

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА НАДЕЖНОСТИ
МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ****AUTOMATION OF DESIGN AND CALCULATION OF RELIABILITY
OF LIGHTNING PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES**

*Субачев С. В., кандидат технических наук, доцент,
Субачева А. А., кандидат педагогических наук, доцент,
Сафронова И. Г., кандидат педагогических наук, доцент,
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург*

*Subachev S., Subacheva A., Safronova I.,
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg*

В работе описана актуальность и показаны преимущества использования разработанного программного обеспечения для автоматизированного расчета зон защиты молниеотводов зданий и сооружений требуемой надежности в соответствии с действующими методиками, в том числе для определения зоны защиты методом фиктивной сферы. В настоящее время в России действуют несколько методик определения зон защиты молниеотводов, и при проектировании молниезащиты проектировщик может пользоваться любой из них. Использование предлагаемого программного обеспечения, во-первых, избавляет проектировщика от необходимости выполнять множество расчетов (количество которых увеличивается в квадратичной зависимости от количества молниеотводов). Во-вторых, автоматически создаваемая трехмерная модель зоны защиты позволяет на ранней стадии обнаружить ошибки, которые при традиционном проектировании молниезащиты в виде двумерных проекций могут быть не замечены проектировщиком, в работе показан такой случай. В-третьих, программа позволяет рассчитать зону защиты не только типовых комбинаций из одиночных и двойных стержневых и тросовых молниеотводов, в том числе разновысоких, описанных в действующих нормативных документах по молниезащите, но и, благодаря разработанному оригинальному алгоритму, методом «фиктивной сферы» определять зону защиты произвольной комбинации стержневых, тросовых и сетчатых молниеотводов в любом количестве.

Ключевые слова: молниезащита, молниеотвод, зона защиты, САПР, моделирование.

The paper shows the relevance and advantages of using the developed software for automated calculation of the protection zones of lightning rods of buildings and structures of the required reliability in accordance with existing methods, including for determining the protection zone using the fictitious sphere method. Currently in Russia there are several methods for determining the protection zones of lightning rods, and when designing lightning protection, the designer can use any of them. The use of the proposed software, firstly, relieves the designer of the need to perform many calculations (the number of which increases in quadratic dependence on the number of lightning rods). Secondly, the automatically created three-dimensional model of the protection zone allows at an early stage to detect errors that, in the traditional design of lightning protection in the form of two-dimensional projections, may not be noticed by the designer, such a case is shown in the paper. Thirdly, the program allows you to calculate the protection zone not only for typical combinations of single and double rod and wire lightning rods, including those of

different heights, described in the current regulatory documents on lightning protection, but also, by the developed original algorithm, to determine the zone using the «fictitious sphere» method protection of any combination of rod, wire and mesh lightning rods in any quantity.

Keywords: lightning protection, lightning rod, protection zone, CAD, modeling.

Согласно статистическим данным за предшествующие 5 лет [1], количество пожаров в Российской Федерации, возникающих вследствие грозových разрядов, неуклонно растет (рис. 1), ущерб от них превышает десятки миллионов рублей в год (рис. 2), количество жертв от этих пожаров также увеличивается (рис. 3). А в арктической зоне за период с 2010

по 2020 гг. количество зарегистрированных ударов молний возросло более чем в 8 раз [2, 3]. Это говорит о том, что обоснование и проектирование молниезащиты зданий и сооружений с требуемой надежностью – весьма актуальная задача обеспечения пожарной безопасности этих объектов, в том числе при анализе пожарных рисков на производственных объектах [4].

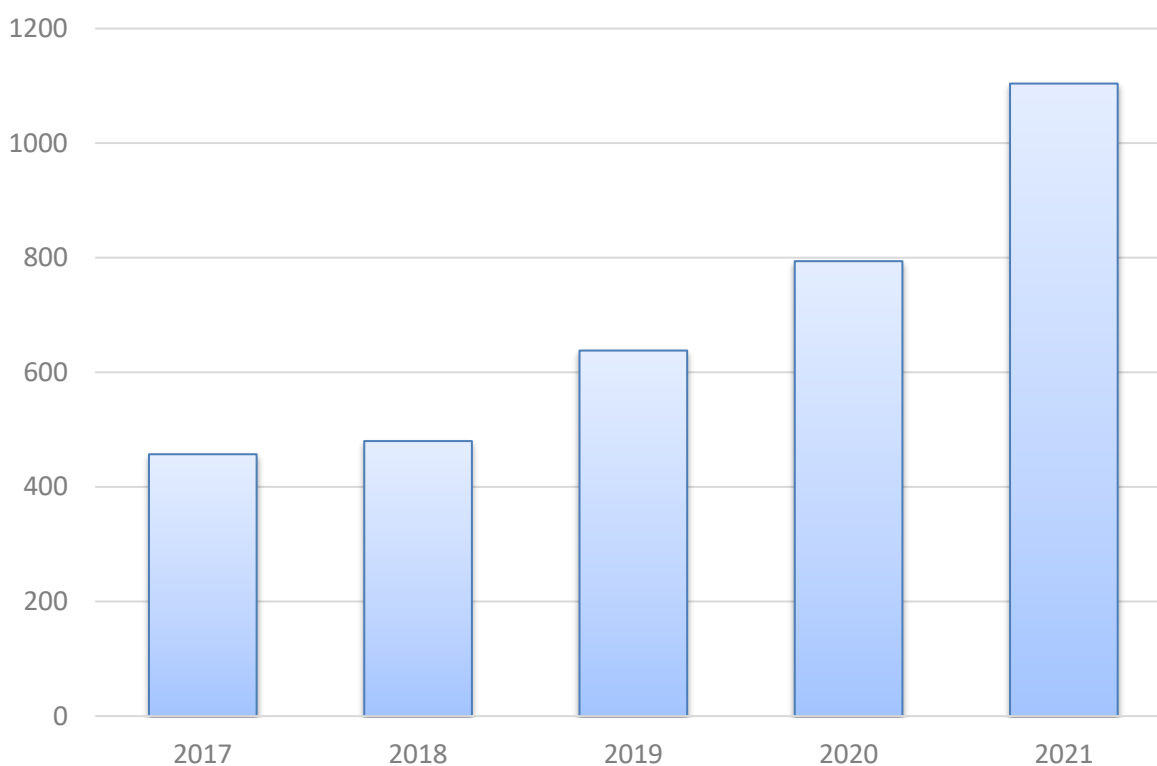


Рисунок 1. Количество пожаров вследствие грозových разрядов

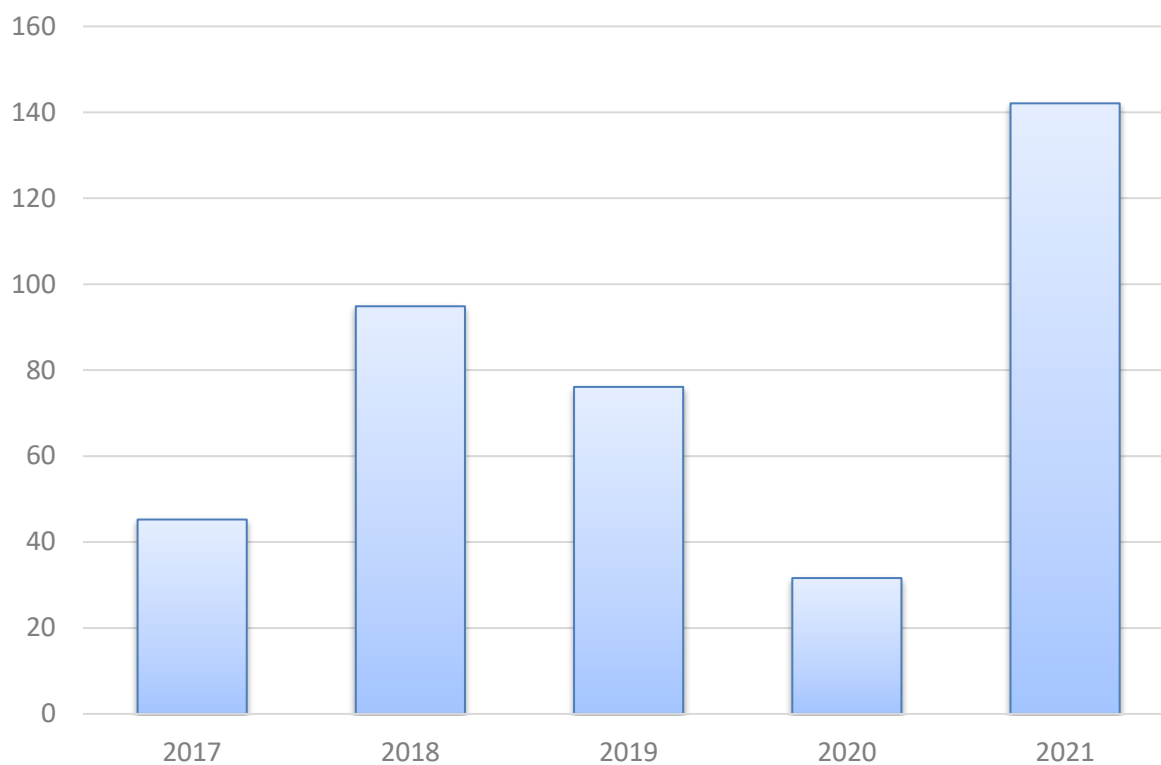


Рисунок 2. Ущерб от пожаров вследствие грозových разрядов, млн руб.

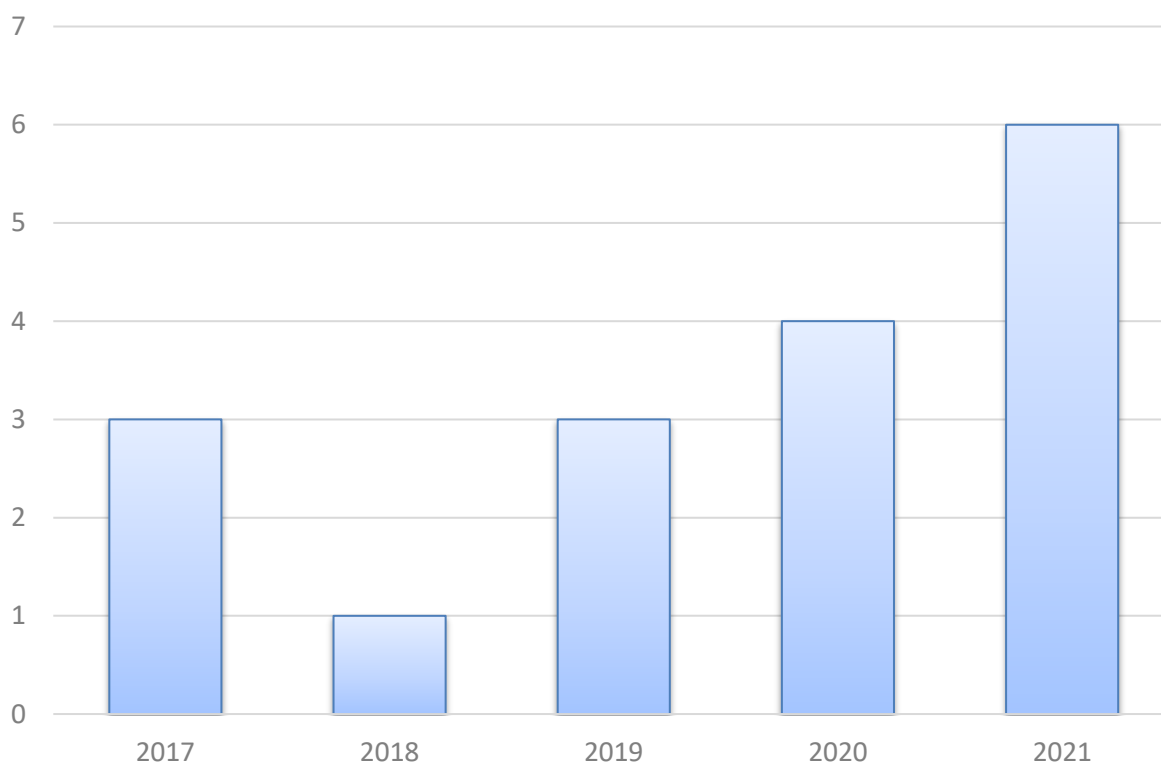


Рисунок 3. Количество погибших при пожарах, возникших вследствие грозových разрядов, чел.

В настоящее время одновременно действуют две инструкции (не считая ве-

домственных норм) по молниезащите зданий и сооружений: [5] (далее – «РД 34») и [6] (далее – «СО 153»). Причем, согласно [7], «проектные организации вправе использовать при определении исходных данных и при разработке защитных мероприятий положение любой из упомянутых инструкций или их комбинацию». Суммарно в этих инструкциях можно выделить пять основных методов для определения зон защиты молниеотводов [8–11].

Два из них – это методы, основанные на определении размеров конуса с основанием радиусом R_0 на уровне земли и высотой h_0 , и производных форм зон защиты, образуемых двойными молниеотводами (в том числе разновысокими), одиночными и двойными тросовыми молниеотводами. В РД 34 и СО 153 подходы в целом схожи, но зоны защиты различаются размерами ([5] – приложение 3 и [6] – раздел 3.3.2).

И дополнительно три метода, описанные в СО 153, заимствованные из стандарта МЭК (IEC 1024-1-1):

- метод защитного угла (для простых по форме сооружений или для маленьких частей больших сооружений);

- метод фиктивной сферы (для сооружений сложной формы);

- применение защитной сетки (метод также описан в РД 34).

Для повышения качества и эффективности проектирования защиты объектов от прямых ударов молнии в Уральском

институте ГПС МЧС России разработано программное обеспечение для автоматизации расчета зон защиты молниеотводов вышеперечисленными методами при различных уровнях надежности защиты с трехмерным отображением моделей зон защиты. Необходимость разработки этого программного обеспечения обусловлена следующими предпосылками.

Во-первых – необходимость выполнения большого количества расчетов. Как правило, при проектировании молниезащиты объектов используется не один молниеотвод очень большой высоты, а несколько молниеотводов. И для определения суммарной зоны защиты всех молниеотводов необходимо рассчитать и объединить зоны защиты всех попарно взятых двойных молниеотводов. Количество таких пар, как известно, можно оценить по формуле:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

где C_n^k – количество сочетаний из n элементов по k ; k – количество элементов в комбинации; n – общее количество элементов.

Например, в случае четырех молниеотводов необходимо выполнить расчет шести зон защиты двойных молниеотводов (рис. 4), и при увеличении числа молниеотводов количество необходимых расчетов значительно увеличивается. Так, в случае с шестью молниеотводами таких пар будет 15, а если молниеотводов 10 – необходимо рассчитать уже 45 комбинаций.

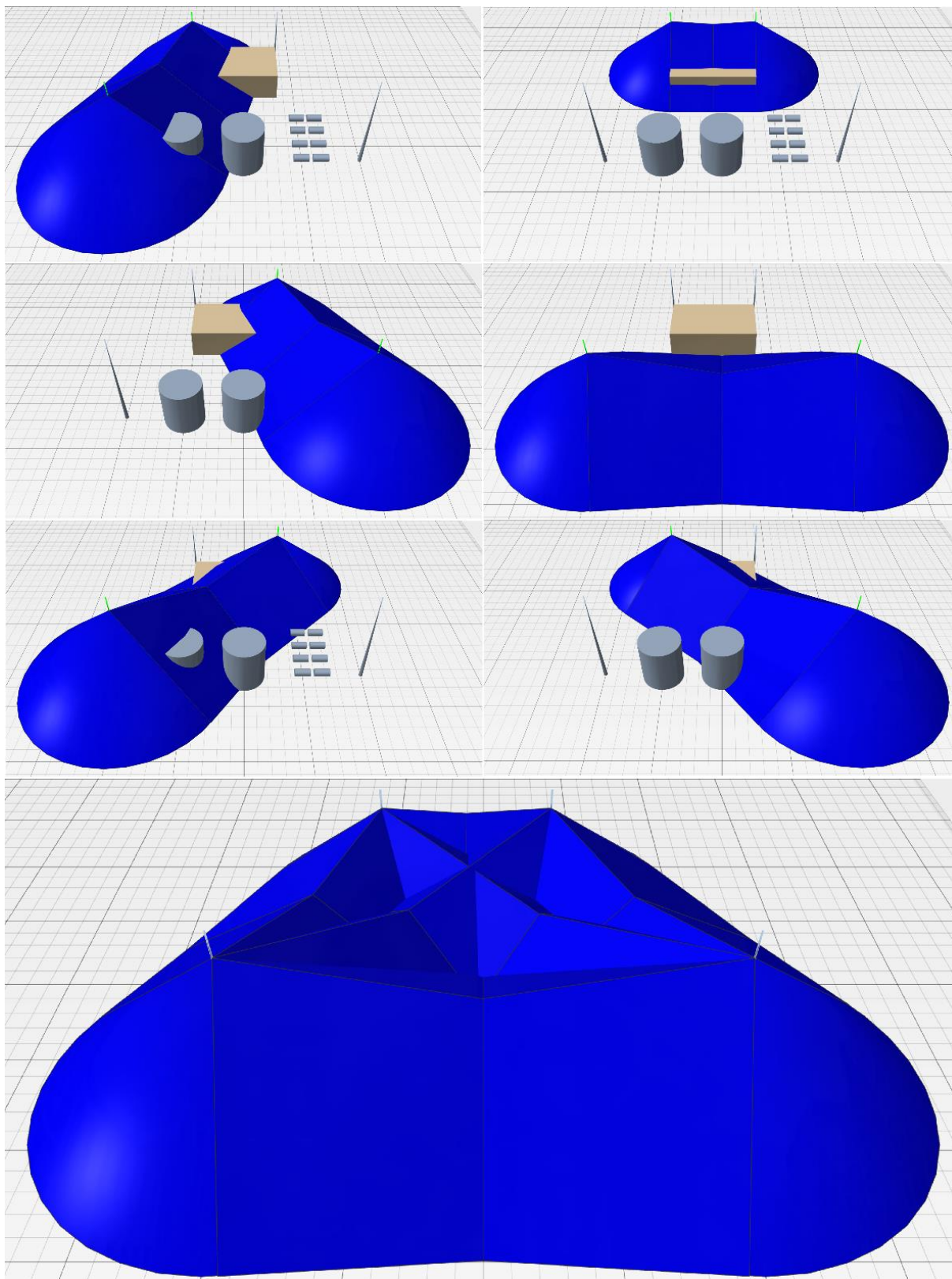


Рисунок 4. Зоны защиты двойных молниеотводов при расчете суммарной зоны защиты четырех молниеотводов

При проектировании молниезащиты простых по форме объектов, как правило, достаточно рассчитать параметры 2–

3 пар молниеотводов, чтобы определить внешние границы суммарной зоны защиты [12], но, например, на производственных объектах, где присутствуют здания неправильной формы в плане, с разновысотными частями, технологическое оборудование в форме горизонтальных и вертикальных цилиндров, наклонные протяженные объекты (технологические галереи, эстакады) и другие сооружения сложной формы, необходимо выполнить очень большое количество вычислений, чтобы убедиться, что все объекты находятся внутри зоны защиты. Кроме того, часто необходимо рассмотреть несколько различных вариантов расположения и высоты отдельных молниеотводов. Этот процесс становится весьма трудоемким, долгим, возрастает вероятность ошибок и в целом сложность проектирования. Поэтому проектировщики, так или иначе, используют в своей работе различные инструменты, позволяющие автоматизировать или упростить выполнение расчетов: номограммы с предварительно рассчитанными значениями, электронные таблицы [13] и др. При использовании же специализированного программного обеспечения расчет выполняется автоматически в течение нескольких секунд, а все внимание и работа инженера-проектировщика направлены на выбор конструкций, мест расположения и высот молниеотводов, на

поиск оптимального варианта молниезащиты, то есть на решение задач более высокого уровня, а не на машинное выполнение множества расчетов.

Во-вторых, трехмерная визуализация построенной модели зоны защиты молниеотводов возводит процесс проектирования молниезащиты на качественно иной уровень. Виртуальные модели зон защиты различных конфигураций молниеотводов уже более 15 лет применяются в образовательном процессе института [14] и неоднократно показали свою практическую ценность и эффективность, но еще более важный аспект возможности наглядного отображения результатов расчета заключается в том, что это позволяет выявить те недостатки или ошибки проектирования, которые при расчете вручную и отображении в двумерных проекциях могут остаться незамеченными проектировщиком.

В качестве примера рассмотрим расчет молниезащиты условного резервуарного парка, состоящего из трех резервуаров высотой 10,67 м, диаметром 12,33 м, расположенных на расстоянии 20 м между центрами резервуаров. Четыре стержневых молниеотвода располагаются на расстоянии 11 м по вертикали и горизонтали от центров крайних резервуаров (рис. 5).

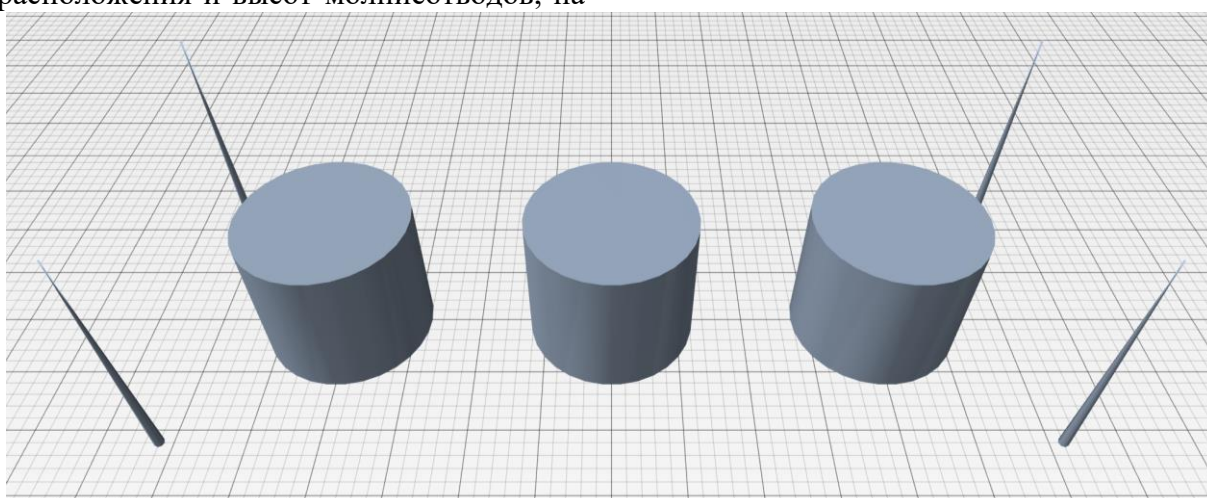


Рисунок 5. Модель резервуарного парка с молниеотводами

При «традиционном» расчете вручную с условием, что ширина зоны защиты

в центре на уровне высоты резервуаров должна быть не меньше радиуса центрального резервуара, требуемая высота молниеотводов составит 18 м, и при изображении в двумерных проекциях полученный

результат будет выглядеть весьма убедительно: визуально резервуары полностью входят в зону защиты, даже при отображении в изометрии (рис. 6).

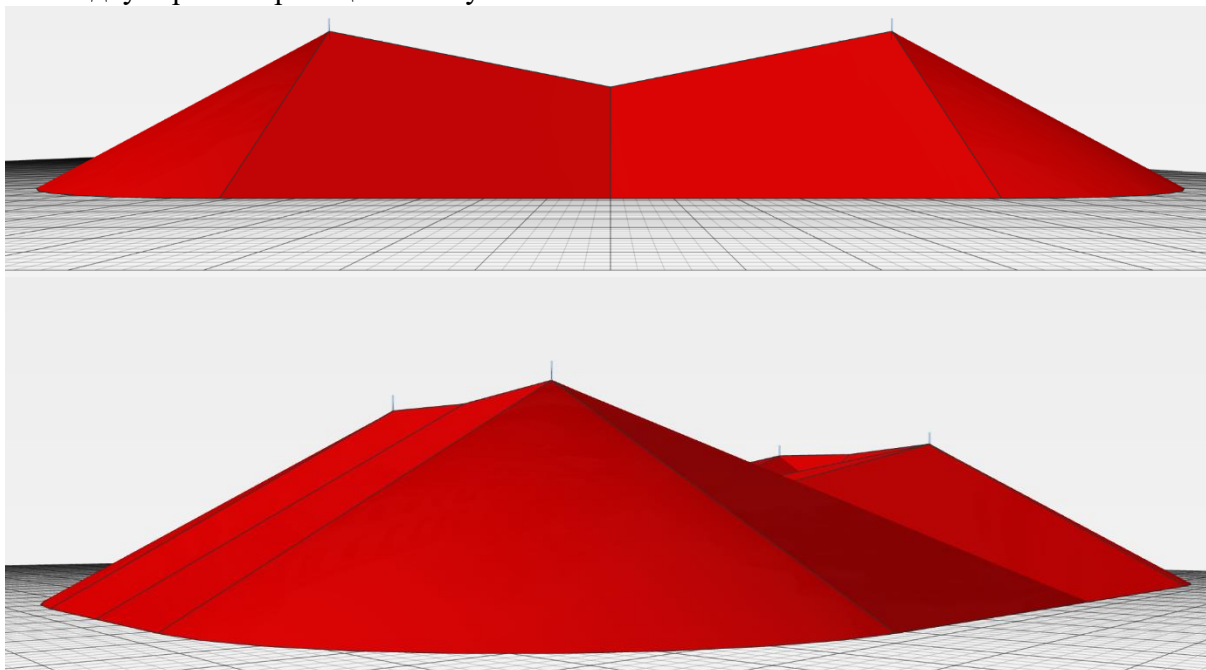


Рисунок 6. Зона защиты молниеотводов высотой 18 м

Однако при более детальном рассмотрении трехмерной модели становится видно, что центральный резервуар на самом деле не полностью входит в зону защиты (рис. 7), так как он находится между

диагонально расположенными молниеотводами, расстояние между которыми больше, чем между ортогонально расположенными, и высота зоны защиты в этом месте меньше.

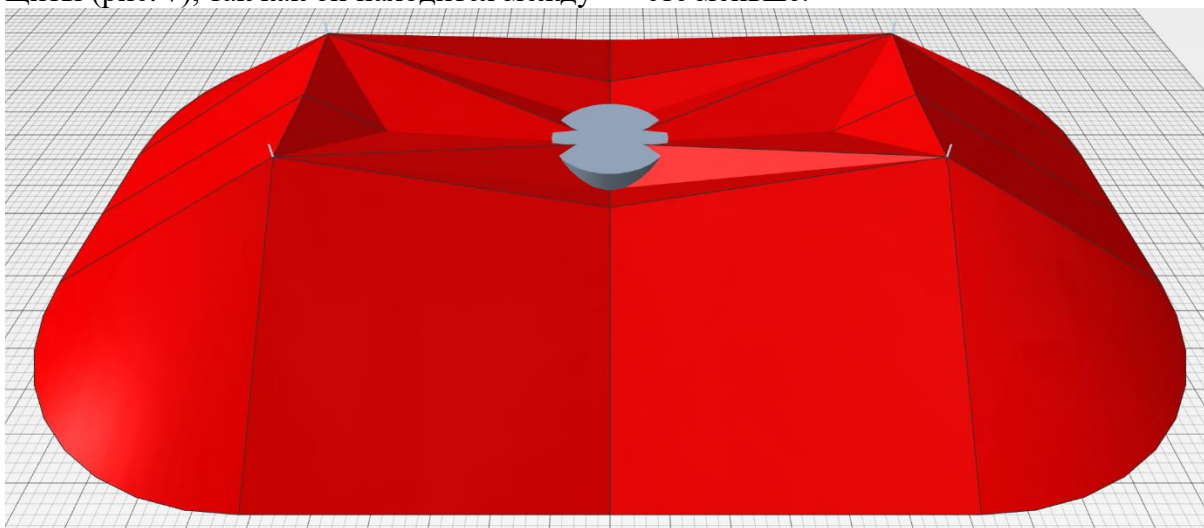


Рисунок 7. Незащищенный центральный резервуар

Конечно, это очень простой пример и, возможно, редко осуществимый на прак-

тике, но при проектировании молниезащиты сложных объектов вероятность та-

ких просчетов возрастает многократно, поэтому можно сказать, что 3D-моделирование в данном аспекте не просто визуально более наглядно, но и принципиально более функционально по сравнению с двумерными чертежами, так как позволяет выявлять подобные ошибки.

Третья задача, которая решается с помощью разработанного программного обеспечения – возможность построения зон защиты, полученных методом фиктивной сферы. Этот метод несоизмеримо более сложен в реализации по сравнению с другими, вручную выполнить все необходимые расчеты для построения зоны защиты нескольких молниеотводов практически невозможно. Способы нахождения координат центра фиктивной сферы в частных случаях (сфера касается вершин трех молниеотводов, касается двух вершин и Стержневой

опирается на третий, касается одной вершины и опирается на два других молниеотвода, касается земли и вершины молниеотвода, касается двух тросов и др.) – известны и понятны [15], но решаются в большинстве случаев только численно и требуют большого количества вычислений. Кроме того, зона защиты имеет неправильную форму, получаемую в результате булевых операций с множеством объектов в пространстве, поэтому результирующую зону защиты весьма сложно изобразить на чертежах вручную. Разработанная программа решает обе эти задачи.

По методикам РД 34 (2 уровня надежности защиты) и СО 153 (3 уровня надежности защиты) программа выполняет расчет зон защиты молниеотводов во всех комбинациях, представленных в этих инструкциях (рис. 8).

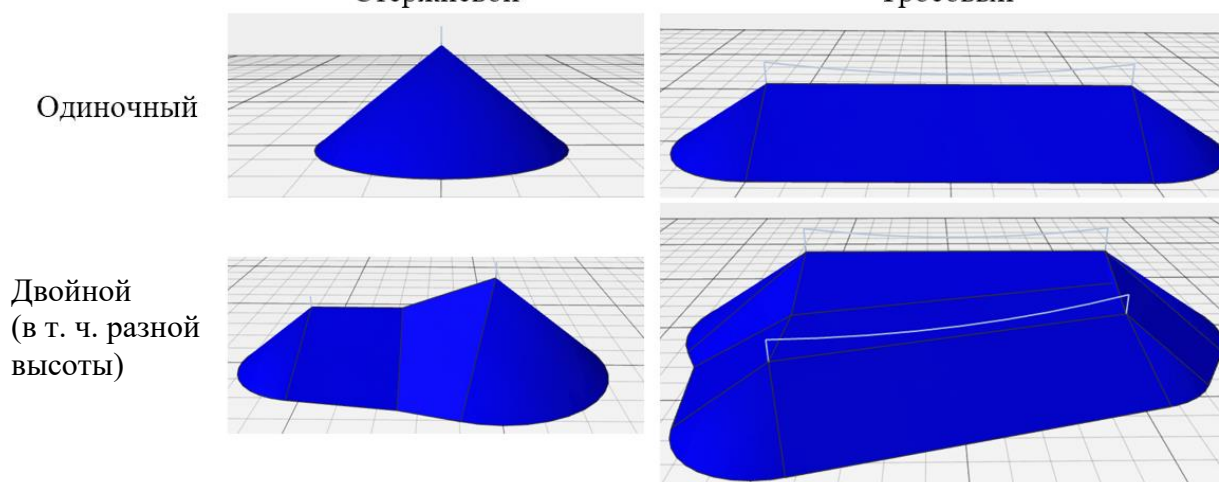


Рисунок 8. Зоны защиты различных комбинаций молниеотводов по РД 34 и СО 153

Метод фиктивной сферы более универсален и позволяет определять зону защиты произвольной совокупности молние-

отводов, в том числе с учетом зданий, защищенных сетчатыми молниеотводами (табл. 1).

Таблица 1
Возможные комбинации молниеотводов при расчете зоны защиты
методом фиктивной сферы

	Стержневой	Тросовый	Сетчатый	Пример
Один молниеотвод	1			рисунок 9
		1		рисунок 10
			1	рисунок 11
Два молниеотвода (в т. ч. разной вы- соты)	2			рисунок 12
		2		рисунок 13
			2	рисунок 14
	1	1		рисунок 15
		1	1	рисунок 16
1		1	рисунок 17	
Три и более молниеотводов	Произвольная комбинация молниеотводов			рисунок 18

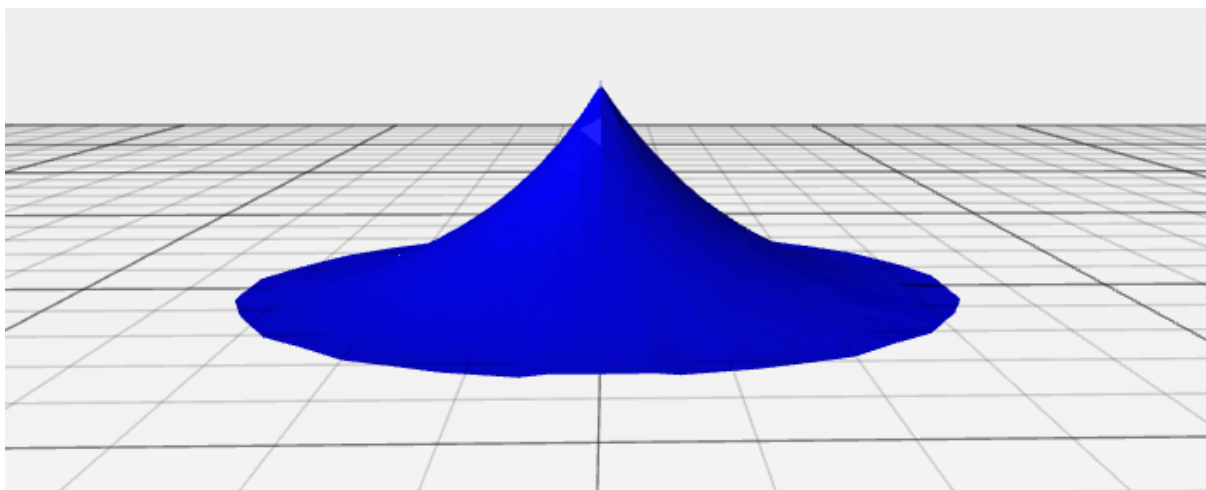


Рисунок 9. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

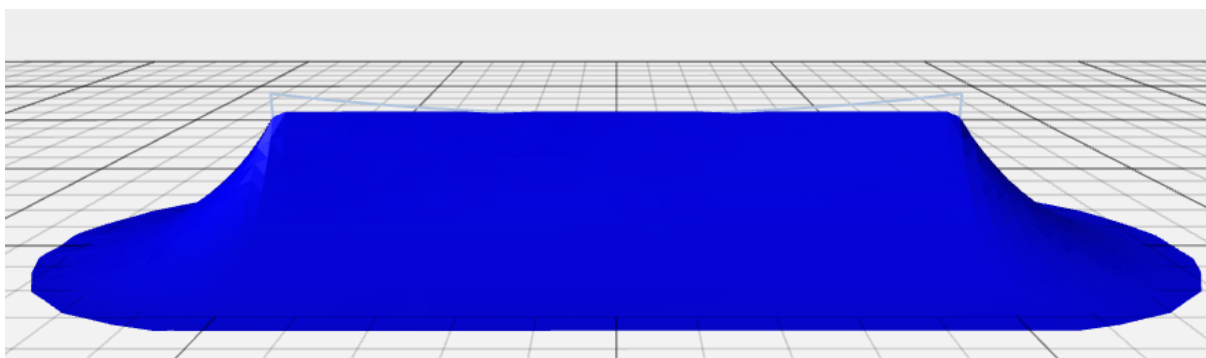


Рисунок 10. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

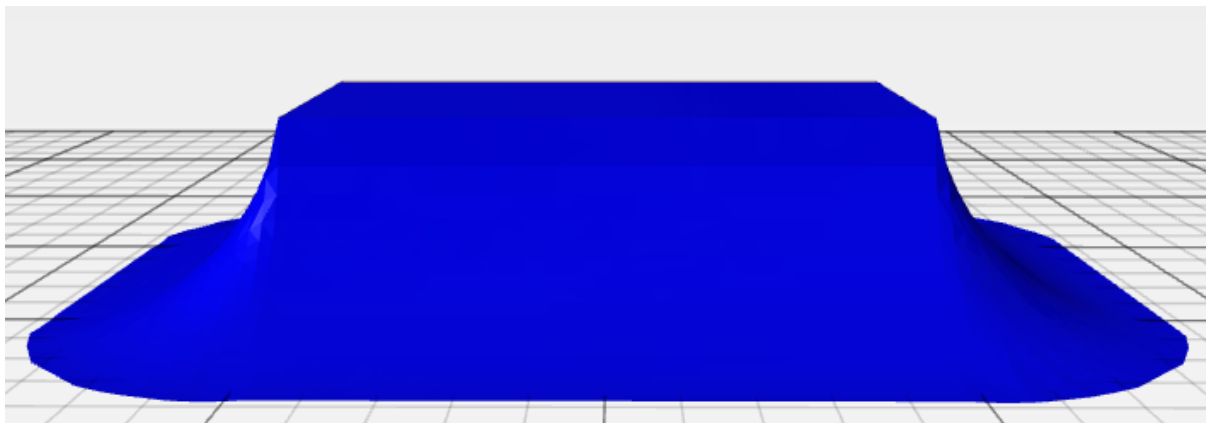


Рисунок 11. Зона защиты сетчатого молниеотвода

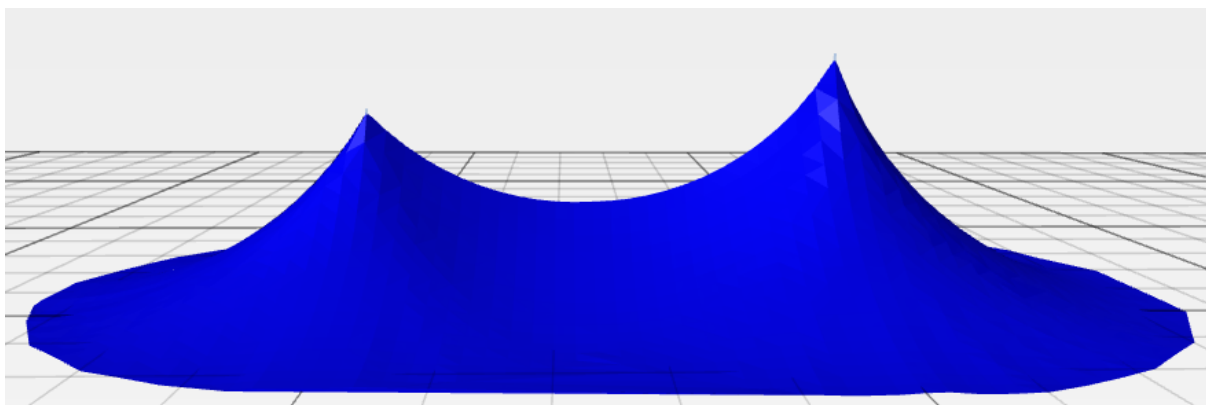


Рисунок 12. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

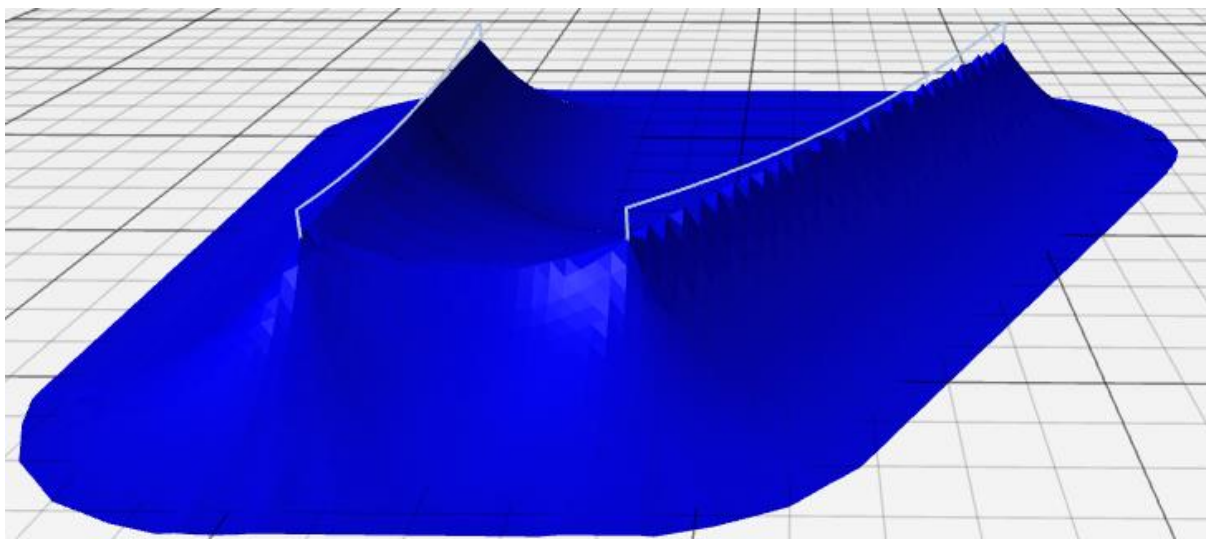


Рисунок 13. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

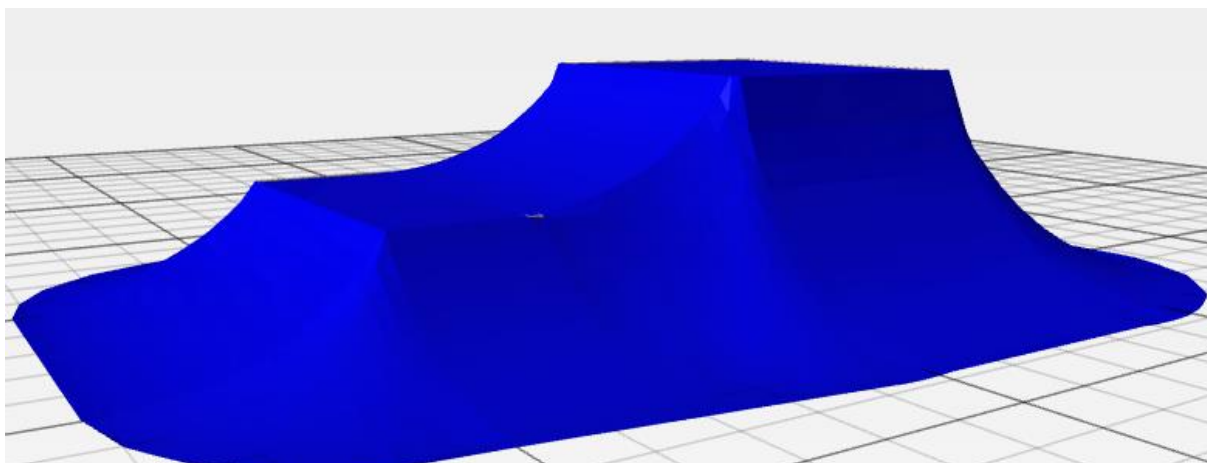


Рисунок 14. Зона защиты двух сетчатых молниеотводов



Рисунок 15. Зона защиты стержневого и тросового молниеотводов

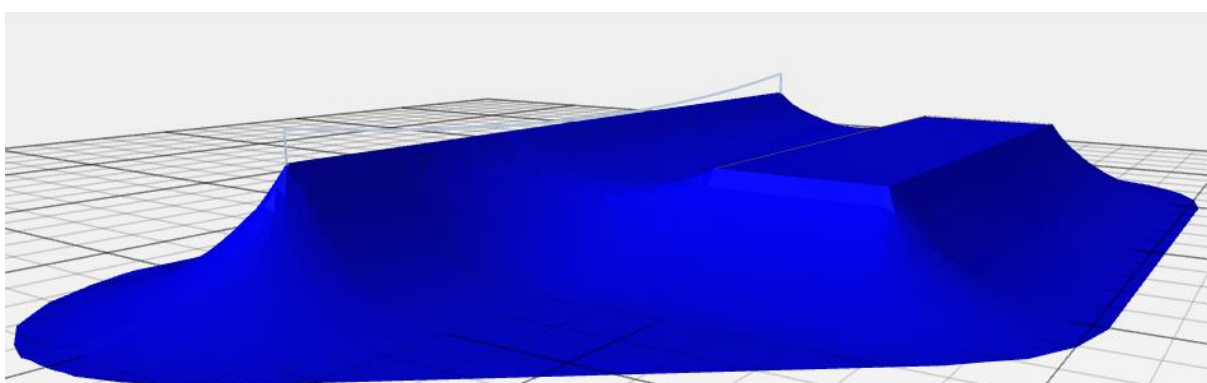


Рисунок 16. Зона защиты тросового и сетчатого молниеотводов

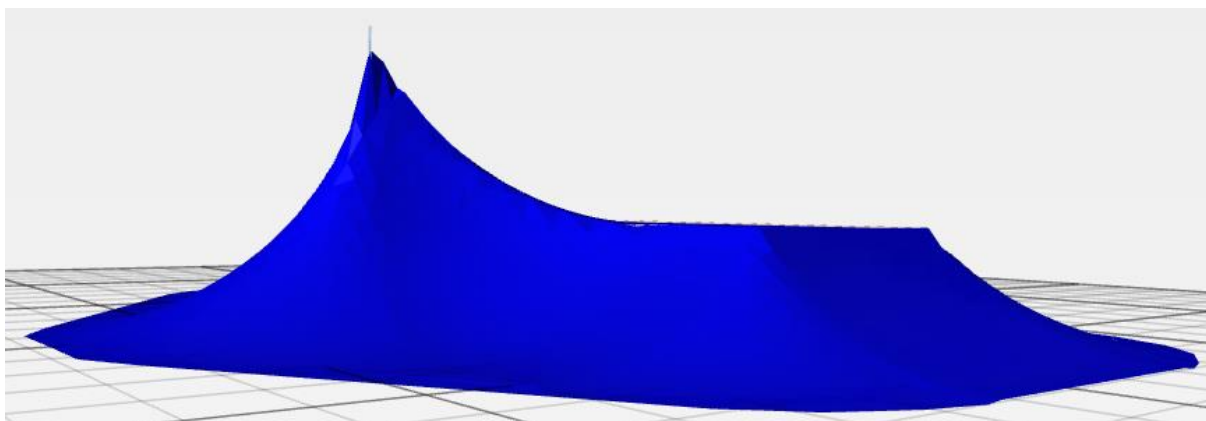


Рисунок 17. Зона защиты стержневого и сетчатого молниеотводов

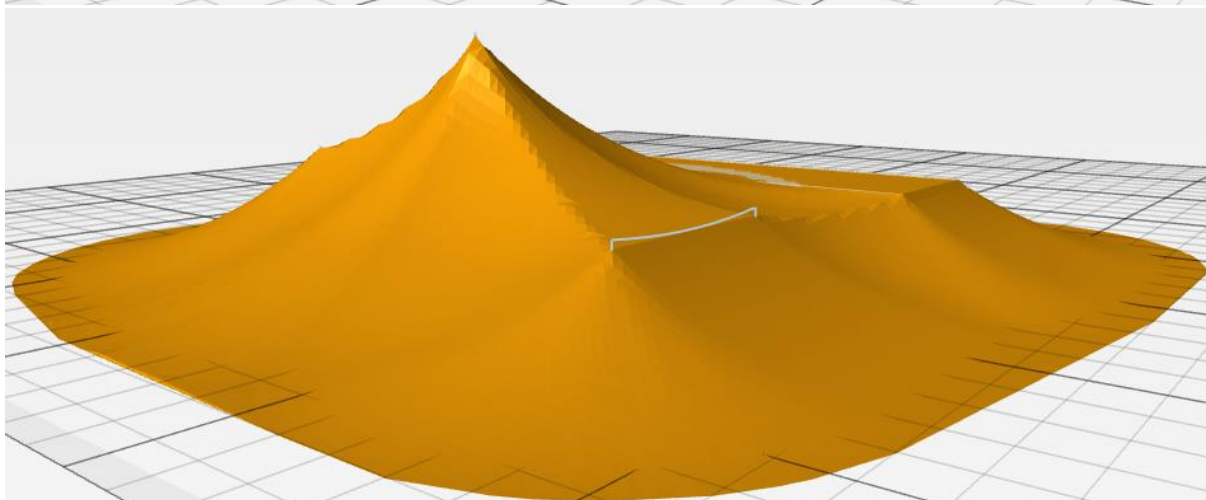
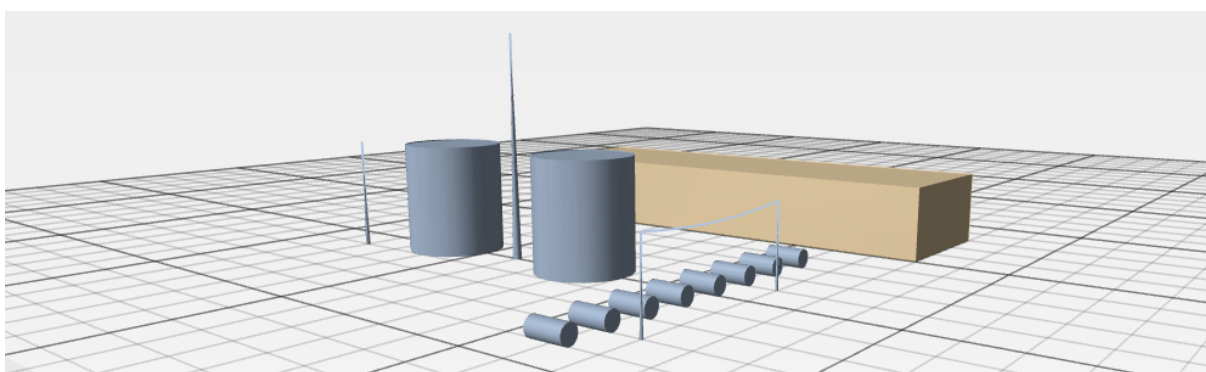


Рисунок 18. Пример зоны защиты комбинации различных типов молниеотводов

Автоматизация расчета зон защиты молниеотводов при таком широком спектре возможных комбинаций различных типов конструкций молниеотводов стала возможной благодаря разработанному оригинальному алгоритму, суть которого сводится к следующему.

1. Поочередно перебираются все молниеотводы модели (включая здания, защищенные сеткой), и находятся координаты

всех точек, удовлетворяющих условию, чтобы сфера с центром в этой точке касалась рассматриваемого молниеотвода и земли и не касалась других молниеотводов. Таким образом определяются зоны защиты одиночных молниеотводов и внешние части комбинированных (рис. 19).

2. Перебираются все попарно взятые молниеотводы модели, и находятся координаты всех точек, удовлетворяющих условию, чтобы сфера с центром в этой

точке касалась этих двух молниеотводов и не касалась других молниеотводов (рис. 20). Таким образом определяются общие части зоны защиты двойных молниеотводов и одновременно (в момент, когда сфера касается любого другого молниеотвода) – определяются координаты центра сферы, опирающейся на три точки (соприкасающейся с тремя молниеотводами).

3. Перебирается весь массив полученных координат центра сферы, определяются все точки модели с максимальной возможной координатой Z при условии, что эта точка не попадает в объем какой-либо сферы. Совокупность полученных точек составляет искомую поверхность зоны защиты всех молниеотводов (рис. 21).

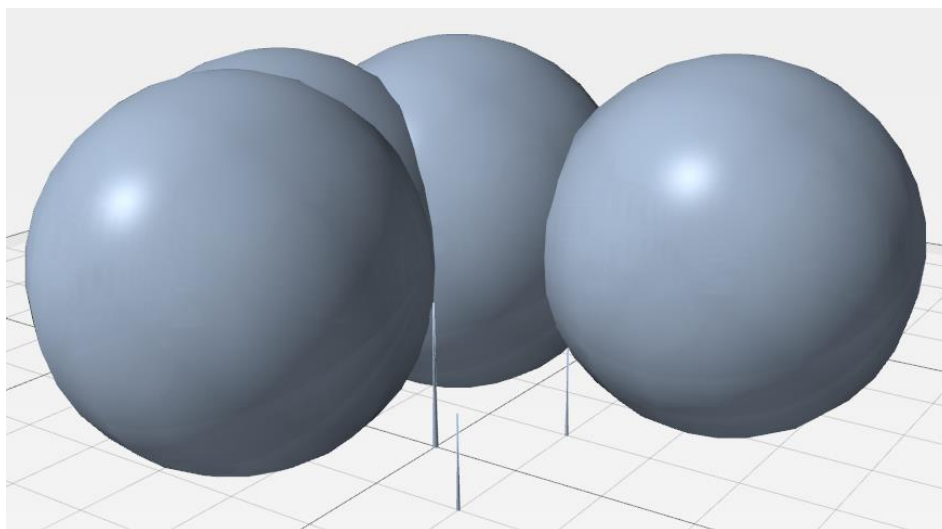


Рисунок 19. Первый этап алгоритма

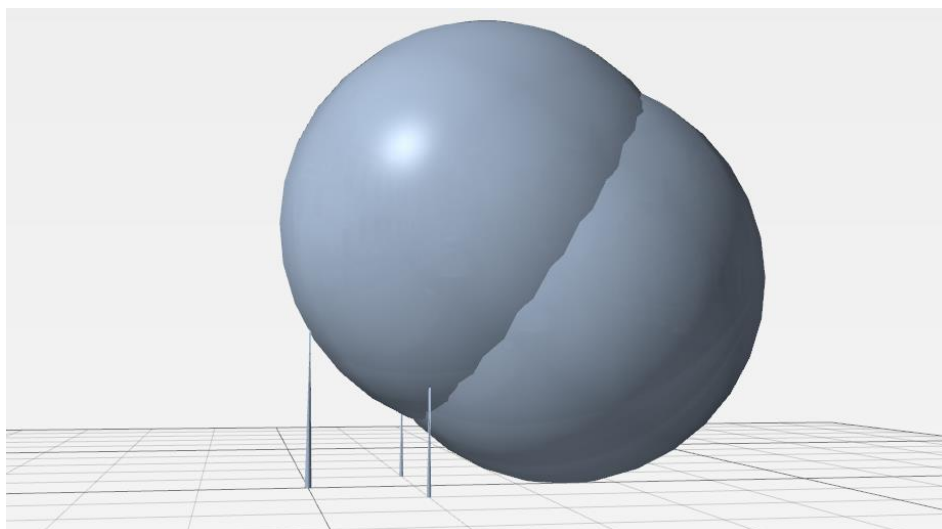


Рисунок 20. Второй этап алгоритма

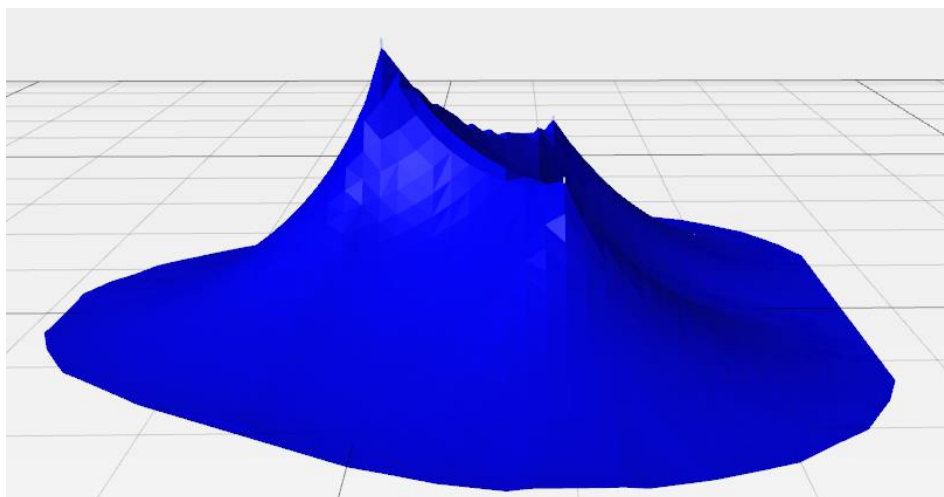


Рисунок 21. Третий этап алгоритма

При этом под условием «сфера касается молниеотвода» понимается условие, когда расстояние от центра сферы до молниеотвода равно радиусу сферы. В зависимости от относительного расположения молниеотвода и сферы это расстояние определяется по-разному. Это может быть

расстояние (рис. 22–24):

- до вершины молниеотвода;
- до отрезка – стержня или троса молниеотвода или ребра здания;
- до поверхности – крыши или стены здания, защищенного сетчатым молниеотводом.

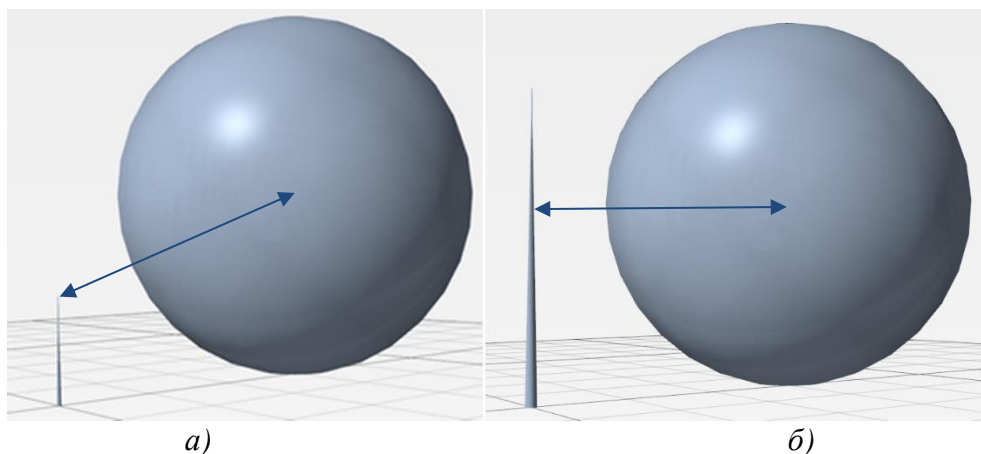


Рисунок 22. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до стержневого молниеотвода: а) до вершины молниеотвода; б) до стержня

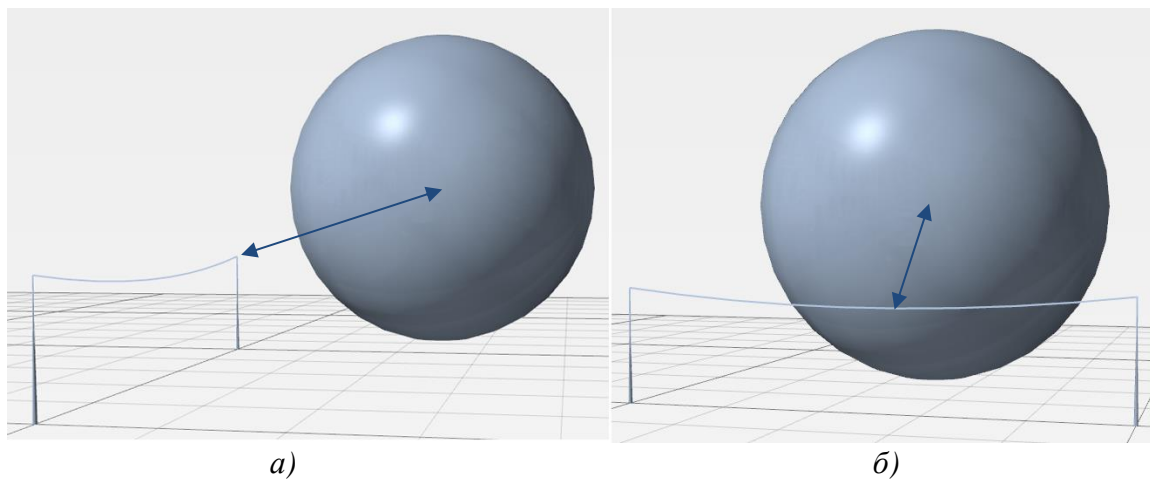


Рисунок 23. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до тросового молниеотвода: а) до вершины; б) до троса

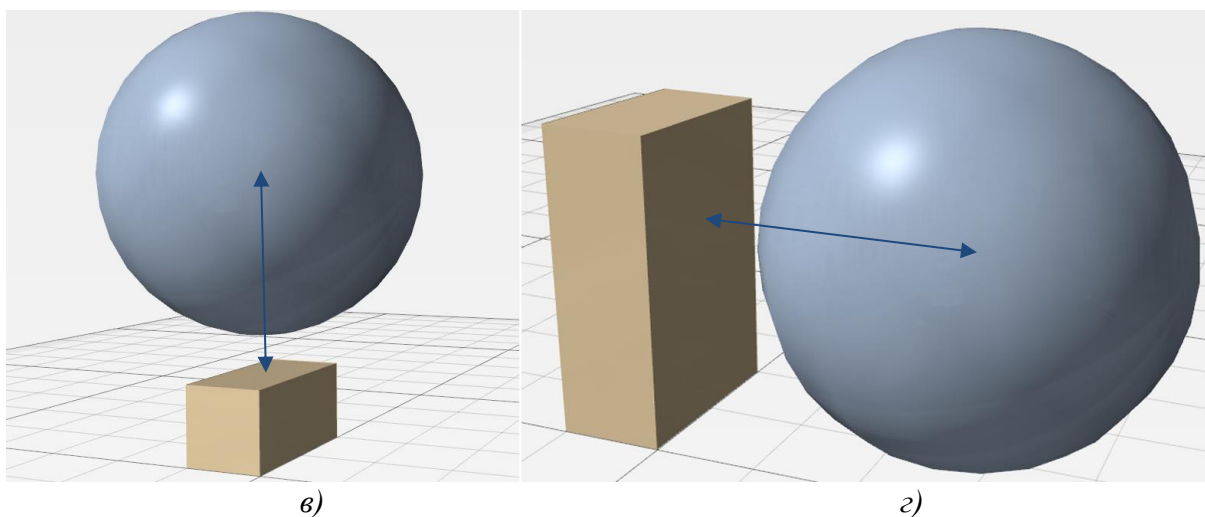
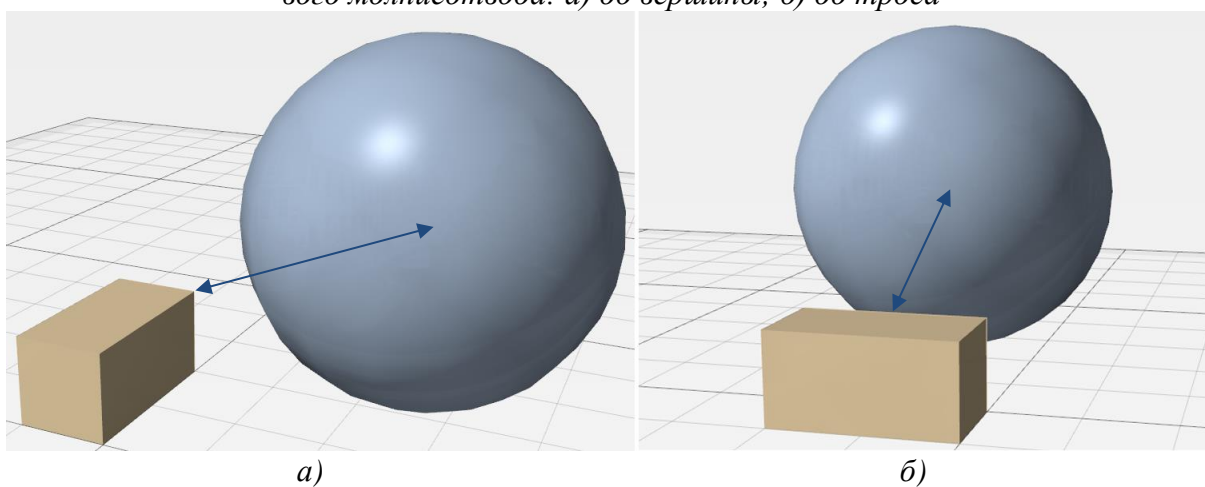


Рисунок 24. Варианты определения расстояния от центра фиктивной сферы до здания: а) до вершины; б) до ребра здания; в) до поверхности крыши; г) до поверхности стены

В настоящее время программа применяется в Уральском институте ГПС МЧС России в учебных целях: при изучении дисциплины «Пожарная безопасность

электроустановок», выполнении расчетно-графических и выпускных квалификационных работ. После апробации в образовательном процессе возможно применение в

проектной деятельности, работе надзорных органов и экспертных организаций.

Литература

1. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с.
2. В Арктике количество гроз увеличивается с угрожающей скоростью // Сетевое издание «Новая Наука». URL: <https://new-science.ru/v-arktike-kolichestvo-groz-uvlichivaetsya-s-ugrozhajushhej-skorostju> (дата обращения: 07.10.2022).
3. Holzworth R. H. et al. Lightning in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020GL091366> (дата обращения: 07.10.2022).
4. Марков А. Г. и др. Молниезащита и защита от статического электричества в методике определения величин пожарного риска на производственных объектах // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны, Иваново. 2022. С. 229–234.
5. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений.
6. СО 153-34.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 280.
7. Письмо управления по надзору в электроэнергетике федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01.12.2004 № 10-03-04/182.
8. Воронин С. В. Сравнительный анализ требований нормативных документов РД 34.21.122-87 и СО 153-34.21.122-2003 по молниезащите зданий и сооружений // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2018. № 3 (27). С. 22–26.
9. Ходак А. В. и др. Общая оценка методов построения зон защиты стержневых молниеприемников // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1. № 26. С. 199–205.
10. Ходак А. В. и др. Сравнительный анализ зон защиты одиночных стержневых молниеприемников // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1. № 26. С. 206–212.
11. Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 6. С. 89–91.
12. Рец В. В., Никифоров А. И., Ярош А. С. Проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие»: Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». 2021. С. 45–49.
13. Котелевская Е. А. и др. Проектирование молниезащитных устройств для животноводческих помещений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 178. С. 108–118.
14. Субачев С. В. Применение виртуальных компьютерных моделей в практике преподавания специальных дисциплин // Применение современных форм и методов обучения в образовательном процессе Уральского института ГПС МЧС России: обзор передового педагогического опыта. 2006. С. 32–36.
15. Зубов К. Н. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2011. 16 с.

References

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: stat. sb. Balashiha, 2022. 114 s.
2. V Arktike kolichestvo groz uvlichivaetsya s ugrozhayushchej skorost'yu // Setevoe izdanie «Novaya Nauka». URL: <https://new-science.ru/v-arktike-kolichestvo-groz-uvlichivaetsya-s-ugrozhajushhej-skorostju> (data obrashcheniya: 07.10.2022).
3. Holzworth R. H. et al. Lightning in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020GL091366> (data obrashcheniya: 07.10.2022).
4. Markov A. G. i dr. Molniezashchita i zashchita ot staticheskogo elektrichestva v metodike opredeleniya velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob"ektov : Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony, Ivanovo. 2022. S. 229–234.
5. RD 34.21.122–87. Instrukciya po ustrojstvu molniezashchity zdaniy i sooruzhenij.
6. SO 153-34.21.122–2003. Instrukciya po ustrojstvu molniezashchity zdaniy, sooruzhenij i promyshlennyh kommunikacij: utv. prikazom Minenergo Rossii ot 30.06.2003 № 280.
7. Pis'mo upravleniya po nadzoru v elektroenergetike federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 01.12.2004 № 10-03-04/182.
8. Voronin S. V. Sravnitel'nyj analiz trebovanij normativnyh dokumentov RD 34.21.122-87 i SO 153-

34.21.122-2003 po molniezashchite zdaniy i sooruzhenij // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2018. № 3 (27). S. 22–26.

9. Hodak A. V. i dr. Obschaya ocenka metodov postroeniya zon zashchity sterzhnevyyh molniepriemnikov // Moya professional'naya kar'era. 2021. T. 1. № 26. S. 199–205.

10. Hodak A. V. i dr. Sravnitel'nyj analiz zon zashchity odinochnyyh sterzhnevyyh molniepriemnikov // Moya professional'naya kar'era. 2021. T. 1. № 26. S. 206–212.

11. Harlamenkov A. S. Sovremennaya molniezashchita zdaniy i sooruzhenij. CHast' 1 // Pozharovzryvobezopasnost'. 2019. T. 28. № 6. S. 89–91.

12. Rec V. V., Nikiforov A. I., YArsh A. S. Proektirovanie molniezashchity ob"ektov elektroenergetiki // Materialy konferencij GNII «Nacrazvitiye»: Sbornik izbrannykh statej po materialam nauchnykh konferencij GNII «Nacrazvitiye». 2021. S. 45–49.

13. Kotelevskaya E. A. i dr. Proektirovanie molniezashchitnykh ustrojstv dlya zhivotnovodcheskikh pomeshchenij // Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 178. S. 108–118.

14. Subachev S. V. Primenenie virtual'nykh komp'yuternykh modelej v praktike prepodavaniya special'nykh disciplin // Primenenie sovremennykh form i metodov obucheniya v obrazovatel'nom processe Ural'skogo instituta GPS MCHS Rossii: obzor peredovogo pedagogicheskogo opyta. 2006. S. 32–36.

15. Zubov K. N. Sovershenstvovanie raschetnykh metodov molniezashchity i zazemlyayushchih ustrojstv v neodnorodnykh gruntah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Lipeck, 2011. 16 s.