Breakdown of Long Air Gaps // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 24, No. 4, – October 2009. – PP. 2311-2318. **23.** *Petrov, N. I., Waters, R. T.* Determination of the striking distance of lightning to earthed structures // Proc. R. Soc. Lond. – A 450. – 1995. – PP. 589-601.

Поступила в редколлегию 27.03.2012.