

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2020 г. Л.Ю. Могильнер<sup>1,\*</sup>, Н.Н. Скуридин<sup>1</sup>, Н.А. Власов<sup>1</sup>, И.А. Хузяганиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта»  
(ООО «НИИ Транснефть»), Россия 117186 Москва, пр-т Севастопольский, 47А  
\*E-mail: MogilnerLY@niitnn.transneft.ru

Поступила в редакцию 04.09.2020; после доработки 18.09.2020  
Принята к публикации 18.09.2020

Рассмотрены вопросы неразрушающего контроля качества, выполняемого при обследовании состояния систем молниезащиты пожаровзрывоопасных объектов, в том числе — площадочных объектов магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов. Указано на необходимость выполнения трех видов работ: количественной оценки наличия элементов системы молниезащиты, визуального и измерительного контроля элементов системы с применением геометрических и геодезических измерений, измерений электрических параметров элементов системы молниезащиты. Описаны особенности контроля и измерений, связанных с расчетом зон защиты от прямого удара молнии при использовании молниеприемников различного типа или их комбинаций. Приведены примеры оценки погрешности расчета зон защиты от прямого удара молнии.

*Ключевые слова:* электрический вид контроля, молниезащита, визуальный и измерительный контроль, резервуар, защита расстоянием, надежность защиты.

DOI: 10.31857/S0130308220110068

### ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении вопроса о неразрушающем контроле качества объектов магистральных трубопроводов в большинстве случаев внимание уделяется линейной части и собственно трубопроводу [1—3]. Значительно меньше рассматриваются не менее актуальные вопросы контроля состояния площадочных объектов. Концентрация на ограниченной площади резервуарных парков нефтеперекачивающих станций значительных объемов нефти и нефтепродуктов влечет за собой повышенные риски возникновения крупных пожаров и взрывов с тяжелыми последствиями, которые могут привести к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды, значительным материальным и экономическим потерям. Например, согласно опубликованным статистическим данным, причиной подавляющего большинства пожаров на действующих резервуарах нефти и нефтепродуктов являются молниевые разряды — до 75 % зафиксированных случаев [4—7]. Поэтому вопросу об обеспечении работоспособности систем молниезащиты резервуарных парков необходимо уделять серьезное внимание, в том числе — развивать методы и средства неразрушающего контроля качества и диагностирования элементов этих систем.

### СТРУКТУРА И СОСТАВ РАБОТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

При выполнении работ по обследованию состояния системы молниезащиты пожаро- и взрывоопасных объектов магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов необходимо выявление несоответствия параметров системы предъявляемым требованиям по защите каждой единицы оборудования, каждого здания и сооружения на защищаемом объекте от прямого и косвенного воздействия молниевых разрядов.

Основным элементом системы молниезащиты можно считать молниеприемники, непосредственно принимающие на себя электрические разряды от молний. Далее, наводимые молнией токи через заземляющие проводники передаются в заземлители, заглубленные в грунт и непосредственно с ним контактирующие. Также в систему входят устройства для уравнивания потенциалов металлоконструкций [8—10]. Таким образом, общую структуру работ по неразрушающему контролю качества, выполняемых при обследовании состояния элементов системы молниезащиты, можно представить согласно схеме, приведенной на рис. 1 [11, 12]. Она включает в себя 3 группы видов измерений: определение количественного состава элементов системы, визуальный и измерительный контроль отдельных элементов системы с применением геометрических и геодезиче-

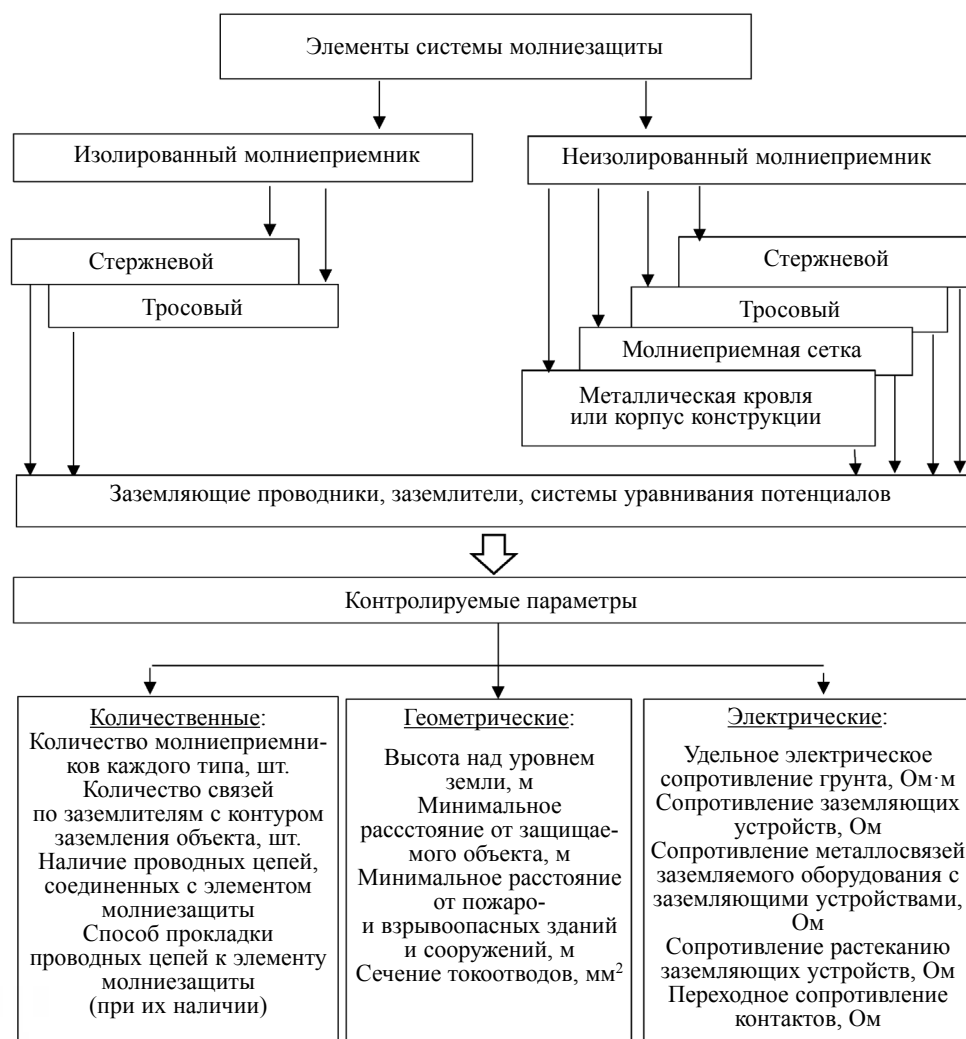


Рис. 1. Состав работ по контролю качества элементов системы молниезащиты.

ских измерений, контроль электрических параметров: сопротивлений грунта и контактных соединений металлических деталей, металlosвязи оборудования с заземлителями и т.д.

*Примечание.* В систему молниезащиты также могут входить экранирующие устройства, предотвращающие вредное воздействие электромагнитных полей, наведенных молниевым разрядом, на электронные устройства и оборудование. Соответственно, при контроле могут потребоваться измерения параметров наведенных электромагнитных полей. Однако в настоящей статье этот вопрос не рассматривается.

### ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЯ ЗОН ЗАЩИТЫ

Электрические измерения обычно не вызывают больших проблем, поскольку в той или иной мере сводятся к измерению сопротивлений, токов и разностей потенциалов с применением стандартных или специализированных тестеров и мультиметров. Вопросы здесь обычно могут возникнуть только в связи с необходимостью обеспечить выполнение вручную больших объемов измерений в ограниченные сроки, выделенные на обследования. Например, на одном резервуарном парке может потребоваться несколько сотен измерений переходного сопротивления шунтирующих перемычек между контактирующими металлическими конструкциями (фланцы, трубы и т.д.). Следовательно, оборудование должно позволять быстро и достоверно выполнять измерения и хранить в памяти получаемые результаты. Также, очевидно, не представляет проблем измерение количества и расположения используемых элементов. Так, для определения глубины залегания

заземлителей в грунте используются трассопоисковые приборы и искатели повреждения изоляции, позволяющие определять координаты скрытых электрических проводников, находящихся в грунте на глубине до 0,5 м, с достаточной для практики погрешностью, не превышающей  $\pm 5$  см. Более сложным оказывается вопрос о проведении визуального и измерительного контроля молниеприемников. Рассмотрим его подробнее.

Согласно современным требованиям, защиту резервуарных парков при эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов необходимо обеспечивать с надежностью 0,999. В ряде работ показано, что это условие не может быть выполнено, если в качестве молниеприемника используется кровля конструкции или корпус резервуара [13, 14] (см. рис.1). В данном случае также технически не обосновано применение молниеприемных сеток, т.к. используются стальные резервуары больших габаритов: высота стенки до 18 м, диаметр до 60 м. Поэтому в качестве молниеотводов должны применяться изолированные от защищаемого резервуара стержневые и/или тросовые молниеприемники, устанавливаемые на башни различной конструкции высотой 40—60 м (более высокие используются редко). При этом основной способ защиты резервуара от удара молнии — защита расстоянием: для того, чтобы не возникало перекрытие молниевых разрядов с молниеотводов на резервуары, необходимо выполнить два условия:

расстояние между опорами башни молниеотвода и защищаемым резервуаром должно быть достаточно большим;

острые или трос молниеприемника должны быть расположены достаточно высоко над резервуаром.

«Безопасное» расстояние между опорой и резервуаром определяется согласно соотношению [15]:

$$S_B = \frac{I_M \cdot r_{II} + L_0 \cdot h \cdot \left( \frac{di_M}{d\tau} \right)_{\max}}{E_B}, \quad (1)$$

где  $I_M$  — значение тока молнии, принимаемое равным 200 кА;  $r_{II}$  — сопротивление заземления молниеприемника, Ом;  $L_0$  — индуктивность участка токоотвода от заземлителя до рассматриваемой точки, которая для металлических молниеотводов составляет в среднем 1,7 мкГн/м;  $h$  — высота защищаемого здания/сооружения, на которое может произойти пробой по воздуху, м;  $\left( \frac{di_M}{d\tau} \right)_{\max}$  — скорость нарастания тока на фронте молнии, принимаемая равной 60 кА/мкс;  $E_B$  — средняя напряженность электрического поля в воздухе, принимаемая равной 500 кВ/м.

Величина  $r_{II}$  сопротивления заземления молниеприемника измеряется при проведении работ по контролю качества системы молниезащиты. Ее нормативное значение определяется согласно [16]. Значения прочих величин в (1) устанавливаются в соответствии с рекомендациями, приведенными в [17]. С учетом исключения возможности электрического пробоя через грунт, из (1) получим следующие значения допустимых «безопасных» расстояний:

6,0 м при значении удельного сопротивления грунта до 100 Ом·м;

8,0 м при значении удельного сопротивления грунта от 100 до 500 Ом·м;

10,0 м при значении удельного сопротивления грунта от 500 до 1000 Ом·м.

Таким образом, для выполнения контроля качества установки башни молниеотвода выполняются измерения сопротивления заземления молниеприемника  $r_{II}$ , удельного электрического сопротивления грунта и расстояния от опор башни молниеотвода до корпуса защищаемого резервуара  $S_B$ . В данном случае не возникает вопрос о точности измерений, поскольку измерение электрических параметров проводится с погрешностью не более 5 %, измерение расстояния — с погрешностью не более 1 %, а значение тока молнии выбрано с необходимым запасом.

Несколько сложнее обстоит вопрос о точности измерений при расчете зоны защиты молниеприемника в зависимости от его высоты.

В российских нормах приведены удобные для инженерных расчетов выражения, определяющие для выбранного уровня надежности границы зон защиты молниеотводов в зависимости от их типа, высоты и расстояния между ними. Например, для одиночного стержневого молниеотвода граница зоны защиты представляют собой конус с вершиной, расположенной на высоте  $h_0$ , которая, с учетом необходимых запасов по надежности, принимается равной 0,8 от высоты  $H$  острия молниеприемника. При этом предполагается, что величина  $H$  находится в диапазоне 30—60 м над уровнем земли.

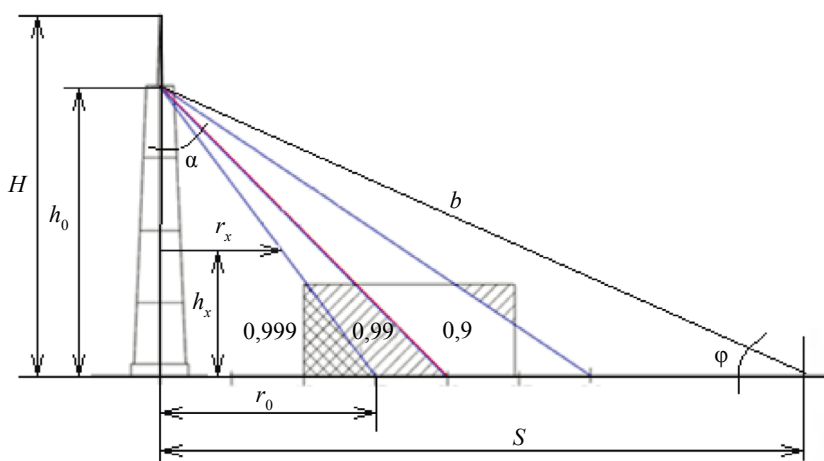


Рис. 2. К расчету зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода.

В этом случае радиус защищенной зоны  $r_x$  на высоте  $h_x$  в обозначениях рис. 2 определяется по формуле:

$$r_x = (h_0 - h_x) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Введенный здесь угол  $\alpha$  при вершине конуса определяется в соответствии с выбранной степенью защиты, а для резервуаров при надежности защиты 0,999 принимается равным  $25^\circ$  [14]. Для других объектов (зданий, оборудования) можно принимать эту надежность равной 0,99 или 0,9, чему соответствуют углы  $\alpha$ , равные  $45$  и  $60^\circ$  соответственно.

При контроле качества системы молниезащиты необходимо рассчитать зону защиты каждого молниеприемника и их совокупности. Этот расчет выполняется на основании измерения высоты каждого отдельного молниеотвода с поверхности земли с применением тахеометров или дальномеров. При этом необходимо обратить внимание на то, что, согласно паспортным данным лазерных измерительных приборов, их погрешность исчисляется по дальности долями миллиметров, а по углу — угловыми секундами. Однако при контроле границ зон защиты погрешность определения координат их границ существенно больше.

Например, рассмотрим зону защиты стержневого молниеприемника. Для определения этой границы измерительный прибор устанавливается на поверхности земли на расстоянии  $S$  от оси опоры молниеприемника, и выполняется измерение расстояния  $b$  и угла  $\varphi$  так, что  $h_0 = b \sin \varphi$ . Дифференцируя это соотношение по  $b$  и  $\varphi$ , можно показать, что минимальная погрешность измерения высоты  $\Delta h_0$  достигается при условии:  $\cos \varphi_{\text{опт}} = 0,17 \sqrt[3]{h_0}$ , что соответствует выполнению измерений с расстояния  $S = h_0 \operatorname{ctg} \varphi_{\text{опт}}$ . Оценки показывают, что при высоте молниеотвода в диапазоне  $30$ — $60$  м оптимальное расстояние, с которого необходимо проводить измерения высоты молниеотвода и радиуса зоны защиты, составляет  $40$ — $80$  м, и при этом погрешность определения границ радиуса зоны защиты молниеотвода, например, на высоте  $18$  м, составляет ориентировочно  $\pm 25$  см, что существенно больше приборной погрешности дальномеров. Связано это с двумя факторами. Во-первых, приборная погрешность согласно паспортным данным определена по отражению от специальных призм, которые должны устанавливаться на контролируемом объекте. Однако очевидно, что в трассовых условиях выполнения контроля такие призмы устанавливать на молниеприемниках нецелесообразно. Во-вторых, погрешность возникает в связи с пересчетами зон защиты: измерения проводятся на высоте  $H$  или  $h_0$ , а радиусы зон защиты определяются на высоте  $h_x$ , задаваемой в зависимости от конкретных условий.

Для одиночного тросового молниеприемника зона защиты формируется несколько сложнее в соответствии с формой провисающего троса, которая описывается цепной линией в соответствии с уравнением:

$$\frac{y}{H - \delta} = \operatorname{ch} \frac{x}{H - \delta}. \quad (3)$$

Здесь  $\delta$  — величина максимального провиса грозотроса в системе координат  $(x, y)$ , показанной на рис. 3. При этом границы зоны защиты описываются достаточно сложной кривой, изображен-

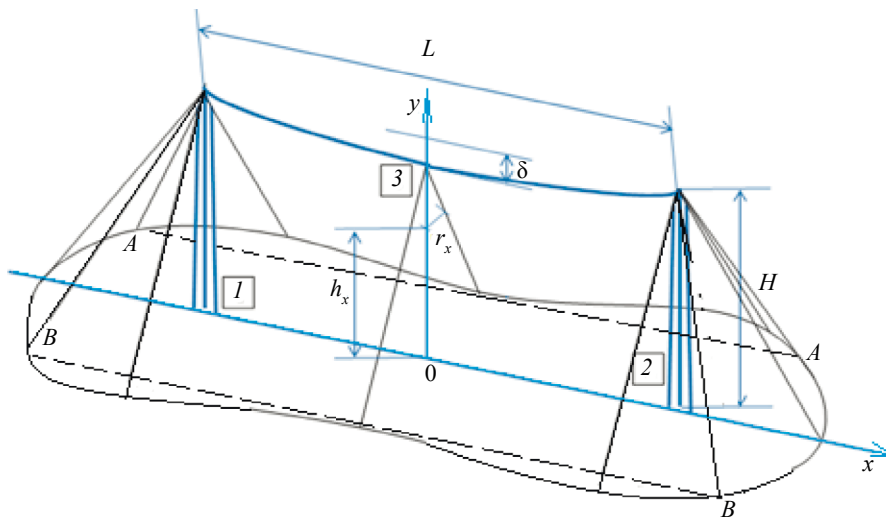


Рис. 3. Формирование зоны защиты тросового молниеприемника.

ной на рис. 3 сплошной линией на уровне земли. Для практического использования в данном случае достаточно упростить очертания границ, заменив криволинейные участки на прямолинейные, как показано на рисунке пунктиром  $A-A$  и  $B-B$ . При этом точность оценки границ зоны защиты на высоте  $h_x$  оценивается аналогично тому, как это сделано для соотношения (2). Следует учесть, что такая оценка — весьма консервативная, однако она приемлема для практики, поскольку предполагает ограничение зоны защиты «в запас» по сравнению с точным расчетом.

Также применяются комбинации нескольких молниеприемников разного типа и высоты, которые комбинируются с учетом конкретных условий местности и высоты защищаемых резервуаров. Зону защиты таких комбинированных молниеотводов можно сконструировать подобно тому, как сделано на рис. 3. Пример приведен на рис. 4, где указаны измеряемые и рассчитываемые расстояния и радиусы зон защиты. При этом следует учитывать, что взаимное влияние двойных молниеотводов приводит к тому, что зона их защиты шире внешней зоны защиты одиночного молниеотвода. Однако погрешность расчета границ этой зоны остается аналогичной рассмотренной выше.

В данном случае обозначения высот и расстояний аналогично приведенным выше на рис. 2 и 3. Для оценки погрешности расчета зоны защиты используются приведенные выше соображения. Поэтому остается в силе приведенная оценка погрешности измерения радиуса зоны защиты: ориентировочно от  $\pm 25$  см на высоте на высоте 18 м до  $\pm 50$  см

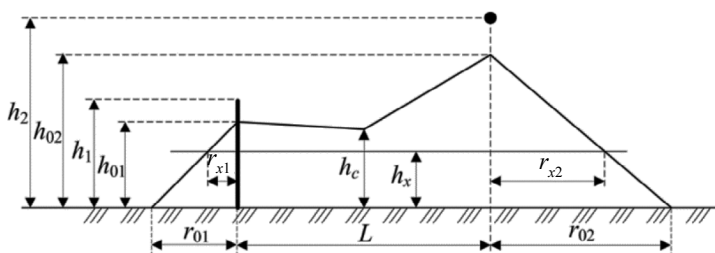
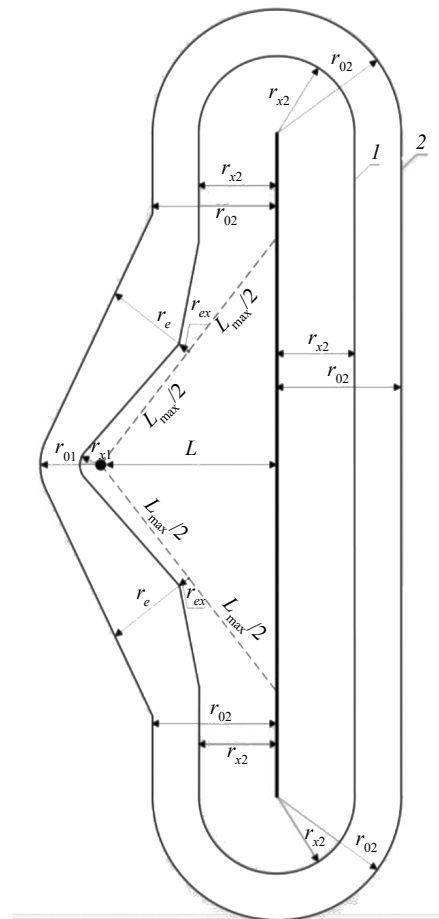


Рис. 4. Формирование зоны защиты комбинированного стержневого и тросового молниеотводов.



на уровне земли при высоте молниеприемника в диапазоне 30—60 м. Таким образом, для обеспечения необходимой степени защиты от прямого удара молнии при контроле состояния молниеотводов эти погрешности измерения необходимо учитывать «в запас».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В состав работ по неразрушающему контролю качества элементов системы молниезащиты пожаро- и взрывоопасных объектов, в том числе — площадочных объектов магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов, входят: определение количественного состава элементов системы, визуальный и измерительный контроль элементов системы с применением геометрических и геодезических измерений, измерение электрических параметров элементов системы молниезащиты. Также могут выполняться измерения электромагнитных полей, наведенных молниевым разрядом, с целью выявления их негативного воздействия на электронные устройства и оборудование.

2. Поскольку одним из основных способов защиты оборудования, зданий и сооружений от прямого удара молнии является защита расстоянием, то измерение расстояний между молниеприемниками, молниеотводами и защищаемыми объектами — один из основных видов контроля состояния систем молниезащиты. При выполнении этих работ необходимо учитывать, что погрешность измерения расстояний между элементами этой системы и защищаемым объектом может составлять несколько десятков сантиметров, что существенно превышает паспортные данные лазерных приборов, применяемых для измерения расстояний, т.е. измерения необходимо проводить «в запас» с учетом фактических погрешностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербинин В.Е., Костин В.Н., Смородинский Я.Г., Ничипорук А.П., Ринкевич А.Б., Шлеенков А.С., Патраманский Б.В., Лоскутов В.Е. О необходимых мерах по обеспечению безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта средствами неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 77—90.
2. Лурье М.В., Мастобаев Б.Н., Ревель-Муроз П.А., Соценко А.Е. Проектирование и эксплуатация магистральных нефтепроводов / Учебник для ВУЗов. М.: Недра, 2019. 434 с.
3. Гиллер Г.А., Могильнер Л.Ю. Контроль качества и диагностика магистральных трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. 2001. № 1. С. 4—9.
4. Persson H., Lonnermark A. Tank Fires. Review of fire incidents 1951–2003. Brandforsk Project 513-021 [Электронный ресурс]. SP Swedish National Testing and Research Institute, 2004.
5. SP Report 2004:14. URL: <https://rib.msb.se/Filer/pdf%5C19108.pdf> (дата обращения 25.09.2017); Risk Management for Floating Roof Storage Tanks [Электронный ресурс]. Lightning Eliminators & Consultants, Inc., 2013. URL: <https://www.lightningprotection.com/wp-content/uploads/2017/04/retractable-grounding-assembly.pdf> (дата обращения 21.09.2017).
6. Lightning Risk and Storage Tank Protection [Электронный ресурс]. Lightning Eliminators & Consultants, Consilium Middle East, 2013. URL: [http://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/8/Shop\\_2012/Day\\_2\\_12.10\\_Lanzoni\\_Mascarenas\\_and\\_Manbiar\\_pdf](http://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/8/Shop_2012/Day_2_12.10_Lanzoni_Mascarenas_and_Manbiar_pdf) (дата обращения 21.09.2017).
7. Петрова Н.В., Чешко И.Д. Анализ экспертной практики по исследованию пожаров, произошедших на объектах хранения нефти и нефтепродуктов / В сб. Проблемы и перспективы судебной пожарно-технической экспертизы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2015. С. 78—81.
8. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
9. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
10. Базелян Э.М., Нерсесян С.В., Туктаров А.Ж. Молниезащита предприятий по переработке и транспорту углеводородного топлива // Известия академии наук. 2010. № 5.
11. Mogilner L., Vlasov N., Pankratov A. Improvement the testing of grounding and lightning protection systems for ensuring safe operation of oil transportation facilities / 12th ECNDT. Gothenburg, Sweden, June, 11—15, 2018. Режим доступа: <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0153-2018.pdf>. Дата обращения 22.08.2020.
12. Могильнер Л.Ю., Владова А.Ю., Власов Н.А., Панкратов А.Н. Интегральный критерий оценки состояния системы молниезащиты и заземления объектов перекачки нефти // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 2. С. 40—46.
13. Копысов А.Ф., Лукьянов С.В., Могильнер Л.Ю., Власов Н.А. Обследование систем молниезащиты и заземления пожаро-взрывоопасных объектов: совершенствование технологии // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 1. Т. 8. С. 84—91.

14. *Khuzyaganiev I.A., Trusov K.A., Mogilner L.Yu.* Standardization of lightning protection in oil and oil products pipeline transport / В сб. 34th International Conference on Lightning Protection — ICLP 2018 conference proceedings. 2018. Режим доступа: <https://iclp2018.org/openconf/openconf.php>; ID: 102, Password: 32167gw32167. Дата обращения 10.10.2018.

15. *Черкасов В.Н.* Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 80 с.

16. Правила устройства электроустановок (издание 7).

17. *Базелян Э.М., Гайворонский А.С., Сысоев В.С.* Исследование зон защиты типовых молниеотводов методом имитационного физического моделирования / III Российская конференция по молниезащите, 2012.