

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ю.А. АВЕРЬЯНОВА

Защита производственных объектов от молнии и статического электричества

Учебное пособие
по дисциплине
«Безопасность жизнедеятельности»

Казань 2013

УДК 658.392 (07)

ББК 68.9

A19

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Казанского национального
исследовательского технологического университета *А.П. Рахматуллина*;
кандидат технических наук, доцент Казанского государственного
энергетического университета *З.М. Билялова*

A19 **Аверьянова, Ю.А.**

Защита производственных объектов от молнии и статического электричества: Учеб. пособие по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». / Ю.А. Аверьянова – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 112 с.

Приведены понятия о молнии, пожаро- и взрывоопасности ее воздействия, представлена классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты от прямых ударов и вторичных воздействий молнии. Обобщены результаты исследования зон взрывоопасности и вопросы молниезащиты, а также эксплуатация молниезащитных устройств. Обобщены вопросы возникновения зарядов статического электричества. Рассмотрены вопросы эксплуатации устройств защиты от разрядов статического электричества.

Учебное пособие предназначено для студентов КГЭУ всех специальностей.

УДК 658.392 (07)

ББК 68.9

© Аверьянова Ю.А., 2013

© Казанский государственный энергетический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически нет другого вида энергии, способного конкурировать с электрической энергией по доступности, удобству ее использования, преобразования в другие виды энергии и передачи на огромные расстояния без значительных потерь.

В условиях повсеместного использования электроэнергии особое внимание следует уделять электробезопасности производства, особенно в тех отраслях, где условия технологических процессов, применение горючих и легковоспламеняющихся жидкостей и газов создают условия пожаро- и взрывоопасности.

Все это требует тщательной разработки нормативно-технических документов и инженерных решений, исключающих возможность возникновения пожаров (взрывов) от любых причин, в том числе от поражения разрядами молний и статического электричества, что может привести к значительному материальному ущербу, увечьям и человеческим жертвам.

Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности производственных объектов регламентируется нормативными документами, соблюдение которых является обязательным на всех этапах проектирования, монтажа и эксплуатации. Поэтому перед работниками пожарной охраны ставятся задачи качественного улучшения надзорных и профилактических функций в области пожаро- и взрывобезопасного применения устройств защиты объектов от поражения молнией и статического электричества.

Одним из главных условий повышения результативности пожарно-профилактической работы в этой области является изучение причин возникновения пожаров и взрывов на производстве. Взрывоопасные здания и наружные установки иногда подвергаются поражениям молнией из-за отсутствия молниезащитных устройств. Случаи поражений при наличии молниезащиты происходят вследствие недостатков в проектировании, монтаже и эксплуатации таких устройств.

Цель данного учебного пособия – показать проблемы в области защиты от воздействия молний и разрядов статического электричества и современные пути их решения.

ГЛАВА 1. МОЛНИЕЗАЩИТА

1.1. Молния и ее характеристики

Молния представляет собой электрический разряд в атмосфере между заряженным облаком и землей, между разноименно заряженными частями облака или соседними облаками. Длина ее канала обычно достигает нескольких километров, причем значительная его часть находится в грозовом облаке.

До появления разряда происходит накопление и разделение электрических зарядов в облаке, чему способствуют аэродинамические и термические процессы: восходящие воздушные потоки, конденсация паров на высоте от 1 до 6 км, образование капель, их дробление. Вертикальные потоки теплого воздуха могут создаваться при усиленном местном нагреве почвы (*тепловые грозы*, охватывающие небольшое пространство) и во время вторжения клиновидной массы холодного воздуха (*фронтальные грозы*).

Нормально земля заряжена отрицательно с поверхностной плотностью δ – при существовании электрического поля земли с напряженностью E_H . Второй «обкладкой» этого сферического конденсатора является положительно заряженная ионосфера, расположенная очень высоко (рис. 1.1). Под действием E_H падающая капля поляризуется, в нижней ее части появляется положительный заряд, в верхней – отрицательный.

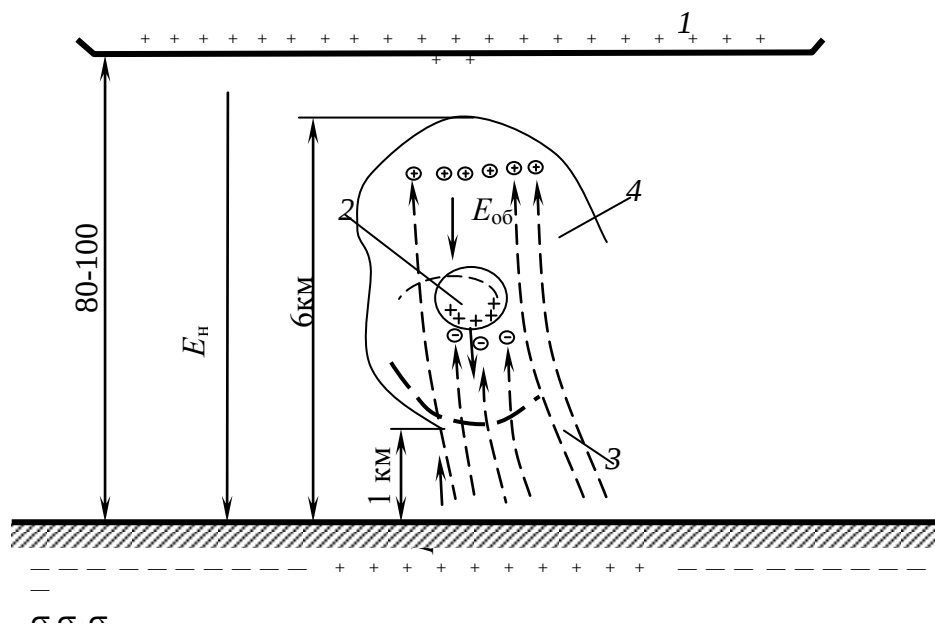


Рис. 1.1. Образование зарядов в облаке:

1 – ионосфера; 2 – поляризованная капля; 3 – поток воздуха; 4 – облако

Движущиеся в восходящем потоке воздуха электроны притягиваются нижней частью капли, а более положительные инерционные ионы воздуха отталкиваются и уносятся далее, сосредоточиваясь вверху. В результате этого капли получают суммарный отрицательный заряд и наполняют нижнюю часть облака со значительной объемной плотностью, где может находиться иногда и небольшой объемный положительный заряд. Внутри облака образуется электрическое поле с напряженностью $E_{об}$ между распределенными разнополярными зарядами. Нижняя часть индуцирует на поверхности земли положительный заряд с плотностью δ^+ и появляется местное грозное электрическое поле с напряженностью $E_Г$, достигающей иногда 100-200 кВ/м.

Разряд облака на землю (рис. 1.2) имеет вид линейной молнии и начинается в большинстве случаев при высокой концентрации в нем зарядов и напряженности $E_Г = 20-30$ кВ/см у его выступающих частей. Этому благоприятствует меньшая плотность воздуха вокруг облака, чем плотность у земли.

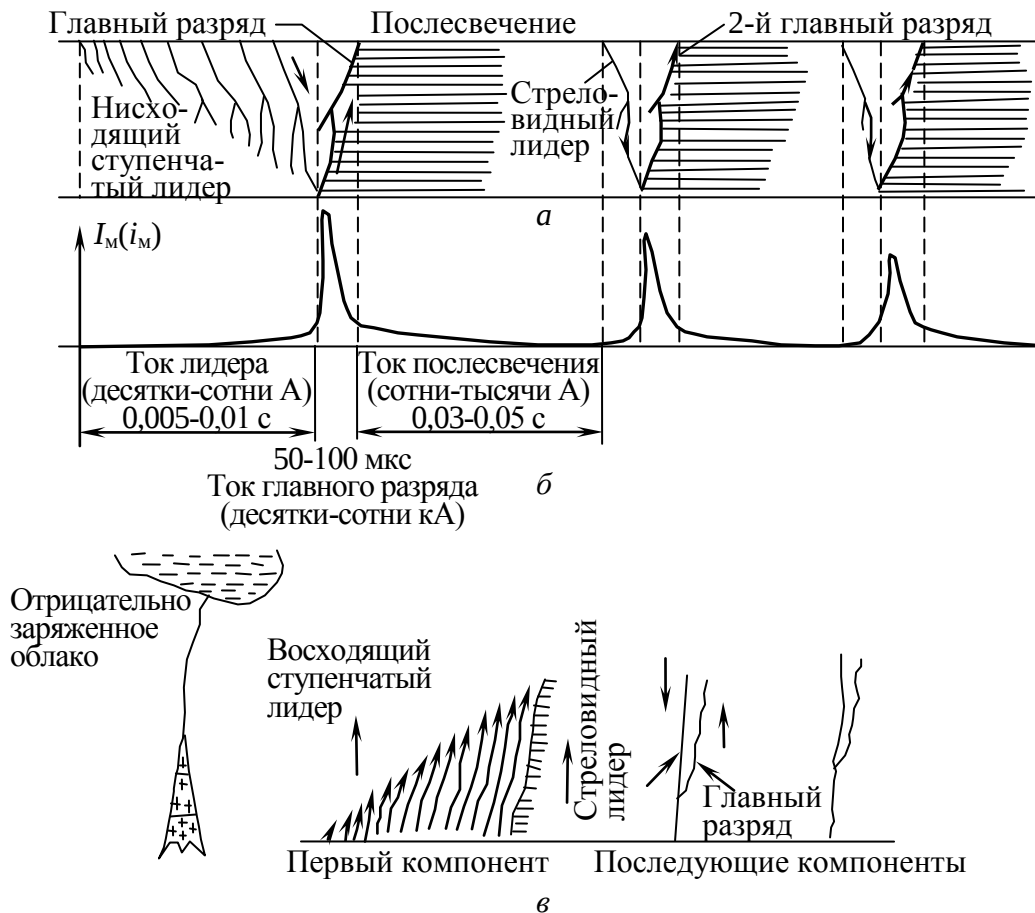


Рис. 1.2. Разряд облака на землю: *a* – оптическая осциллограмма (запись на движущейся слева направо фотопленке); *б* – кривая тока молнии; *в* – оптическая картина восходящего разряда молнии в вершину высокой башни

Исследованиями в России и за рубежом выявлены условия возникновения молнии и ее характеристики. Для равнинных районов делают различие между разрядами молнии непосредственно в землю или в объекты высотой до 100 м и разрядами в высотные здания и сооружения: радио- и телевизионные мачты, заводские трубы. В первом случае характерны *нисходящие*, а во втором – *восходящие* разряды (молнии).

Нисходящий разряд между облаком и землей разделяется на *лидерный* и *главный*. Он обычно начинается с прорастания от облака к земле слабосветящегося канала – *ступенчатого* лидера (рис. 1.2), движущегося прерывисто (ступенями). Длина каждой ступени около 50 м, средняя скорость ее распространения составляет $(2-5) \cdot 10^5$ м/с. В большинстве случаев (до 90 %) заряд облака и нисходящий ступенчатый лидер имеют отрицательную полярность. Вокруг него образуется значительная ионизированная область воздуха, созданная электрическим полем. После прорастания каждой ступени наступает пауза от 30 до 100 мкс. Общее время продвижения лидера составляет 0,005–0,01 с, средняя скорость этого процесса $(1-2) \cdot 10^5$ м/с. Приближение его к земле обуславливает возрастание электрической напряженности на его головке, канал лидера заполняется отрицательным зарядом с линейной плотностью δ^- . Возрастает и плотность индуцированных зарядов δ^+ на земле или на ближайших объектах. Ток в лидере нарастает постепенно (рис. 1.2, б) и редко превышает сотни ампер.

По мере приближения ступенчатого лидера к земле напряженность электрического поля на вершине возвышающегося заземленного объекта увеличивается и может превысить критическую. С объекта начинает развиваться *встречный лидер*, а ступенчатый при этом может изменить направление, отклоняясь к развивающемуся от объекта встречному и соединяясь с ним.

Длина встречного лидера обычно незначительна и для большинства случаев не превышает 20–30 м. С увеличением высоты объекта от 20 до 200 м длина его канала возрастает приблизительно от 20–30 до 50–85 м, поэтому встречный лидер имеет важное значение в развитии молнии. Он формирует завершающий участок траектории и в значительной степени предопределяет место поражения. Когда головка ступенчатого лидера соприкоснется с землей или встречным лидером, возникает главный разряд (рис. 1.2, а). Он связан с нейтрализацией отрицательных зарядов лидера положительными зарядами земли и напоминает короткое замыкание. Можно рассматривать это явление и как освобождение лидера от отрицательных зарядов. Такой процесс направлен снизу вверх и протекает

весьма быстро (за $50\div 100$ мкс). Наиболее вероятная скорость развития главного разряда равна $1/3$ скорости света, но изменяется в больших пределах. Главный разряд сопровождается очень интенсивным свечением канала, уменьшающимся при приближении к облаку, а также мощным звуковым эффектом (громом). Ток главного разряда (рис. 1.2, б) достигает большой величины (десятки и сотни кА за $50\text{--}100$ мкс) и способен разогреть канал до температуры более $30\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вокруг него образуется ионизированная область, исчезающая после окончания главного разряда через $0,03\text{--}0,05$ с. Затем образуется ток после свечения величиной от 10 до 1000 А. Длительный ток в этой финальной стадии молнии является одной из основных причин ее термического воздействия. Три перечисленные стадии (лидерная, главная и финальная) составляют первую компоненту нисходящей отрицательной молнии. Как правило, за ней может следовать несколько так называемых последующих компонент. При этом вместо ступенчатого лидера появляется по тому же пути *стреловидный лидер* (рис. 1.2, а), развивающийся от прежнего места в грозовом облаке до земли или объектов на земле.

Последующие компоненты молнии протекают быстрее, но их ток значительно меньше, чем в первой. По зарубежным данным, в 50% случаев среднее число компонент на один разряд молнии составляет $2\text{--}3$, а в 45% – одну. Изредка наблюдаются молнии со значительно большим числом компонент. Общая продолжительность многокомпонентной нисходящей молнии достигает $0,2\text{--}0,3$ с (50% случаев), но наблюдалась и длительность ее до $1\text{--}1,5$ с. Заряд, переносимый в течение всей вспышки молнии, колеблется от единиц до сотен кулонов, из которых на долю отдельных импульсов приходится $5\text{--}15$, а на непрерывную составляющую $10\text{--}20$ Кл. Им и пополняется общий заряд земли. Отрицательная молния изучена более полно, ее параметры известны с большей достоверностью, так как данные о нисходящих молниях накапливались продолжительное время в разных районах земного шара.

При разрядах в объекты значительной высоты (сотни метров) обнаруживаются существенные различия первого импульса и завершающего разряда. В этом случае разряд начинается с прорастания восходящего лидера от вершин заземленных сооружений (рис. 1.2, в). Развивающийся вверх от объекта, он может и не иметь явной ступенчатой структуры, но главный разряд и в этом случае развивается от объекта к облаку (т.е. его направление совпадает с направлением распространения лидера) и получается слабым, что объясняется медленным перераспределением малоподвижных зарядов в облаке и неспособностью его быстро

обеспечить высокую концентрацию их для компенсации зарядов очень длинного лидера. Чем выше объект, тем меньше ток главного разряда при одной и той же вероятности его появления. Но особенность состоит не в меньших токах, а в том, что высокие объекты будут чаще поражаться прямыми ударами. При исследованиях наблюдалось быстрое возрастание количества восходящих разрядов с увеличением высоты объекта h_x (при $h_x \geq 150$ м оно составляло 24 %, а при $h_x \geq 380$ м – 96 %). В горах соотношение между восходящими и нисходящими разрядами изменяется в сторону увеличения первых. Лидер последующих компонент восходящих молний всегда продвигается по направлению к земле, поэтому их структура не отличается от структуры последующих компонент нисходящей молнии. Сведения о восходящих молниях появились лишь в последние десятилетия, когда начались систематические наблюдения за грозопоражаемостью очень высоких сооружений, например Останкинской телевизионной башни.

Наибольшую опасность представляет нисходящая отрицательная молния между облаком и землей (объектом) в виде линейной молнии, с которой связано подавляющее большинство пожаров и повреждений зданий, сооружений, линий электропередач, подстанций [1].

Таким образом, для молниезащиты представляет интерес только линейная, а не шаровая молния как редкое явление. Электрическими характеристиками молнии являются амплитуда тока I_M (наибольшее значение тока главного разряда первой компоненты), крутизна тока α , длина фронта волны тока τ_f и длина волны тока τ_b (рис. 1.3). Они важны при расчете различных воздействий молнии.

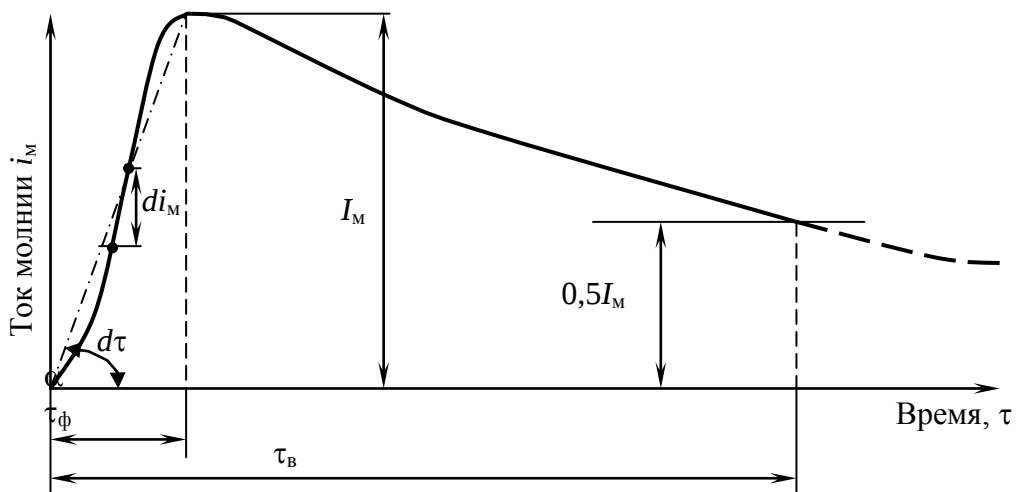


Рис. 1.3. Изменение тока молнии i_M во времени τ

Амплитуда I_M изменяется в очень широких пределах, достигая иногда 230–250 кА. Чем больше амплитуда, тем меньше вероятность ее появления. Оценка этой зависимости дается кривой на рис. 1.4. Видно, что амплитуда в 100 кА и выше возникает очень редко и составляет около 2 % общего числа разрядов. Наиболее часты амплитуды более 30 кА. Они появляются примерно в 50 % случаев. Расчетной величиной считают $I_M = 100$ кА, а в районах с малой грозовой деятельностью допустимо принимать 50 кА.

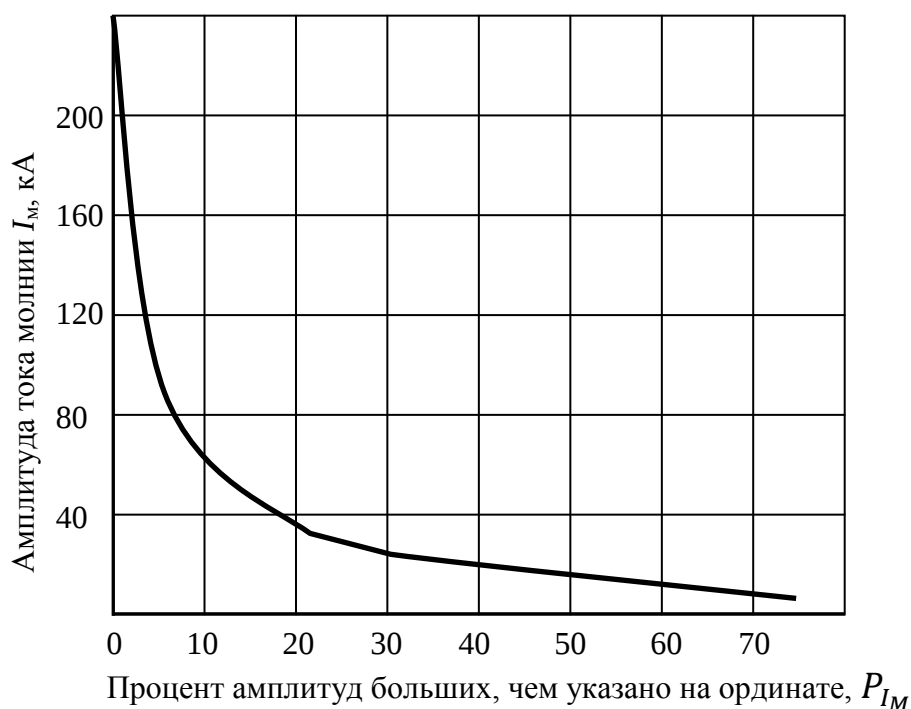


Рис. 1.4. Кривая вероятности амплитуд токов молнии
(для высот над уровнем моря менее 500 м)

Вероятность P_1 может быть определена и по простой формуле

$$l_g P_1 = -I_M / 60, \quad (1.1)$$

которая пригодна для хорошо заземленных объектов. При ударе молнии в трос, провод или в плохо проводящую почву вероятность уменьшается. С увеличением высоты местности кривая вероятности идет ниже. Для горных районов I_M при одной и той же вероятности уменьшается вдвое ввиду малой интенсивности главного разряда. Игрет роль и высокое удельное сопротивление почвы в горах (скалы, снег).

Крутизна $\alpha = di_M/d\tau$ характеризует скорость нарастания тока, т.е. отношение приращения тока Δi_M к очень малому промежутку времени Δt ,

и является переменной величиной. Она меньше в начале и в конце восходящей ветви тока, на которой происходит быстрое его изменение, и велика в ее середине. Величина α всегда превышает 5 кА/мкс и может достигать 80 кА/мкс. Средняя крутизна $\alpha = I_M/\tau_\phi$ и пропорциональна $\operatorname{tg}\alpha$ (α – угол наклона штрихпунктирной кривой к оси времени) на рис. 1.3. Максимальная расчетная крутизна принимается равной 50 кА/мкс. На ниспадающей ветви кривой ток изменяется медленней, его крутизна гораздо меньше и ее во внимание не принимают.

Вероятность появления тока молнии с крутизной α или более определяется по формуле

$$I_g P_\alpha = -\alpha/36. \quad (1.2)$$

Крутизна важна для расчета индуктивного падения напряжения в проводниках цепи тока молнии. Она определяет в основном и наведенные ЭДС, и разности потенциалов в тех контурах, на которые молния прямо не воздействует (провода электрической сети, антенны, трубопроводы). Крутизна при высоких объектах принимается такой же, как и для объектов высотой менее 30 м. Для горных районов (высота над уровнем моря более 700 м) при той же вероятности крутизна уменьшается вдвое. Общая вероятность одновременного появления тока молнии с амплитудой I_M и более, с крутизной α и выше оценивается по аналогичной формуле

$$I_g P_{I,\alpha} = [(I_M/60) + (\alpha/36)]. \quad (1.3)$$

На практике замечено сравнительно слабое увеличение крутизны при возрастании амплитуды тока молнии [1].

Длиной фронта τ_ϕ называют время от начала до конца нарастания тока молнии. На этом участке изменение тока наиболее интенсивное. Величина τ_ϕ первых компонент составляет 1,5–10 мкс. Чем больше амплитуда, тем обычно больше и τ_ϕ . Для последующих компонент длина фронта волны меньше примерно в 2,5 раза. За расчетную величину рекомендуется принимать $\tau_\phi = 1,5$ мкс.

Длиной волны принято считать время τ_ψ , протекающее от начала до того момента, когда $i_M = 0,5I_M$ и изменяется от 20 до 100 мкс. Расчетной величиной принимают $\tau_\psi = 50$ мкс.

Иногда кривую тока молнии идеализируют. Если интересуются процессами на фронте, то считают, что после $t = \tau_f$ ток не изменяется и остается равным I_M . Наоборот, для анализа воздействия на ниспадающей ветви, например теплового воздействия, пренебрегают фронтом и полагают, что ток сразу достигает значения I_M и затем медленно спадает по закону $i_m = I_M e^{-1/T}$, где T – некоторая постоянная величина.

1.2. Пожаро- и взрывоопасность воздействия молнии

Воздействие молнии может быть двояким. Во-первых, оно может поражать здания и установки непосредственно, что называется *прямым ударом*, или *первичным воздействием*. Прямой удар молнии характеризуется непосредственным контактом канала молнии со зданием или сооружением и сопровождается протеканием через него тока молнии. Во-вторых, она может оказывать *вторичные воздействия*, объясняемые электростатической и электромагнитной индукцией, а также заносом высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации, что является следствием прямого удара молнии. Вторичные воздействия создают опасность искрения внутри защищаемого объекта.

Воздействия прямого удара молнии

Прямой удар молнии обуславливает следующие воздействия на объекты: *термические*, *механические* и *электрические*. Все эти воздействия могут быть причинами пожаров, взрывов, механических разрушений, перенапряжения на пораженных элементах объекта, проводах и кабелях электрических сетей, поражения людей.

Термические воздействия связаны с резким выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с содержимым пораженного объекта и при протекании через объект тока молнии. Канал молнии имеет высокую температуру (30000 °C и выше) и запас тепловой энергии. Выделяемая в канале молнии энергия определяется переносимым зарядом, длительностью протекания и амплитудой тока молнии. В 95 % случаев разрядов молнии эта энергия (в расчете на сопротивление 1 Ом) превышает 5,5 Дж [2], что на несколько порядков превышает минимальную энергию воспламенения газо-, паро- и пылевоздушных смесей. При этом вероятность воспламенения горючей среды зависит не только и не столько от амплитуды тока, сколько от величины и времени

протекания длительного тока молнии в ее финальной стадии (ток 100–500 А, время 1–1,5 с).

Особую опасность прямой удар молнии представляет для зданий и наружных установок, где по условиям технологического процесса может образоваться взрывоопасная среда, что встречается редко; чаще она образуется при нарушении технологических процессов, авариях оборудования, вентиляции.

Опасность поражения прямым ударом молнии некоторых наружных взрывоопасных установок связана с проплавлением молнией металлических поверхностей, перегревом их внутренних стенок или воспламенением взрывоопасных смесей паров и газов, выделяющихся через дыхательные и предохранительные клапаны, газоотводные трубы, свечи. Сюда относятся металлические и железобетонные резервуары со сжиженными горючими газами, многие аппараты наружных технологических установок нефтеперерабатывающих, химических и других объектов.

Тепловые процессы в месте контакта молнии с металлом весьма сложны и плохо поддаются расчету. При упрощении модели этого явления можно предположить, что процесс тепловыделения в зоне контакта аналогичен стационарной электрической дуге. Доказано, что проплавление (прожог) металла установок током молнии возможно лишь при его толщине не более 4 мм.

В работе [3] указывается, что площадь прожога S , мм², слабо зависит от материала стенки, а определяется в основном ее толщиной δ , мм, и протекущим зарядом q_m , Кл. Экспериментальные данные удовлетворительно интерполируются следующими соотношениями для меди, железа, стали и алюминия:

при $0 \text{ мм} < \delta \leq 0,9 \text{ мм}$

$$S = 25,3\delta^{-0,9}q_m; \quad (1.4)$$

при $0,9 \text{ мм} < \delta \leq 3,8 \text{ мм}$

$$S = 24,5\delta^{-1,54}q_m. \quad (1.5)$$

Проплавление током молнии металлических поверхностей может привести к взрыву и разрушениям, если внутри установки содержится взрывоопасная концентрация горючих газов и паров, поэтому с учетом коррозии за минимальную толщину металла, способную сохранить герметичность установки (при отсутствии высоких давлений), принимают 5 мм.

Необходимо учитывать, что внутренняя часть стенки установки, где содержится продукт, в месте удара молнии приобретает повышенную температуру, которая может оказаться критической для него и вызвать взрыв. Для объяснения этого явления можно воспользоваться теорией воспламенения горючих смесей от действия нагретых тел.

Пораженный участок стенки установки (рис. 1.5) примем за нагретое тело с температурой T_1 . Если среда, соприкасающаяся с ним, инертна, то распределение температуры в ней изобразится кривой T_1A_1 (рис. 1.5). Если же среда представляет собой горючую смесь, то в силу дополнительного выделения тепла распределение температур в ней изобразится пунктирной линией T_1A_1' . Повышение начальной температуры стенки до T_2 приведет к тому, что в инертной среде ее распределение будет подобно прежнему, но с более резким снижением (кривая T_2A_2).

В горючей же смеси, где с повышением температуры увеличивается выделение теплоты, распределение температуры снижается значительно медленней, чем T_2A_2 . При определенном значении T_2 понижения температуры в горючей среде (вблизи нагретого участка стенки) не произойдет, а ее распределение изобразится пунктирной линией T_2A_2' , т.е. температура горючей смеси за счет выделения тепла реакции поддерживается равной температуре нагретого участка стенки, который больше не участвует в процессе нагрева смеси.

При повышении температуры стенки до T_3 на некотором удалении от нее температура горючей смеси будет расти до тех пор, пока не возникнет горение. Такое изменение температуры изобразится кривой T_3A_3' (рис. 1.5).

Таким образом, температура нагретого участка стенки T_2 является предельной, так как при ней количество теплоты, выделяемое реакцией, равняется отводимому. Если немного повысить температуру участков стенки (до T_3), то скорость выделения теплоты превысит скорость теплоотвода, и смесь получит возможность разогреваться до

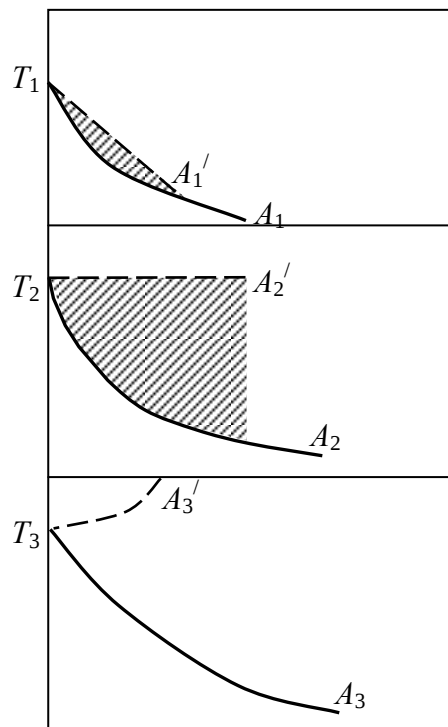


Рис. 1.5. Схема зажигания нагретым телом

воспламенения, следовательно, T_3 – температура самовоспламенения. В случае возникновения горения от действия местного источника критическая температура должна превышать температуру самовоспламенения (например, T_3), при этом, чем меньше размеры накаливаемого участка стенки, тем выше критическая температура.

Были проведены опыты по выявлению влияния размеров шарика, рассматриваемого в качестве источника зажигания, на температуру самовоспламенения горючей смеси. Результаты опытов показали (рис. 1.6), что меньшему диаметру шарика соответствует большая температура самовоспламенения газовой смеси (светильного газа с воздухом). Диаметр накаливаемого участка в месте прямого удара молнии можно принять равным 10 см.

При воспламенении горючей смеси в аппарате, пораженном молнией, необходимо учитывать и то, что горючие смеси имеют *период индукции* или время запаздывания самовоспламенения. Воспламенения не произойдет, если указанный период окажется больше времени охлаждения накаливаемого участка стенки аппарата до величины ниже температуры самовоспламенения. Если же он меньше времени охлаждения этого участка, то горючая смесь воспламенится.

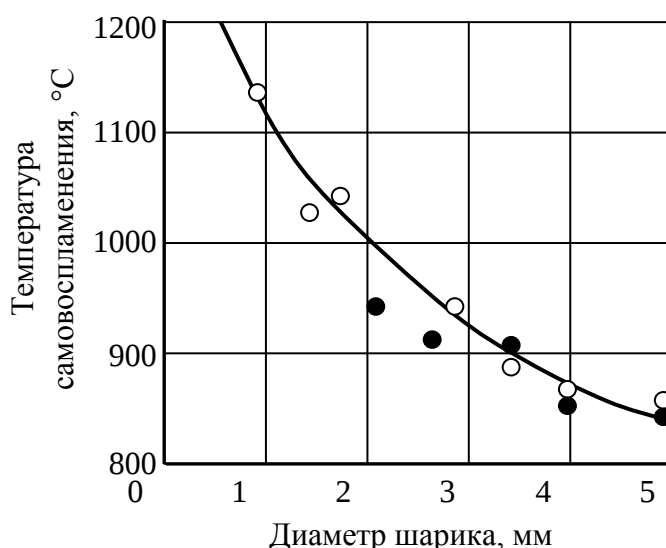


Рис. 1.6. Зависимость температуры самовоспламенения от диаметра шарика

Опытами установлено, что время нагрева и охлаждения пораженного молнией места в стальном листе от 0,1 до 10 с. Максимум температуры возникает через 1–2 с от начала удара молнии и уменьшается пропорционально толщине листа. Период же индукции у ряда веществ может быть меньше интервала между возникновением максимума

температуры и охлаждением поражаемого участка стенки. У метано-воздушных смесей в зависимости от процентного содержания метана (6–10 %) и температуры нагрева смесей (775–875 °С) период индукции колеблется от 0,35 до 1,23 с. У водородовоздушных смесей при концентрациях водорода от 27,8 до 34 % период индукции составляет 3 мс, а у ацетилено-воздушных смесей (концентрация ацетилена 10–18 %) – 4–14 мс. У пыли битуминозного угля он составляет примерно 4 мс, а у алюминиевой пыли практически отсутствует. Из приведенных примеров видно, что установки с водородом или ацетиленом более опасны, чем с метаном. Также опасны сооружения с алюминиевой пылью.

Представленная на рис. 1.7 кривая $t_{\text{макс}} = f(\delta)$ позволяет выбрать допустимую толщину металла для наружных взрывоопасных установок. Там, где допустимо повышение температуры внутренней стенки до 800–1200 °С (с учетом всех свойств среды) и нет высоких давлений, можно ограничиться толщиной стенки в 4–5 мм. В установках, содержащих газ или жидкость под давлением, толщина должна быть 5,5–6 мм, в противном случае силой давления разогретый металл разорвется или вспучится, что может привести к пожару или взрыву.

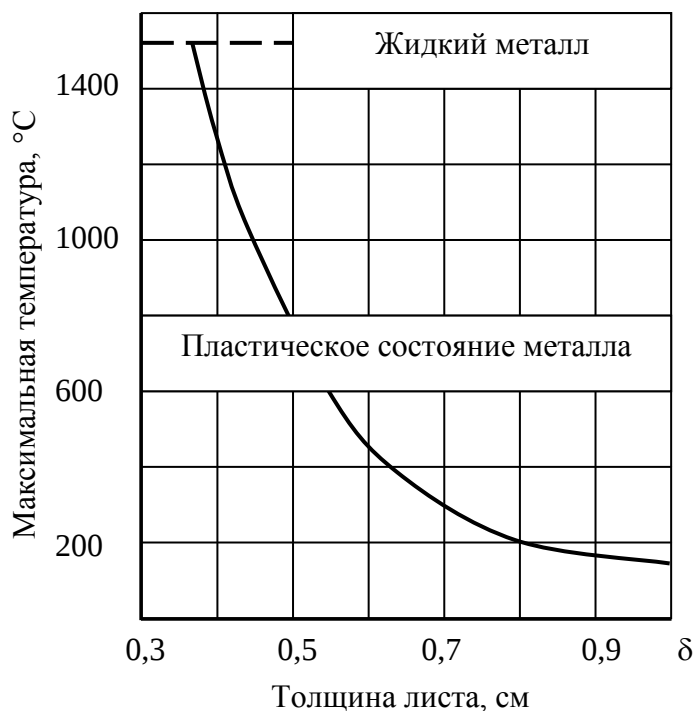


Рис. 1.7. Зависимость температуры от толщины листа

Таким образом, при решении вопроса об использовании взрывоопасных наружных технологических установок в качестве естественных молниеприёмников в каждом отдельном случае необходим

тщательный анализ приведенных выше условий. В сомнительных случаях (установки находятся под избыточным давлением) для исключения непосредственного контакта канала молнии с установкой на последней сооружают специальный молниеприёмник. Такие молниеприёмники необходимы и в том случае, если на установках имеются дыхательные клапаны, газоотводные трубы, свечи. При этом молниеприёмники располагают так, чтобы контакт канала молнии с ними происходил вне взрывоопасной зоны распространения взрывоопасных смесей. Те же условия нужно соблюдать и при установке молниеотводов для защиты взрывоопасных зданий с устройствами для выделения горючих смесей, способных к воспламенению при контакте с каналом молнии. Большинство промышленных зданий и наружных установок представляет сложную сеть металлических конструкций, трубопроводов и т.д., по которым в момент прямого удара растекается ток молнии. При отсутствии контакта между отдельными конструкциями в местах сближения металлических частей может возникнуть мощная искра – источник воспламенения горючей среды.

Пожар или взрыв от прямого удара молнии может произойти и при наличии молниезащиты, если токоотводы имеют значительную протяженность и не предприняты меры по выравниванию потенциалов между ними и металлическими конструкциями здания или технологического оборудования. В противном случае между токоотводом и элементами здания, сохраняющими потенциал, близкий к потенциалу земли, возникает искра – источник взрыва или пожара. К пожару может привести также нарушение целостности токоотвода, проложенного по мягкой кровле или сгораемому утеплителю здания, и тогда в месте разрыва возникает мощная искра.

Пожаро- и взрывоопасность атмосферного электричества может быть обусловлена не только прямым ударом молнии, но и встречными (незавершенными) восходящими лидерами (размер канала составляет несколько десятков сантиметров), температура канала которых может достигать 2000–7000 К. Развивающиеся, например, от газоотводных и дыхательных труб, они даже при отсутствии разряда молнии могут вызвать воспламенение взрывоопасных смесей паров и газов, сбрасываемых в атмосферу. Такие случаи наблюдаются на нефтехимических предприятиях. Однако каких-либо нормативных мер защиты от указанных явлений не предусмотрено. Вероятность воспламенения сбрасываемых горючих смесей можно снизить примерно в 100 раз, если на устройствах по сбросу укрепить сетку-сферу (электростатический купол) с радиусом 1 м.

Отсутствуют нормативные рекомендации о необходимости учитывать при молниезащите дымовых труб не только ее высоту, но часть высоты струи выбрасываемого дыма. Высоту струи дыма над трубой следует принимать до точки, в которой температура горючих газов будет не более 100 °С. Следовательно, защитный уровень трубы будет равным

$$h_x = h_{тр} + h_{стр}.$$

Термическое воздействие токов молнии на проводники вызывает не только их нагрев, но и оплавление. При этом может выделяться такое количество теплоты, которое при недостаточном сечении металла расплавит его или даже испарит. В местах разрыва проводников или плохого электрического контакта обычно появляется искра. При расчете минимальных сечений исходят из условия, что вся тепловая энергия, выделяемая током молнии, идет на нагрев металла токоотвода. Потерей теплоты в окружающую среду из-за кратковременности этого процесса пренебрегают.

Расчетами определено, что минимальное сечение стальных токоотводов, исключающее расплавление, составляет 16 мм², а медных – 6 мм². С учетом коррозии металлов их минимальные сечения следует увеличить. В практике имелись случаи, когда от действия молнии токоотводы распадались на куски длиной в несколько сантиметров, что объясняется не только тепловыми, но и электродинамическими усилиями, возникающими в проводниках. В целях повышения механической прочности и увеличения срока службы рекомендуется применять токоотводы сечением не менее 29 мм² из круглой стали и 16 мм² из меди.

Механические воздействия токов молнии обуславливаются ударной волной, распространяющейся от канала молнии, и электродинамическими силами, действующими на проводники с токами молнии. Это воздействие может быть причиной, например, сплющивания тонких металлических трубок и схлестывания проводников. При поражении молнией сооружений из твердого негорючего материала (камня, кирпича, бетона) наблюдаются местные разрушения как результат динамического действия. Наиболее серьезные из них связаны с электрогидравлическими эффектами при разряде молнии. Если между пораженным участком объекта и землей нет токопроводящих путей, его потенциал по отношению к земле достигает высоких значений и возникает пробой (разряд) по пути наименьшей электрической прочности.

Ток молнии, устремляясь в узкие каналы пробоя, вызывает резкое повышение температуры и испарение (взрыв) в них материала. При этом давление достигает значительных величин, что приводит к взрыву (расщеплению) токонепроводящих частей объекта, например расщепление деревянных сооружений и деревьев, разрушение незащищенных кирпичных дымовых труб, башен. При этом степень разрушения определяется не столько током молнии, сколько содержанием влаги или газогенерирующей способностью пораженного материала. Известны случаи частичного или даже полного разрушения бетонных и железобетонных сооружений. Это можно объяснить плохими контактами в местах соединений стальной арматуры. При надежных контактах арматура железобетонных сооружений может служить хорошим токоотводом для молнии, так как имеет большое общее сечение, исключая опасные повышения температуры [4].

Электрические воздействия молнии связаны с поражением людей или животных электрическим током и появлением перенапряжений на пораженных элементах объекта. Перенапряжение пропорционально амплитуде и крутизне тока молнии, индуктивности конструкций и сопротивлению заземлителей, по которым ток молнии отводится в землю. Даже при выполнении молниезащиты прямые удары молнии с большими токами и крутизной могут привести к перенапряжениям в несколько мегавольт.

При отсутствии молниезащиты пути растекания тока молнии становятся неконтролируемыми, и это может увеличить опасность поражения током людей, опасные напряжения шага и прикосновения, а также перекрытия на другие объекты. Поэтому опасно укрываться во время грозы под деревьями, особенно высокими или стоящими отдельно, находиться вблизи металлических труб, мачт, молниеотводов, заземлителей и т.п.

Вторичные воздействия молнии

Под вторичными воздействиями молнии подразумеваются явления во время близких разрядов молнии, сопровождающиеся появлением разностей потенциалов на конструкциях, трубопроводах и проводах внутри помещений и сооружений, не подвергающихся непосредственному прямому удару. Они возникают в результате электростатической и электромагнитной индукции. К ним можно отнести также появление разностей потенциалов внутри помещений вследствие заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации (трубопроводы, кабели, воздушные линии).

Электростатическая индукция. Накопление в грозовом облаке и частичное перемещение зарядов в формирующийся канал молнии в ее начальной стадии вызывает скопление связанных зарядов противоположного знака на поверхности земли и наземных объектов. Развитие этих процессов происходит относительно медленно, поэтому перемещение зарядов не вызывает внутри наземных объектов заметных разностей потенциалов, несмотря на высокие сопротивления утечки. В стадии главного разряда освобождение связанных зарядов происходит настолько быстро, что могут возникнуть существенные разности потенциалов между металлическими конструкциями и землей, вызванные протеканием токов через большие сопротивления утечки. Разности потенциалов даже при ударах молнии на расстоянии 100 м от здания могут достигать десятков и сотен киловольт и вызывать искры в воздушных промежутках. Несмотря на малую энергию, искры могут быть причиной взрывов в помещениях со взрывоопасными концентрациями горючих смесей газов, паров и пылей.

На таких устройствах, как провода воздушных линий (электрических линий связи), освободившиеся заряды распространяются в виде волн и создают напряжения по отношению к земле в десятки и сотни киловольт, способные вызывать в них мощные искровые разряды.

Электромагнитная индукция. Разряд молнии сопровождается появлением в пространстве быстро изменяющегося во времени магнитного поля, индуцирующего ЭДС, способную вызвать искрообразование в контурах из различных протяженных металлических предметов (трубопроводов, воздухопроводов, проводов, кабелей). При полностью замкнутом контуре индуцированная ЭДС вызовет электрический ток и небольшое нагревание его элементов, не представляющее, как правило, какой-либо опасности [1].

Контур может быть незамкнутым или иметь плохие контакты в местах соединений (во фланцах трубопроводов), где ЭДС и может вызвать искрение. Величина электродвижущей силы электромагнитной индукции зависит от параметров тока молнии, размера и конфигурации контура и их взаимного расположения. При расположении канала молнии и контура, как показано на (рис. 1.8), напряжение в вольтах на разомкнутых концах контура может быть определено по формуле

$$U_K = M(dI_M/d\tau) = M(I_M/\tau\phi), \quad (1.6)$$

где $M = 2c \ln[(a+b)/c] 10^{-9}$ – коэффициент взаимной индукции между

каналом молнии и контуром, Гн (a – расстояние от канала молнии до контура, см; b и c – размеры контура, см).

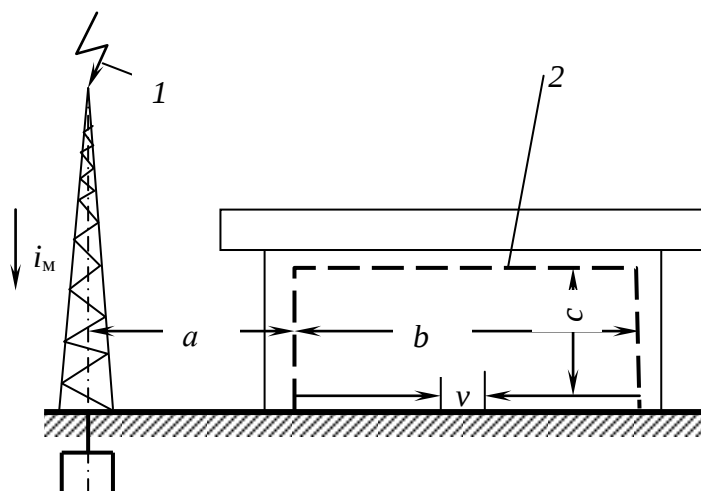


Рис. 1.8. Положение канала молнии и контура для расчета индуцированных напряжений: 1 – канал молнии; 2 – контур

Значительное число пожаров нефтяных цистерн, резервуаров и складских емкостей обусловлено вторичным (индуцированным) воздействием, а не прямым ударом молнии. Пожары являются результатом искр, генерированных в емкостях с горючими паровоздушными смесями. Для оценки пожаро- и взрывоопасности вторичных воздействий молнии были проведены исследования воспламеняющей способности электрических искр, обусловливаемых электромагнитной индукцией и нагревом мест плохих контактов [4]. Исследования проводились в полевых и лабораторных условиях.

В лабораторных условиях, используя генератор импульсных токов (ГИТ), исследовали величины энергии, рассеиваемой в искрах, возникающих в искровом промежутке вторичного контура, а также характер искрений и нагрев во фланцевых соединениях трубопроводов при протекании по ним импульсных токов.

Сравнение величин этой энергии с минимальной энергией электрических искр, достаточной для воспламенения более 50 различных паро-, газо- и пылевоздушных смесей [10], показало, что последняя в 5,6–14 раз превышает величины минимальной, достаточной для воспламенения даже трудновоспламеняемых пылевоздушных взрывоопасных смесей. Если взять только паро- и газовоздушные смеси, то превышение будет в 10^2 – 10^5 раз, причем оно должно быть еще больше, поскольку параметры разряда молнии значительно превышают те, которые имитировались в разрядах ГИТ. Необходимо учитывать и увеличенные

размеры токопроводящих контуров на промышленных объектах по сравнению с экспериментальными.

Для исследования нагрева и искрообразования во фланцевых соединениях токопроводящих контуров при протекании по ним токов молнии или тока, обусловливаемого ЭДС индукции, были проведены два вида опытов как на чистых соединениях, так и с сильной коррозией [4].

Исследованиями установлено, что ни в одном из рассмотренных случаев какого-либо нагрева фланцевого соединения не наблюдалось, поэтому напрашивается вывод, что как чистые, так и корродированные фланцевые соединения (с точки зрения возможности их нагрева) для взрывоопасных сред никакой опасности не представляют.

Исследование искрообразования проводили на тех фланцевых соединениях, при тех же параметрах разрядного тока ГИТ, что и при опытах нагрева. Опыты с чистым фланцевым соединением на трех, четырех и пяти болтах выявили отсутствие искрений при протекании по нему тока даже с амплитудой 48,2 кА. При одном или двух болтах возникает сильное искрение, как из-под шайб соединительных болтов, так и по периметру между фланцами.

Опыты с ржавыми фланцевыми соединениями показали, что в этом случае даже при четырех болтах диаметром 8 мм искрение из-под шайб наблюдается при значительно более низкой амплитуде тока (10,7 кА). При больших величинах тока искрение происходило также и между фланцами. Таким образом, корродированные фланцевые соединения (с точки зрения искрообразования) представляют большую опасность, поэтому в зданиях со взрывоопасной и одновременно химически активной средой, где надлежащий контакт с допустимой величиной переходного сопротивления (0,03 Ом) не может быть обеспечен, необходима установка перемычек из стальной проволоки или шунтирующих устройств.

Заносы высоких потенциалов в здания возможны по рельсовым путям, эстакадам, подземным трубопроводам, кабелям и другим протяженным металлическим коммуникациям и могут сопровождаться мощными электрическими разрядами не только при прямом ударе молнии, но и в том случае, когда эти коммуникации расположены вблизи элементов молниеотводов. Значительное повышение потенциала на молниеотводе при прямом ударе молнии может вызвать перекрытие изоляции по воздуху, земле или дереву на части указанных коммуникаций. Искрообразование внутри взрывоопасных зданий, обусловливаемое заносом высокого потенциала по коммуникациям, является источником взрыва и представляет серьезную опасность для людей [8].

1.3. Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты

Классификация объектов

Тяжесть опасных последствий прямого удара молнии при ее термических, механических и электрических воздействиях, а также искрениях и перекрытиях, вызванных другими видами воздействий, зависит от конструктивно-планировочных особенностей зданий и сооружений и пожаро- взрывоопасности технологического процесса. Например, в производствах, постоянно связанных с наличием открытого пламени, при применении несгораемых материалов и конструкций протекание тока молнии не представляет большой опасности. Однако наличие внутри объекта взрывоопасной или пожароопасной среды создает угрозу пожара, разрушений, человеческих жертв, больших материальных убытков.

При таком разнообразии конструктивных и технологических условий предъявлять одинаковые требования к молниезащите всех объектов означало бы или предусматривать чрезмерные излишества, или мириться с неизбежностью значительных убытков, вызванных последствиями поражения молнией. Поэтому в инструкции [2] принят дифференцированный подход к устройству молниезащиты различных объектов, отличающихся по опасности ударов молнии для самого объекта и его окружения.

Непосредственное опасное воздействие молнии – это пожары, механические повреждения, травмы людей и животных, а также повреждения электрического и электронного оборудования. Последствиями удара молнии могут быть взрывы и выделение опасных продуктов – радиоактивных и ядовитых химических веществ, а также бактерий и вирусов.

Удары молнии могут быть особо опасны для информационных систем, систем управления, контроля и электроснабжения. Для электронных устройств, установленных в объектах разного назначения, требуется специальная защита.

Рассматриваемые объекты могут подразделяться на обычные и специальные [5].

Обычные объекты – жилые и административные строения, а также здания и сооружения, высотой не более 60 м, предназначенные для промышленного производства, сельского хозяйства, торговли.

Специальные объекты:

– объекты, представляющие опасность для непосредственного окружения;

– объекты, представляющие опасность для социальной и физической окружающей среды (объекты, которые при поражении молнией могут вызвать вредные химические, биологические и радиоактивные выбросы);

– прочие объекты, для которых может предусматриваться специальная молниезащита, например, строения высотой более 60 м, временные сооружения, строящиеся объекты. В табл. 1.1 даны примеры разделения объектов на четыре класса.

Таблица 1.1

Примеры классификации объектов

Объект	Тип объекта	Последствия удара молнии
1	2	3
Обычный	Жилой дом	Отказ электроустановок, пожар и повреждение имущества. Обычно небольшое повреждение предметов, расположенных в месте удара молнии или задетых ее каналом
	Ферма	Первоначально – пожар и занос опасного напряжения, затем – потеря электропитания с риском гибели животных из-за отказа электронной системы управления вентиляцией, подачи корма и т.д.
	Театр, школа; универмаг; спортивное сооружение	Отказ электроснабжения (например, освещения), способный вызвать панику. Отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий
	Банк; страховая компания; коммерческий офис	Отказ электроснабжения (например, освещения), способный вызвать панику. Отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий. Потери средств связи, сбои компьютеров с потерей данных
	Больница; детский сад; дом для престарелых	Отказ электроснабжения (например, освещения), способный вызвать панику. Отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий. Потери средств связи, сбои компьютеров с потерей данных. Необходимость помощи тяжелобольным и неподвижным людям
	Промышленные предприятия	Дополнительные последствия, зависящие от условий производства - от незначительных повреждений до больших ущербов из-за потерь продукции

Окончание табл. 1.1

1	2	3
	Музеи и археологические памятники	Невосполнимая потеря культурных ценностей
Специальный с ограниченной опасностью	Средства связи; электростанции; пожароопасные производства	Недопустимое нарушение коммунального обслуживания (телекоммуникаций). Косвенная опасность пожара для соседних объектов
Специальный, представляющий опасность для непосредственного окружения	Нефтеперерабатывающие предприятия; заправочные станции; производства петард и фейерверков	Пожары и взрывы внутри объекта и в непосредственной близости
Специальный, опасный для экологии	Химический завод; атомная электростанция; биохимические фабрики и лаборатории	Пожар и нарушение работы оборудования с вредными последствиями для окружающей среды

При строительстве и реконструкции для каждого класса объектов требуется определить необходимые уровни надежности защиты от прямых ударов молнии (ПУМ). Надежность защиты определяется как $1 - P$, где P – допустимая вероятность прорыва молнии (или предельно допустимая вероятность P удара молнии в объект, защищаемый молниеотводами). Например, для обычных объектов может быть предложено четыре уровня надежности защиты, указанные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Уровни защиты от ПУМ для обычных объектов

Уровень защиты	Надежность защиты от ПУМ
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Для специальных объектов минимально допустимый уровень надежности защиты от ПУМ устанавливается в пределах 0,9–0,999 в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от ПУМ по согласованию с органами государственного контроля.

Обязательность устройства молниезащиты

При выборе необходимого уровня надежности защиты от прямых ударов молнии учитывают важность объекта, его высоту, расположение соседних объектов, интенсивность грозовой деятельности и другие факторы. Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним количеством грозовых часов в год $n_{\text{г}}$. Эта величина может быть получена по данным местной метеорологической станции. Кроме того, существует карта [2], на которой нанесены линии средней за год продолжительности гроз на территории России. На ней же приближенно размечены и крупные области, где наблюдается одна и та же грозовая деятельность. Диапазон ее изменения довольно велик и зависит от климатических факторов и рельефа местности. В северных областях (Мурманск, Камчатка) она составляет не более 10 ч в год, для районов на широте $50\text{--}55^\circ$ она колеблется от 20 до 30 ч, а на юге (Кавказ, Донбасс) она может достигать 100–200 ч в год. Да и в пределах одного района с низкой грозовой активностью встречаются участки с резко повышенным числом грозовых часов в год.

Иногда оценка грозовой деятельности измеряется количеством грозовых дней в году $n_{\text{д}}$. Принято считать продолжительность грозы приблизительно равной 1,5 ч, если $n_{\text{д}} = 30$ дням, и 2 ч, когда $n_{\text{д}}$ больше 30 дней. Следовательно, $n_{\text{г}} = (1,5\text{--}2) n_{\text{д}}$.

Однако более важной и информативной характеристикой для оценки возможного числа поражений объектов молнией является плотность ударов нисходящих молний на единицу земной поверхности.

Плотность ударов молнии в землю сильно колеблется по регионам земного шара и зависит от тех же факторов, что и интенсивность гроз. Особенно велико влияние рельефа в горной местности, где грозовые фронты распространяются преимущественно по узким коридорам.

Наблюдениями установлена корреляционная связь между плотностью разрядов в землю и продолжительностью гроз. Эта корреляционная зависимость распространена на всю территорию России и связывает число ударов нисходящей молнии в 1 км^2 земной поверхности с конкретной продолжительностью гроз в часах. Для произвольного пункта на территории России удельная плотность ударов молнии в землю n определяется, исходя из средней продолжительности гроз в часах, следующим образом:

Таблица 1.3

Удельная плотность ударов молнии в землю

Средняя продолжительность гроз, ч	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 и более
Удельная плотность ударов молнии в землю, $1/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, n	1				2	

Используя значения n , можно определить ожидаемое количество поражений молнией в год N :

– для зданий и сооружений прямоугольной формы

$$N = [(S + 6h_x)(L + 6h_x) - 7,7h_x^2]n10^{-6}, \quad (1.7)$$

– для сосредоточенных зданий и сооружений (дымовые трубы, вышки, башни)

$$N = 9\pi h_x^2 n 10^{-6}, \quad (1.8)$$

где h_x – наибольшая высота здания или сооружения, м; S и L – соответственно ширина и длина здания или сооружения, м; n – среднегодовое число ударов молнии в 1 км^2 земной поверхности (удельная плотность ударов молнии в землю).

Если здание имеет сложную конфигурацию, то при расчете по формуле (1.7) в качестве S и L принимается ширина и длина наименьшего прямоугольника, в который может быть вписано здание или сооружение в плане. Принято считать, что молнии попадают в здание или сооружение в пределах территории, контур которой удален от контура сооружения на три его высоты.

Оценивая по формулам (1.7) и (1.8) число поражений молнией объектов разных размеров и форм, например, можно видеть, что при средней продолжительности гроз 40–60 ч в год для здания высотой 20 м и размерами в плане 100×100 м можно ожидать не более одного поражения за 5 лет, для сосредоточенного объекта высотой 50 м можно ожидать не более одного поражения за 3–4 года.

Таким образом, при умеренных размерах зданий и сооружений (высота 20–50 м, длина и ширина примерно 100 м) поражение их молнией является редким событием.

Удельную плотность ударов молнии в землю n в месте дислокации объекта можно приближенно определить по формуле

$$n = 0,23n_{\text{д}}^{1,3}. \quad (1.9)$$

Классификация воздействий токов молнии

Для каждого уровня молниезащиты должны быть определены предельно допустимые параметры тока молнии. Данные, приведенные в нормативе [6], относятся к нисходящим и восходящим молниям. Соотношение полярностей разрядов молнии зависит от географического положения местности. В отсутствие местных данных принимают это соотношение равным 10 % для разрядов с положительными токами и 90 % для разрядов с отрицательными токами.

Механические и термические действия молнии обусловлены пиковым значением тока I , полным зарядом $Q_{\text{полн}}$, зарядом в импульсе $Q_{\text{имп}}$ и удельной энергией W/R . Наибольшие значения этих параметров наблюдаются при положительных разрядах.

Повреждения, вызванные индуцированными перенапряжениями, обусловлены крутизной фронта тока молнии. Крутизна оценивается в пределах 30 % и 90 % уровней от наибольшего значения тока. Наибольшее значение этого параметра наблюдается в последующих импульсах отрицательных разрядов.

Значения расчетных параметров для принятых в табл. 1.3 уровней защищенности (при соотношении 10 % к 90 % между долями положительных и отрицательных разрядов) приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Соответствие параметров тока молнии и уровней защиты

Параметр молнии	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Пиковое значение тока I , кА	200	150	100
Полный заряд $Q_{\text{полн}}$, Кл	300	225	150
Заряд в импульсе $Q_{\text{имп}}$, Кл	100	75	50
Удельная энергия W/R , кДж/Ом	10000	5600	2500
Средняя крутизна di/dt 30/90 %, кА/мкс	200	150	100

Кроме механических и термических воздействий ток молнии создает мощные импульсы электромагнитного излучения, которые могут быть причиной повреждения систем, включающих оборудование связи, управления, автоматики, вычислительные и информационные устройства и т.п. Эти сложные и дорогостоящие системы используются во многих отраслях производства и бизнеса. Их повреждение в результате удара молнии крайне нежелательно по соображениям безопасности, а также по экономическим соображениям.

Удар молнии может содержать либо единственный импульс тока, либо состоять из последовательности импульсов, разделенных промежутками времени, за которые протекает слабый сопровождающий ток. Параметры импульса тока первого компонента существенно отличаются от характеристик импульсов последующих компонентов. Ниже приводятся данные, характеризующие расчетные параметры импульсов тока первого и последующих импульсов (табл. 1.5 и 1.6), а также длительного тока (табл. 1.7) в паузах между импульсами для обычных объектов при различных уровнях защиты.

Таблица 1.5

Параметры первого импульса тока молнии

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I , кА	200	150	100
Длительность фронта T_1 , мкс	10	10	10
Время полуспада T_2 , мкс	350	350	350
Заряд в импульсе $Q_{\text{сум}}^*$, Кл	100	75	50
Удельная энергия в импульсе W/R^{**} , МДж/Ом	10	5,6	2,5

* Поскольку значительная часть общего заряда $Q_{\text{сум}}$ приходится на первый импульс, полагается, что общий заряд всех коротких импульсов равен приведенной величине.

** Поскольку значительная часть общей удельной энергии W/R приходится на первый импульс, полагается, что общий заряд всех коротких импульсов равен приведенной величине.

Таблица 1.6

Параметры последующего импульса тока молнии

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I , кА	50	37,5	25
Длительность фронта T_1 , мкс	0,25	0,25	0,25
Время полуспада T_2 , мкс	100	100	100
Средняя крутизна a , кА/мкс	200	150	100

Таблица 1.7

Параметры длительного тока молнии в промежутке между импульсами

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Заряд $Q_{дл}^*$, Кл	200	150	100
Длительность T , с	0,5	0,5	0,5

* $Q_{дл}$ – заряд, обусловленный длительным протеканием тока в период между двумя импульсами тока молнии.

Средний ток приблизительно равен $Q_{дл}/T$.

На всей территории России специальные объекты должны быть обязательно защищены от прямых ударов молнии, электростатической и электромагнитной индукции. В районах с очень малой интенсивностью грозовой деятельности вероятность удара в такие объекты очень мала, но материальный ущерб может быть велик, и затраты на молниезащиту в этом случае вполне оправданы.

Требования к устройствам молниезащиты

Комплекс средств молниезащиты зданий и сооружений включает в себя устройства защиты, направленных на предотвращение прямого удара молнии в объект или на устранение опасных последствий, связанных с прямым ударом (внешняя молниезащитная система – МЗС) и устройства защиты, предохраняющие объект от вторичных воздействий молнии (внутренняя МЗС). В частных случаях молниезащита может содержать только внешние или только внутренние устройства. В общем случае часть токов молнии протекает по элементам внутренней молниезащиты.

Внешняя МЗС может быть изолирована от сооружения (отдельно стоящие молниеотводы – стержневые или тросовые, а также соседние сооружения, выполняющие функции естественных молниеотводов) или может быть установлена на защищаемом сооружении и даже быть его частью.

Внутренние устройства молниезащиты предназначены для ограничения электромагнитных воздействий тока молнии и предотвращения искрений внутри защищаемого объекта [5].

Токи молнии, попадающие в молниеприемники, отводятся в заземлитель через систему токоотводов (спусков) и растекаются в земле.

Внешняя МЗС в общем случае состоит из молниеприемников, токоотводов и заземлителей. В случае специального изготовления их материал и сечения должны удовлетворять требованиям табл. 1.8.

Таблица 1.8

Материал и минимальные сечения элементов внешней МЗС

Уровень защиты	Материал	Сечение, мм ²		
		молние-приемника	токоотвода	заземлителя
I–IV	Сталь	50	50	80
I–IV	Алюминий	70	25	Не применяется
I–IV	Медь	35	16	50

Примечание. Указанные значения могут быть увеличены в зависимости от повышенной коррозии или механических воздействий.

К основным требованиям молниезащиты могут быть отнесены: соответствие уровня надежности защиты характеру производственного процесса в здании, сооружении, на всем объекте; возможность типизации конструктивных элементов молниезащиты; надежность действия всех ее элементов и «равнопрочность» их в этом отношении; большой срок службы, достигающий десятка и более лет; возможность применения недорогостоящих материалов и использования конструктивных элементов здания и сооружения; наглядность монтажа, предупредительные и воспрещающие знаки или ограждения, т.е. создание условий безопасности для персонала объекта или посторонних людей; сравнительно несложная эксплуатация и доступность ко всем элементам при контроле, восстановлении или ремонте.

Кроме того, при выполнении молниезащиты зданий и сооружений для повышения безопасности людей следует размещать заземлители (кроме углубленных) в редко посещаемых местах (на газонах, кустарниках), в удалении на 5 и более метров от основных грунтовых, проезжих и пешеходных дорог, располагать под асфальтовыми покрытиями, устанавливать предупреждающие плакаты. Токоотводы следует прокладывать в малодоступных местах, чтобы люди не могли к ним прикоснуться [7].

Для снижения опасности шаговых напряжений рекомендуется применять углубленные и рассредоточенные заземлители в виде лучей. При ширине зданий и сооружений более 100 м необходимо выполнять мероприятия по выравниванию потенциала внутри здания. При устройстве молниезащиты зданий и сооружений следует учитывать возможность экранирования их зонами защиты молниеотводов других близкорасположенных зданий и сооружений. При этом следует максимально использовать естественные молниеотводы (вытяжные трубы, водонапорные башни, дымовые трубы, линии электропередач и другие возвышающиеся сооружения).

Для нестандартных объектов, молниезащиту которых не удастся осуществить по типовым рекомендациям [2, 5, 6], должны быть определены те воздействия, которые представляют наибольшую опасность, а затем на основе технико-экономического анализа выбрать для них необходимые оптимальные меры защиты. В ряде случаев, особенно для объектов новой технологии, может оказаться решающей не стоимость устройств молниезащиты, а их совместимость с технологическими функциями объекта, поэтому иногда важно рассматривать вопросы молниезащиты не в процессе строительства объекта, а на стадии его проектирования, когда имеется возможность путем малых затрат и несущественных изменений повысить грозоупорность объекта и возложить хотя бы частично функции молниезащиты на его конструктивные элементы.

В практике проектирования и эксплуатации молниезащиты следует учитывать определенных размеров зоны взрывоопасности, так как многие здания, сооружения и наружные установки химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих и ряда других предприятий имеют устройства постоянного или периодического выброса в окружающее пространство горючих газов и паров жидкостей. Эти технологические выбросы, связанные с нормальным или аварийным режимом работы аппаратов и установок, происходят через постоянно или периодически действующие

воздушки, свечи, газоотводные трубы, по специальным аварийным стравливающим линиям, а также через дыхательные и предохранительные клапаны. Значительное количество этих выбросов производится локальными механическими и естественными вентиляционными системами зданий. На отдельных объектах химической промышленности насчитывается до нескольких сотен воздушек. Перечисленные устройства располагаются, как правило, на зданиях, наружных установках, рабочих площадках и этажерках, в виде отдельно стоящих труб-свечей высотой более 30 м.

Большие потери наблюдаются от испарения нефтепродуктов с высокой упругостью паров и сырой нефти при их хранении и при различных операциях, связанных с загрузкой и выгрузкой емкостей. При этом продукты испарения, вытесняемые из наполняемых железобетонных резервуаров через дыхательные клапаны и неплотности крыши в атмосферу, при определенных технологических режимах и метеорологических условиях создают на прилегающей территории взрывоопасные зоны значительных размеров (10-40 м). Во многих случаях горючие продукты (газы и пары) выбрасываются либо в чистом виде, особенно при аварийных стравливаниях из аппаратов, либо в смеси с воздухом в границах концентрированных пределов взрыва (при выбросе газо- и паровоздушных смесей из дыхательных труб, воздушек), поэтому около таких устройств выброса также могут создаваться зоны взрывоопасности [10].

Непосредственный контакт канала молнии или нагретых до высокой температуры частей молниезащитных устройств с этой зоной может привести к воспламенению, взрыву и разрушениям, поэтому вопросы молниезащиты зданий и наружных установок должны решаться с учетом возможных зон взрывоопасности [11,12], которые будут влиять на выбор схемы и типа молниезащитного устройства, мест их расположения, необходимого удаления и превышения зон защиты молниеотводов над устройством выброса.

Трудности, возникающие при решении вопросов молниезащиты с учетом зон взрывоопасности, объясняются, с одной стороны, весьма противоречивыми указаниями в литературных и нормативных источниках [13–21], с другой – отсутствием каких-либо исследований распределения взрывоопасных концентраций и зон. Все это приводит к усложнению и чрезмерному удорожанию молниезащитных устройств, применению недостаточно надежного и безопасного варианта молниезащиты.

1.4. Молниеотводы

Средством защиты от прямых ударов молнии служит молниеотвод – устройство, рассчитанное на непосредственный контакт с каналом молнии и отводящее ее ток в землю.

Выбор типа и высоты молниеотводов производится исходя из значений требуемой надежности P_3 . Объект считается защищенным, если совокупность всех его молниеотводов обеспечивает надежность защиты не менее P_3 .

Во всех случаях система защиты от прямых ударов молнии выбирается так, чтобы максимально использовались естественные молниеотводы, а если обеспечиваемая ими защищенность недостаточна – в комбинации со специально установленными молниеотводами.

В общем случае выбор молниеотводов должен производиться при помощи соответствующих компьютерных программ, способных вычислять зоны защиты или вероятность прорыва молнии в объект (группу объектов) любой конфигурации при произвольном расположении практически любого числа молниеотводов различных типов.

При прочих равных условиях высоту молниеотводов можно снизить, если вместо стержневых конструкций применять тросовые, особенно при их подвеске по внешнему периметру объекта.

Если защита объекта обеспечивается простейшими молниеотводами (одиночным стержневым, одиночным тросовым, двойным стержневым, двойным тросовым, замкнутым тросовым), размеры молниеотводов можно определять, пользуясь заданными в нормативе зонами защиты [5].

Конструктивное выполнение молниеотводов

Здания и сооружения от прямых ударов защищают молниеотводами, каждый из которых конструктивно состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего удар молнии, токоотвода, соединяющего молниеприемник с заземлителем, и заземлителя, через который ток молнии стекает в землю. Вертикальная конструкция (столб, мачта) или часть сооружения, предназначенная для закрепления молниеприемника и токоотвода, называется опорой молниеотвода.

Опоры стержневых и тросовых молниеотводов, как отдельно стоящих, так и устанавливаемых на защищаемом объекте, могут быть деревянными, металлическими и железобетонными (рис. 1.9).

Деревянная опора обычно состоит из основной стойки и пасынков, выполненных из дерева или железобетона (последние предпочтительнее). Деревянные части, особенно подземные, антисептируют. Высота такого молниеотвода редко превышает 25 м. В землю опора зарывается на 0,1–0,2 ее полной высоты в зависимости от грунта. Для опор используют древесину хвойной породы (сосна, лиственница, ель, пихта). Диаметр бревна в верхнем срубе должен быть не менее 100 мм.

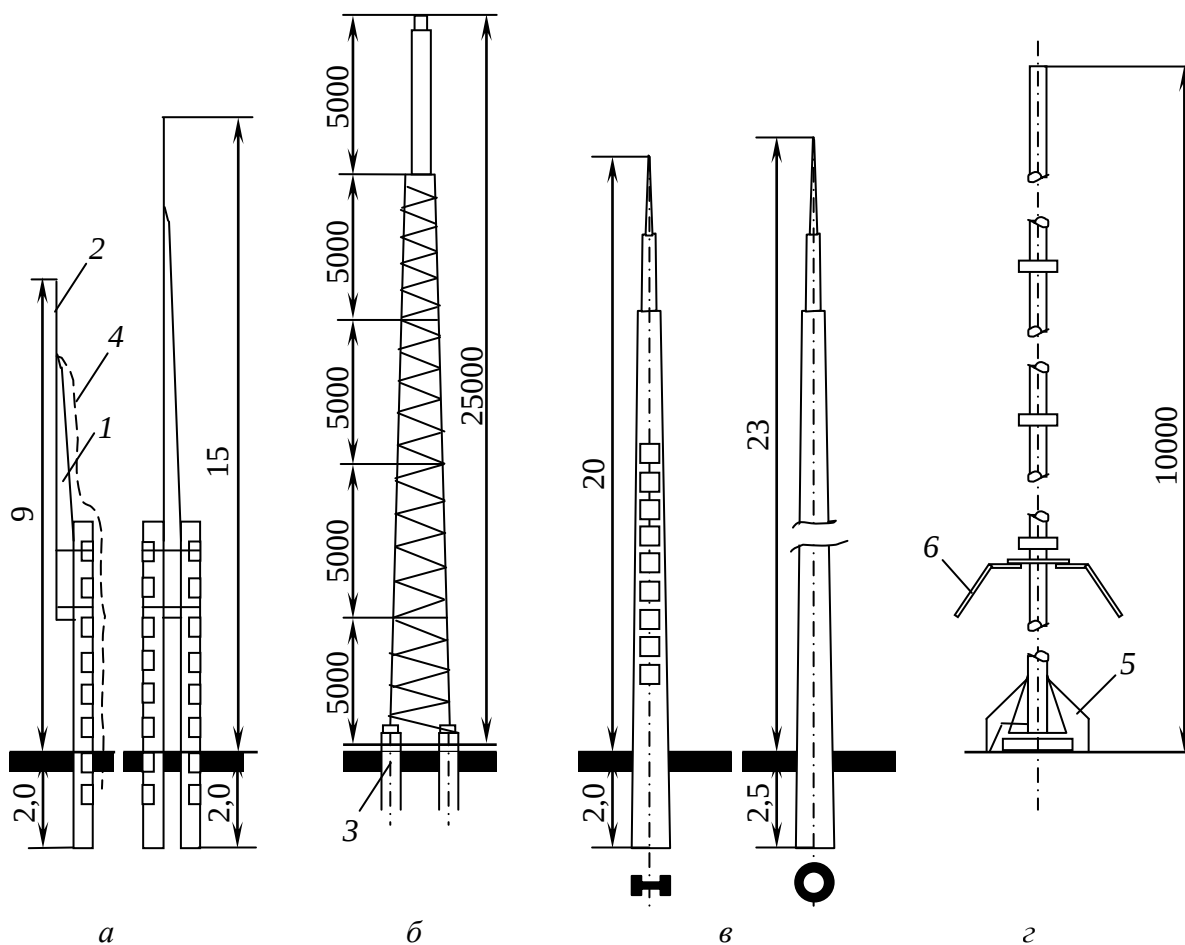


Рис. 1.9. Конструкции стержневых молниеотводов и молниеприемников:
 а – на деревянной опоре; б – металлический решетчатый типа М-25;
 в – на железобетонной опоре; г – молниеприемник из металлических труб,
 установленных на крыше; 1 – опора (стойка); 2 – молниеприемник; 3 – подножник;
 4 – токопровод (спуск); 5 – фланец; 6 – оттяжка

Опоры высотой более 8–10 м выполняют на одном или двух пасынках (рис. 1.9, а), высота которых зависит от высоты молниеотвода. Для увеличения срока службы деревянных опор рекомендуется применять железобетонные пасынки, особенно в грунтах, где процесс гниения наиболее интенсивен (в суглинках). Железобетонные пасынки изготовляют

из бетона марки не ниже М200, армированного круглой сталью марки Ст 3 или Ст 5. В поперечнике пасынки могут быть прямоугольного двутаврового, круглого и других сечений.

Металлическую опору для молниеотвода высотой 20–75 м (рис. 1.9, б) чаще всего выполняют в виде жесткой решетчатой конструкции. Ее устанавливают на четырех железобетонных подножниках, наверху к ней приваривают молниеприемник и предохраняют от коррозии регулярной окраской. Такой молниеотвод не требует специального токоотвода, так как сам хорошо проводит ток.

Железобетонные опоры могут быть различной формы (рис. 1.9, в), арматура в них частично или полностью предварительно напряженная. Бетон может быть вибрированным или центрифугированным. На вершине опоры устанавливают молниеприемник и соединяют с токоотводом, который прокладывают по опоре. В некоторых случаях молниеприемник соединяют с арматурой, используемой в качестве токоотвода. Но именно эти места оказываются нередко ненадежными, так как требуется либо вывод части арматуры наружу, либо пропуск в нее соединительных проводников. На этих участках постепенно начинается разрушение, особенно в прибрежных районах морей. Железобетонные опоры экономически более выгодны, они проще в эксплуатации и долговечны. Опоры стержневых молниеотводов должны быть рассчитаны на механическую прочность как свободно стоящие конструкции, а опоры тросовых молниеотводов – с учетом натяжения троса и действия на него ветровой и гололедной нагрузки.

Молниеотводы, устанавливаемые на сооружении, делятся на *настенные* и *кровельные*. Первые применяют чаще, их молниеприемники изготавливают из трубы или угловой стали и закрепляют посредством скоб, хомутов или кронштейнов. Молниеприемники кровельные (рис. 1.9, г) чаще всего выполняют из труб разного диаметра и снабжают фланцами для крепления к крыше при помощи болтов. Дополнительная устойчивость достигается посредством оттяжек из полосовой или угловой стали. Высота таких молниеприемников колеблется от 5 до 10 м. Опорами стержневых молниеотводов могут служить стволы деревьев, растущих вблизи защищаемых зданий и сооружений. При этом, если дерево находится на расстоянии менее 5 м от зданий и сооружений III, IV и V степени огнестойкости, то необходимо по стене защищаемого здания против ствола проложить токоотвод и присоединить под землей к заземлителю или же от молниеприемника токоотвод перебросить на другое дерево, на отдельную стойку, отстоящие от здания более чем на 5 м. Если дерево

невысокое, то на него устанавливают шест с молниеприемником, это удешевляет молниезащиту. Кроме того, деревья создают дополнительное экранирование от заряженного облака.

Для тросовых молниеотводов можно использовать те же опоры, но требуется иногда повышать их устойчивость оттяжками или подкосами. Выбор того или иного материала опор обуславливается в основном необходимой высотой молниеотводов, расчетными механическими нагрузками, а также экономическими соображениями. Следует также учитывать их сочетание с архитектурой защищаемого объекта, климатическими условиями.

Молниеприемники стержневые, тросовые и в виде сетки непосредственно воспринимают прямой удар молнии и должны выдерживать ее термическое и динамическое воздействия, быть надежными в эксплуатации.

Стержневые молниеприемники изготавливаются из покрытой антикоррозийной защитой (оцинкование, лужение, покраска) круглой и угловой стали или из некондиционных водогазопроводных труб. Конец трубы сплющивают или надежно закрывают металлической пробкой. Наименьшее сечение молниеприемника должно быть 100 мм^2 (это позволяет выдержать термические и динамические воздействия тока молнии), а длина не менее 200 мм.

Применяют молниеприемники и в виде сетки, сваренной из круглой стали диаметром 6–8 мм или полосовой стали сечением не менее 48 мм^2 , уложенных на кровлю под гидро- или теплоизоляцию (если они нескоряемые). Это не затруднит отток воды с кровли и очистку от снега.

Однако укладка сеток рациональна лишь в зданиях с горизонтальными крышами, где равновероятно поражение молнией любого их участка. При больших уклонах крыши наиболее вероятны удары молнии вблизи ее конька, и в этих участках укладка сетки по всей поверхности кровли приведет к неоправданным затратам металла. В этом случае более экономичен вариант установки стержневых или тросовых молниеприемников, в зону защиты которых входит весь объект. По этой причине укладка молниеприемной сетки рекомендуется на неметаллических кровлях с уклоном не более 1:10.

Иногда возвышающиеся элементы кровли снабжают молниеприемниками, соединенными с сеткой посредством сварки. На деревьях молниеприемником может служить выступающий конец токоотвода в виде петли на участке до 400 мм от верхней точки. Тросовый молниеприемник выполняют из стального многопроволочного и только оцинкованного троса диаметром до 7 мм (сечение не менее 35 мм^2).

Молниеприемники могут быть специально установленными, в том числе на объекте, либо их функции выполняют конструктивные элементы защищаемого объекта; в последнем случае они называются естественными молниеприемниками. В качестве таких молниеприемников можно использовать дымовые, выхлопные и другие металлические трубы объекта, дефлекторы (если они не выбрасывают горючие пары и газы), кровлю и другие металлические элементы сооружений, но при соблюдении определенных требований.

Следующие конструктивные элементы зданий и сооружений могут рассматриваться как естественные молниеприемники:

а) металлические кровли защищаемых объектов при условии, что:

- электрическая непрерывность между разными частями обеспечена на долгий срок;

- толщина металла кровли составляет не менее величины t , приведенной в табл. 1.9, если необходимо предохранить кровлю от повреждения или прожога;

- толщина металла кровли составляет не менее 0,5 мм, если ее необязательно защищать от повреждений и нет опасности воспламенения находящихся под кровлей горючих материалов;

- кровля не имеет изоляционного покрытия. При этом небольшой слой антикоррозионной краски или слой 0,5 мм асфальтового покрытия, или слой 1 мм пластикового покрытия не считается изоляцией;

- неметаллические покрытия на или под металлической кровлей не выходят за пределы защищаемого объекта;

б) металлические конструкции крыши (фермы, соединенная между собой стальная арматура);

в) металлические элементы типа водосточных труб, украшений, ограждений по краю крыши и т.п., если их сечение не меньше значений, предписанных для обычных молниеприемников;

г) технологические металлические трубы и резервуары, если они выполнены из металла толщиной не менее 2,5 мм и проплавление или прожог этого металла не приведет к опасным или недопустимым последствиям;

д) металлические трубы и резервуары, если они выполнены из металла толщиной не менее значения t , приведенного в табл. 1.9, и если повышение температуры с внутренней стороны объекта в точке удара молнии не представляет опасности.

Таблица 1.9

Толщина кровли, трубы или корпуса резервуара,
выполняющих функции естественного молниеприемника

Уровень защиты	Материал	Толщина t , мм, не менее
I-IV	Железо	4
I-IV	Медь	5
I-IV	Алюминий	7

Токоотводы молниеотводов применяют для соединения молниеприемников с заземлителями из стали любого профиля. Их рассчитывают на пропускание полного тока молнии без нарушений и существенного перегрева.

В целях снижения вероятности возникновения опасного искрения токоотводы должны располагаться таким образом, чтобы между точкой поражения и землей:

- а) ток растекался по нескольким параллельным путям;
- б) длина этих путей была ограничена до минимума.

При расположении токоотводов в устройствах молниезащиты, изолированных от защищаемого объекта необходимо соблюдать условия:

- если молниеприемник состоит из стержней, установленных на отдельно стоящих опорах (или одной опоре), на каждую опору должен быть предусмотрен минимум один токоотвод;

- если молниеприемник состоит из отдельно стоящих горизонтальных проводов (тросов) или из одного провода (троса), на каждый конец троса требуется минимум по одному токоотводу;

- если молниеприемник представляет собой сетчатую конструкцию, подвешенную над защищаемым объектом, на каждую ее опору требуется не менее одного токоотвода. Общее количество токоотводов должно быть не менее двух.

При неизолированных устройствах молниезащиты токоотводы располагаются по периметру защищаемого объекта таким образом, чтобы среднее расстояние между ними было не меньше значений, приведенных в табл. 1.10. Токоотводы соединяются также горизонтальными поясами вблизи поверхности земли и через каждые 20 м по высоте здания.

Таблица 1.10

Средние расстояния между токоотводами
в зависимости от уровня защищенности

Уровень защиты	Среднее расстояние, м
I	10
II	15
III	20
IV	25

Размещать токоотводы желательно так, чтобы они равномерно располагались по периметру защищаемого объекта, по возможности вблизи углов зданий.

Не изолированные от защищаемого объекта токоотводы прокладываются следующим образом:

- если стена выполнена из негорючего материала, токоотводы могут быть закреплены на поверхности стены или проходить в стене;

- если стена выполнена из горючего материала, токоотводы могут быть закреплены непосредственно на поверхности стены, так чтобы повышение температуры при протекании тока молнии не представляло опасности для материала стены;

- если стена выполнена из горючего материала и повышение температуры токоотводов представляет для него опасность, токоотводы должны располагаться таким образом, чтобы расстояние между ними и защищаемым объектом всегда превышало 0,1 м. Металлические скобы для крепления токоотводов могут быть в контакте со стеной.

Не следует прокладывать токоотводы в водосточных трубах. Рекомендуются размещать токоотводы на максимально возможных расстояниях от дверей и окон.

Токоотводы прокладываются по прямым и вертикальным линиям, так чтобы путь до земли был по возможности кратчайшим. Не рекомендуется прокладка токоотводов в виде петель.

Токоотводы должны быть оцинкованы, пролужены или окрашены для предупреждения коррозии. Не рекомендуется применять многопроволочный стальной трос, если у него не оцинкована каждая нить. Наименьшее сечение токоотводов, выполненных из угловой и полосовой стали и расположенных вне сооружения на воздухе, равно 48 мм^2 , для расположенных внутри – 24 мм^2 , а круглые токоотводы должны иметь наименьший диаметр 6 мм. Токоотводами могут служить арматура

железобетонных конструкций, направляющие лифтов, пожарные лестницы, водопроводные, водосточные и канализационные трубы, колонны, стенки резервуаров, электрически надежно связанные по всей длине.

Соединения токоотводов, специальных и естественных, должны быть сварными (внахлест). Количество их необходимо резко ограничить. С заземлителями токоотводы соединяют только сваркой, и площадь контакта во всех случаях не менее двух площадей сечения деталей, а длина – около шести диаметров проволоки или двойной ширины полосы или полки уголка. Если токоотводы присоединяют к отдельным заземлителям и они электрически связаны друг с другом, то на высоте около 1,5 м от поверхности земли устанавливают надежный болтовой зажим, позволяющий отсоединить токоотвод для контроля заземлителя. Токоотводы от молниеприемников прокладывают кратчайшим путем к заземлителю. От входов в здания их нужно располагать на таком расстоянии, чтобы с ними не могли соприкасаться люди. Необходимо избегать острых углов и тем более петель в токоотводе, так как значительные электродинамические усилия при больших токах молнии могут разорвать его на этих участках или вызвать искровое перекрытие между ближайшими точками петли. Металлическая кровля, коробка и трубы могут быть соединены с токоотводами болтовыми зажимами (рис. 1.10).

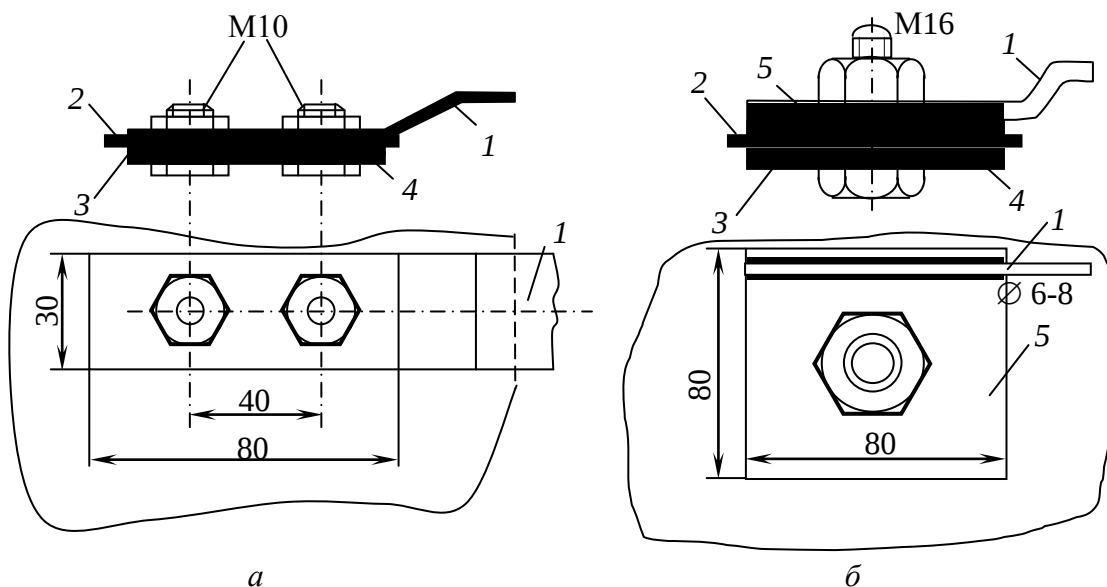


Рис. 1.10. Зажим для присоединения плоского (а) и круглого (б) токоотводов к металлической кровле: 1 – токоотвод; 2 – кровля; 3 – свинцовая прокладка; 4 – стальная пластина; 5 – пластина с приваренным токоотводом

Заземляющие устройства являются важнейшим элементом в комплексе средств обеспечения защиты объектов от прямого удара молнии и электростатической индукции. Основной частью их являются собственно заземлители, находящиеся в достаточно хорошо проводящей среде.

Заземлитель молниезащиты – один или несколько заглубленных в землю проводников, предназначенных для отвода в землю токов молнии или ограничения перенапряжений, возникающих на металлических корпусах, коммуникациях при близких разрядах молнии. Они бывают *одиночными* (простыми) или сложными (комбинированными). К первым относятся трубы, электроды из круглой, полосовой, угловой и листовой стали, железобетонные подножки и сваи, а сложные образуются из комбинаций простых. Одиночные делятся на сосредоточенные и протяженные. У первых потенциал практически по длине не изменяется, у вторых потенциалы начала и конца отличаются друг от друга вследствие большой длины электродов, малого их сечения, высокого удельного сопротивления материалов или высокой удельной проводимости грунта.

Еще различают *искусственные* и *естественные* заземлители.

Искусственные заземлители – специально проложенные в земле контуры из полосовой или круглой стали, сосредоточенные конструкции, состоящие из вертикальных и горизонтальных проводников.

Естественные заземлители – заглубленные в землю металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений.

Заземлители могут быть *поверхностными* и *углубленными*. Последние обычно изготавливают из круглой или полосовой стали и укладывают в глубокие котлованы или траншеи, чаще всего по периметру фундамента, если последний не может быть использован в качестве естественного заземлителя. Наконец, существуют *вертикальные* заземлители (обычно стержни из круглой или угловой стали и трубы, железобетонные подножки и сваи, забиваемые в землю, реже – стальные круглые стержни, ввинченные в грунт) и *горизонтальные*, изготовленные из любой профильной стали, закапываемые неглубоко в грунт.

Вертикальные заземлители более эффективны, так как большая их часть располагается во влажных и менее промерзающих слоях почвы. Их длину берут от 2 до 5 м и применяют в глинистых или смешанных грунтах с удельным сопротивлением ρ менее 300 Ом·м и при сравнительно высоком уровне грунтовых вод. Если же верхние слои почвы обладают высоким ρ и этот уровень низок, то длину электродов увеличивают до 4–6 м. Наиболее употребительны и удобны заземлители из круглой стали диаметром 12–30 мм, угловой с шириной полок 40–50 мм, толщиной

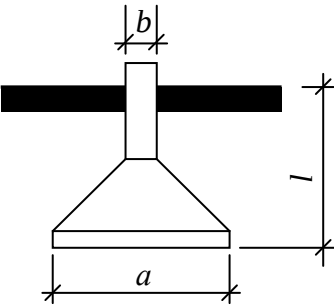
не менее 4 мм и трубы (чаще всего некондиционные или непригодные к дальнейшему использованию по назначению) с наружным диаметром 25–60 мм и толщиной стенки не менее 3,5 мм. Верхний конец вертикальных заземлителей располагают от поверхности земли на 0,5–1 м. На этом уровне высыхание или промерзание грунта затруднено.

Горизонтальные заземлители используют в грунтах с длительно влажными верхними слоями, где трудно забивать вертикальные электроды (гористая местность, районы вечной мерзлоты). Если грунт обладает плохой проводимостью (песок), то траншею для горизонтальных заземлителей заполняют другим грунтом, удобренным солями или их растворами. Для электродов берут преимущественно полосовую сталь сечением не менее 160 мм^2 ($40 \times 4 \text{ мм}$) и реже круглую сталь эквивалентного сечения. Электроды укладывают на глубину 0,6–0,8 м в виде одного или нескольких симметричных лучей, длина каждого из них, считая от токоотвода, обычно не превышает 25–30 м. Чем больше удельное сопротивление грунта, тем больше длина луча и их число. Электроды любого типа соединяют между собой и с токоотводами только сваркой.

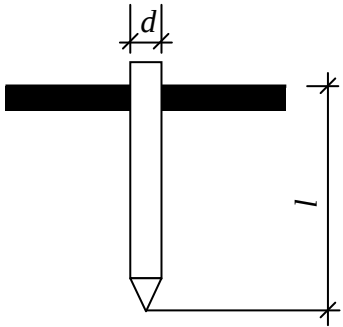
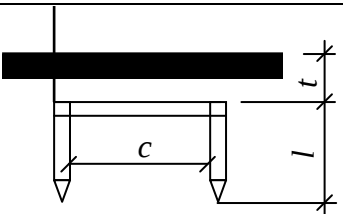
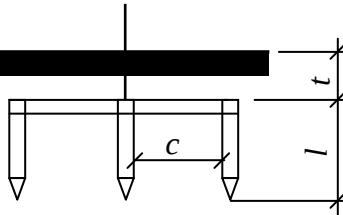
Конструкция заземлителя зависит от типа молниеотвода, т.е. отдельно стоящего или установленного на здании.

При отдельно стоящих молниеотводах приемлемыми, без расчета их импульсного сопротивления растеканию тока молнии $r_{\text{и}}$, являются типовые конструкции заземлителей, приведенные в табл. 1.11.

Таблица 1.11

№ п/п	Заземлитель	Эскиз	Размеры, м
1	2	3	4
1	Железобетонный подножник		$a \geq 1,8$ $b \geq 0,4$ $l \geq 2,2$

Продолжение табл.1.11

1	2	3	4
2	Железобетонная свая		$d = 0,25 \div 0,4$ $l \geq 5$
3	Стальной двухстержневой: полоса размером 40×4 мм стержни диаметром $d = 10 \div 20$ мм		$t \geq 0,5$ $l = 3 \div 5$ $c = 3 \div 5$
4	Стальной трехстержневой: полоса размером 40×4 мм стержни диаметром $d = 10 \div 20$ мм		$t \geq 0,5$ $l = 3 \div 5$ $c = 5 \div 6$

При расположении молниеотвода на защищаемом здании в качестве заземлителей рекомендуется широко использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений.

Устройство молниезащиты зданий в железобетонном исполнении включает молниеприемную сетку, соединяемую сваркой с арматурой всех колонн. Ток молнии через нее попадает на арматуру колонн, затем стекает на арматуру фундамента и через защитный слой бетона – в землю.

Основанием для использования арматуры железобетонных фундаментов в качестве заземлителей являются свойства бетона во влажном состоянии иметь проводимость, сопоставимую с проводимостью грунта, окружающего фундамент. При этом выполняются условия сохранения несущей способности здания и исключаются условия разрушения арматурных стержней и бетона от электрической коррозии, что обеспечивается уменьшением плотности тока, стекающего с арматуры фундамента, и ограничением его стекания через бетон в надземных

конструкциях. Указанные меры включают объединение в единую систему всех железобетонных (или металлических) конструкций, соединение с помощью сварки всех элементов арматурного каркаса и создание непрерывной электрической цепи по арматуре.

Битумные и битумно-латексные покрытия фундаментов не являются препятствием для использования их в качестве заземлителей.

В средне- и сильноагрессивных грунтах, где защита железобетона от коррозии выполняется эпоксидными и другими полимерными покрытиями, а также при влажности грунта менее 3 % использовать железобетонные фундаменты в качестве заземлителей не допускается.

При использовании в качестве заземляющих устройств все элементы металлических и железобетонных конструкций (фундаменты, колонны, фермы, стропильные, подстропильные и подкрановые балки) должны образовывать непрерывную электрическую цепь по металлу, а в железобетонных элементах (колоннах) дополнительно должны предусматриваться закладные детали (изделия) для присоединения электротехнического и технологического оборудования.

В качестве заземлителей молниезащиты допускается использовать все рекомендуемые ПУЭ [7] заземлители электроустановок, за исключением нулевых проводов воздушных линий электропередачи напряжением до 1 кВ.

Нормирование заземлителей молниезащиты. Принятый в инструкции [2] подход к нормированию и выбору заземлителей молниезащиты зданий и сооружений учитывает, что одним из эффективных способов ограничения грозовых перенапряжений в цепи молниеотвода, а также на металлических конструкциях и оборудовании объекта является обеспечение низких сопротивлений заземлителей растеканию в земле токов молнии. Поэтому при выборе молниезащиты нормированию подлежит сопротивление заземлителя или другие его характеристики, связанные с его сопротивлением.

До введения в нормативную практику [2] для заземлителей молниезащиты нормировалось импульсное $r_{\text{и}}$ сопротивление растеканию токов молнии: его максимально допустимое значение было принято равным 10 Ом для зданий и сооружений I и II категорий и 20 Ом для зданий и сооружений III категории. При этом допускалось увеличение импульсного сопротивления до 40 Ом в грунтах с удельным сопротивлением более 500 Ом·м при одновременном удалении молниеотводов от объектов I категории на расстояние, гарантирующее от пробоя по воздуху и в земле. Для наружных установок максимально допустимое импульсное сопротивление было принято не более 50 Ом.

Импульсное сопротивление заземлителя является количественной характеристикой сложных физических процессов при растекании в земле токов молнии. Его значение отличается от сопротивления заземлителя при растекании токов промышленной частоты и зависит от нескольких параметров тока молнии (амплитуда, крутизна, длина фронта), варьирующихся в широких пределах. С увеличением тока молнии импульсное сопротивление заземлителя падает, причем в возможном интервале распределение токов молнии (от единиц до сотен килоампер) его значение может уменьшаться в 2–5 раз.

Поскольку при проектировании заземлителя нельзя предсказать значения токов молнии, которые будут через него растекаться, то, следовательно, невозможно оценить наперед соответствующие значения импульсных сопротивлений. С учетом этих условий нормирование заземлителей по их импульсному сопротивлению имеет очевидные неудобства. Разумнее выбирать конкретные конструкции (табл. 1.11) по следующему условию: импульсные сопротивления заземлителей во всем возможном диапазоне токов молнии не должны превышать указанных максимально допустимых значений.

Такое нормирование было принято в инструкции [2], где для ряда типовых конструкций заземлителей (табл. 1.11) были подсчитаны импульсные сопротивления при колебаниях токов молнии от 5 до 100 кА и по результатам расчетов проведен отбор заземлителей, удовлетворяющих принятому условию.

Наиболее распространенными и рекомендуемыми конструкциями заземлителей являются железобетонные фундаменты. К ним предъявляются дополнительные требования – исключение механических разрушений бетона при растекании через фундамент токов молнии. Исследования показали, что железобетонные конструкции выдерживают большие плотности растекающихся по арматуре токов молнии, что связано с кратковременностью этого растекания. Так, единичные железобетонные фундаменты (сваи длиной не менее 5 м или подножки длиной не менее 2 м) способные без разрушения выдерживать токи молнии до 100 кА. Поэтому в табл. 1.11 заданы допустимые размеры единичных железобетонных заземлителей. Для фундаментов больших размеров с соответственно большей поверхностью арматуры опасная для разрушения бетона плотность тока маловероятна при любых возможных токах молнии.

Нормирование параметров заземлителей по их типовым конструкциям имеет ряд достоинств: оно соответствует принятой в строительной практике унификации железобетонных фундаментов с учетом их повсеместного использования в качестве естественных заземлителей;

при выборе молниезащиты не требуется выполнять расчеты импульсных сопротивлений заземлителей, что сокращает затраты и объем проектных работ.

Опасность поражения током молнии. При растекании тока с заземлителя или с любого другого подземного металлического предмета в грунте образуется потенциальное (электрическое) поле. Распределение потенциала на поверхности земли при протекании тока молнии через трубчатый заземлитель показано на (рис. 1.11). Оно зависит от геометрических размеров электрода, способа его установки, но не зависит от электрических свойств однородного грунта. На небольших удалениях от оси трубы потенциал уменьшается резко, после чего уменьшение делается более плавным. Считают, что на расстоянии x более 20 l потенциал на поверхности земли равен нулю. Наибольший потенциал появляется на самом заземлителе и он равен

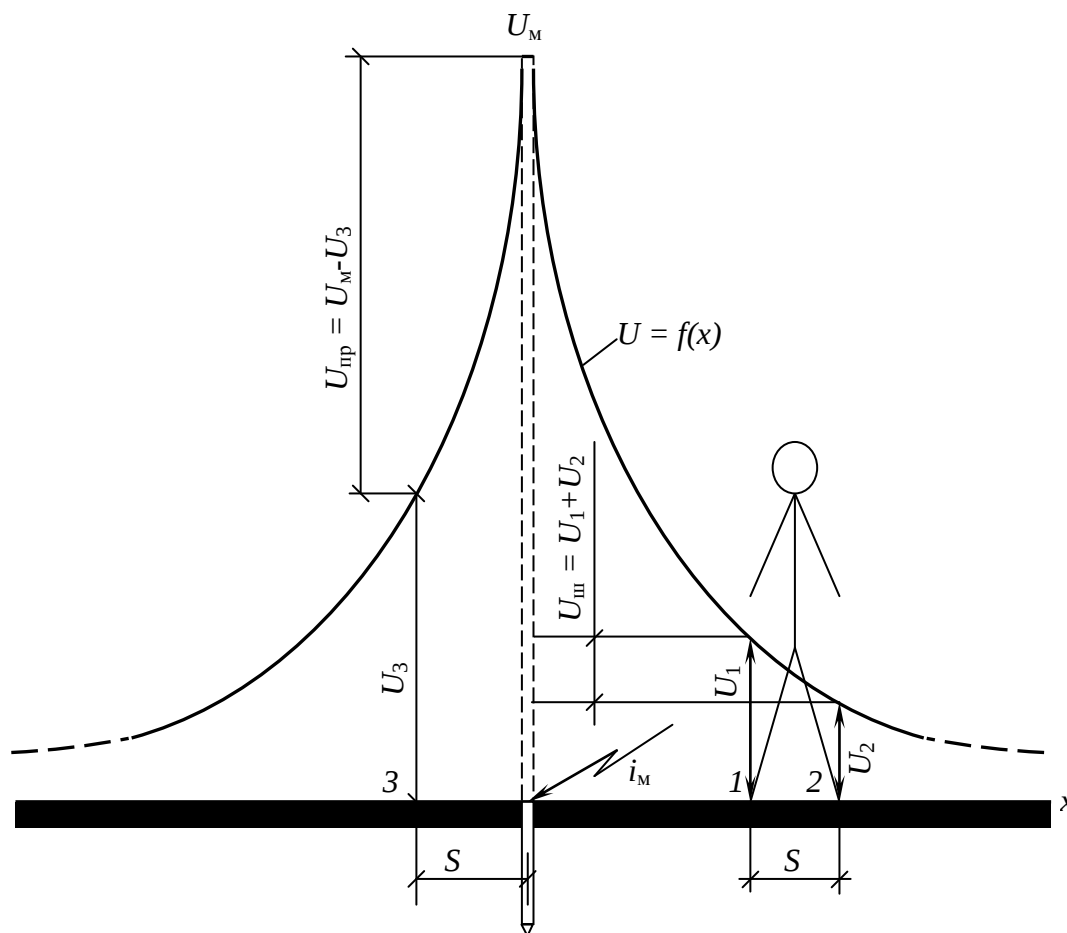


Рис. 1.11. Изменение потенциала на поверхности земли у заземлителя при растекании тока молнии

Если вблизи заземлителя будет находиться человек и расстояние между его ступнями равно S , то он подвергается действию шагового напряжения $U_{\text{ш}}$, равного разности потенциалов U_1 и U_2 в точках 1 и 2, где

находятся ступни. Это может быть опасным для жизни. Еще более опасно, если одна нога окажется непосредственно на заземлителе или человек прикоснется к заземлителю. Тогда он подвергается большей разности потенциалов, равной $U_M - U_3$, и называемой напряжением прикосновения $U_{пр}$.

Снижения шагового напряжения и напряжения прикосновения можно добиться уменьшением сопротивления $r_{и}$ до значения ниже 10 Ом, что довольно трудно, и применением параллельно включенных добавочных электродов, выравнивающих потенциал внутри и вне контура заземлителей. Рациональным распределением вертикальных заземлителей, расположенных по контуру или лучам, и связывающих их горизонтальных электродов можно добиться безопасного распределения потенциала по любому направлению от точки присоединения токоотвода. Для безопасности рекомендуется ограждать или во время грозы не допускать людей к заземлителям ближе 5 м, располагать эти заземлители дальше от дорог, тротуаров или располагать под асфальтовым покрытием.

Зоны защиты молниеотводов

Защитное действие молниеотводов основано на свойстве молнии поражать наиболее высокие и хорошо заземленные металлические сооружения. Во время лидерной стадии разряда на вершине молниеотвода скапливаются заряды, создающие на ней очень большие напряженности электрического поля, куда и направляется разряд. Развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженность поля в направлении лидера молнии и окончательно предопределяет ее удар в молниеотвод.

Защитное действие молниеотвода характеризуется вероятностью прорыва молнии. Под этой вероятностью понимают отношение числа разрядов молнии в защищаемой объект к общему числу разрядов в систему молниеотвод-объект. При анализе поражения молниями различных сооружений [3] было установлено, что вероятность прорыва молнии к объекту снижается по мере сокращения расстояний между молниеотводом и объектом. Однако определение вероятности прорыва для каждого конкретного сооружения — задача достаточно сложная, поэтому в проектной практике широко пользуются зонами защиты молниеотводов.

Под зоной защиты понимают пространство в окрестности молниеотвода, характеризующееся тем, что вероятность прорыва молнии к любому объекту внутри зоны не превышает некоторой достаточно малой величины. Конфигурация и размеры зон защиты получены на основе модельных экспериментов и расчетов [3] и было предложено три типа зон

защиты для специальных объектов, исходя из значений требуемой надежности P_z : 0,9; 0,99; 0,999 [5]. Степень надежности защиты объекта в любом случае возрастает, когда объект удастся расположить в глубине зоны защиты молниеотводов.

По типу молниеприемников молниеотводы делятся на *стержневые*, *тросовые* и *сеточные*; по количеству и общей зоне защиты – на *одиночные*, *двойные* и *многократные*. Кроме того, различают молниеотводы отдельно стоящие, изолированные и не изолированные от защищаемого здания. Чаще используют стержневые молниеотводы. Ниже дается методика построения и расчета зон защиты для молниеотводов высотой до 150 м [5], которые преимущественно поражаются нисходящими молниями.

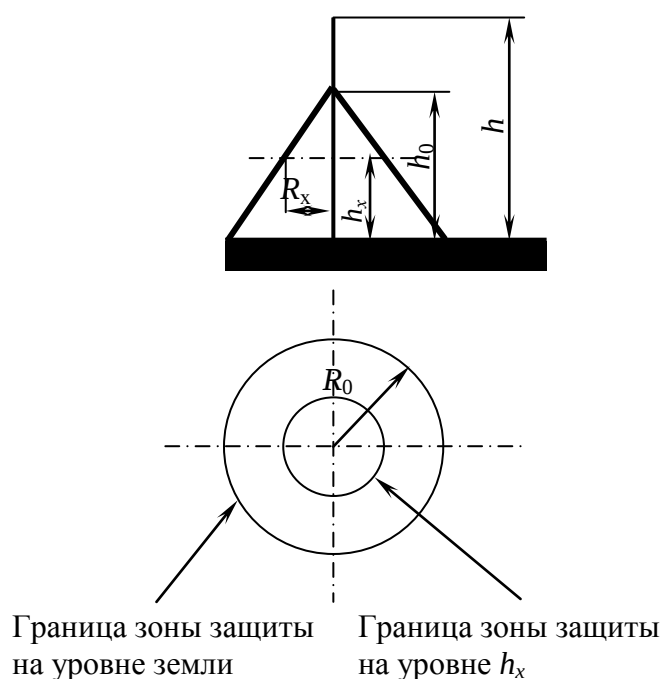


Рис. 1.12. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

При одиночном стержневом молниеотводе зона защиты (при $h \leq 150$ м) представляет собой конус (рис. 1.12). Вершина конуса находится на высоте $h_0 < h$. На уровне земли зона защиты образует круг радиусом R_0 . Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защитного уровня сооружения h_x представляет собой круг радиусом R_x .

Для зоны защиты требуемой надежности (рис. 1.12) радиус горизонтального сечения R_x на высоте h_x определяется по формуле:

$$R_x = R_0(h_0 - h_x)/h_0 \quad (1.10)$$

Таблица 1.12

Расчет зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надеж- ность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса R_0 , м
0,9	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$[1,2-10^{-3}(h-100)]h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,8-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,8-10^{-3}(h-100)]h$	$0,7h$
0,999	От 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	От 30 до 100	$[0,7-7,14 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$	$[0,6-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,65-10^{-3}(h-100)]h$	$[0,5-2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

Двойной стержневой молниеотвод (рис. 1.14). Молниеотвод считается двойным, когда расстояние между стержневыми молниеприемниками L не превышает предельной величины $L_{\max}$. В противном случае оба молниеотвода рассматриваются как одиночные.

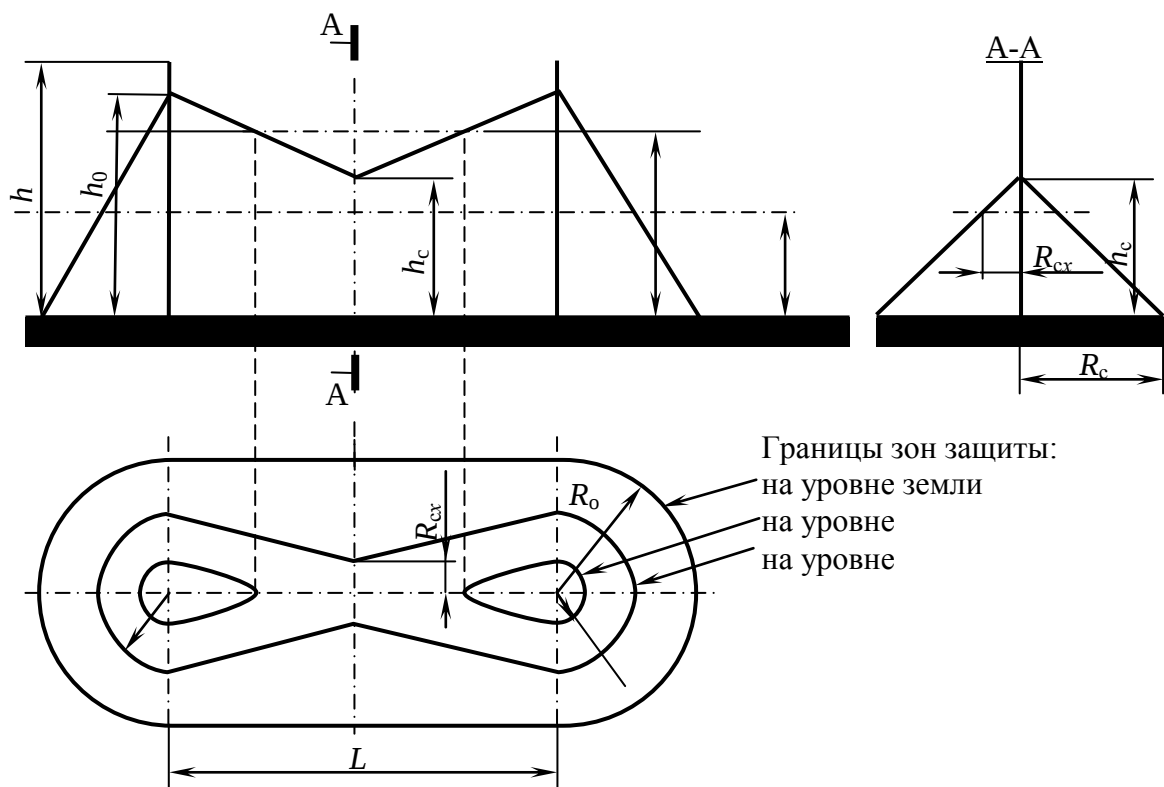


Рис. 1.14. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного стержневого молниеотвода (высотой h и расстоянием L между молниеотводами) представлена на рис. 1.14. Построение внешних областей зон двойного молниеотвода (полуконусов с габаритами h_0, R_0) производится по формулам табл. 1.12 для одиночных стержневых молниеотводов. Размеры внутренних областей определяются параметрами h_0 и h_c , первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у молниеотводов, а второй – минимальную высоту зоны посередине между молниеотводами. При расстоянии между молниеотводами $L \leq L_c$ граница зоны не имеет провеса ($h_c = h_0$). Для расстояний $L_c \leq L \leq L_{\max}$ высота h_c определяется по выражению

$$h_c = [(L_{\max} - L)/(L_{\max} - L_c)] \cdot h_0. \quad (1.11)$$

Входящие в него предельные расстояния $L_{\max}$ и L_c вычисляются по эмпирическим формулам табл. 1.13, пригодным для молниеотводов высотой до 150 м. При большей высоте молниеотводов следует пользоваться специальным программным обеспечением.

Размеры горизонтальных сечений зоны вычисляются по следующим формулам, общим для всех уровней надежности защиты:

– максимальная полуширина зоны R_x в горизонтальном сечении на высоте h_x :

$$R_x = R_0(h_0 - h_x)/h_0, \quad (1.12)$$

– длина горизонтального сечения L_x на высоте $h_x \geq h_c$:

$$L_x = L_c(h_0 - h_x)/[2(h_0 - h_c)], \quad (1.13)$$

причем при $h_x < h_c$ $L_c = L/2$.

– ширина горизонтального сечения в центре между молниеотводами $2R_{xc}$ на высоте $h_x \leq h_c$:

$$R_{xc} = R_{cx}(h_c - h_x)/h_c. \quad (1.14)$$

Таблица 1.13

Расчет параметров зоны защиты двойного стержневого молниеотвода

Надежность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	$L_{\max}$, м	L_0 , м
0,9	От 0 до 30	$5,75h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$[5,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5h$
	От 100 до 150	$5,5h$	$2,5h$
0,99	От 0 до 30	$4,75h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-0,01007(h-30)]h$
	От 100 до 150	$4,5h$	$1,5h$
0,999	От 0 до 30	$4,25h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,25-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-0,01007(h-30)]h$
	От 100 до 150	$4,0h$	$1,5h$

Многократный стержневой молниеотвод. Зона защиты многократного стержневого молниеотвода определяется как зона защиты попарно взятых соседних стержневых молниеотводов (рис. 1.15). Основным условием защищенности одного сооружения или группы сооружений высотой h_x с требуемой надежностью P_z является неравенство $R_{cx} \geq 0$ для всех попарно взятых молниеотводов. В противном случае построение зон защиты должно быть выполнено для одиночных или двойных стержневых молниеотводов в зависимости от соотношений L и h . Величину R_{cx} определяют по формуле (1.14).

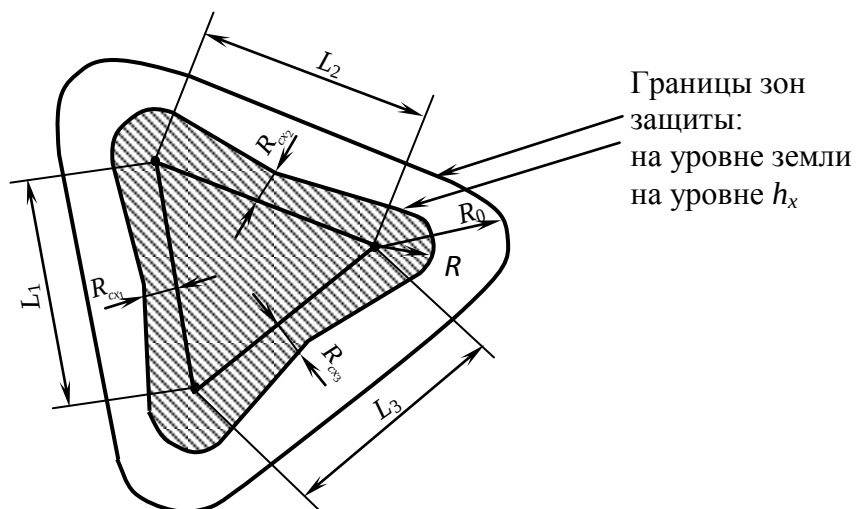


Рис. 1.15. Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода

Одиночный тросовый молниеотвод (рис. 1.16). Здесь h – высота троса в точке наибольшего провеса. С учетом стрелы провеса троса сечением $35\text{--}50\text{ мм}^2$ при известной высоте опор $h_{\text{оп}}$ и длине пролета $\alpha < 120$ м высота троса $h = h_{\text{оп}} - 2$ м, а при $\alpha = 120\text{--}150$ м $h = h_{\text{оп}} - 3$ м.

Полуширина R_x зоны защиты требуемой надежности (рис. 1.16) на высоте h_x от поверхности земли определяется выражением:

$$R_x = R_0(h_0 - h_x)/h_0. \quad (1.15)$$

При необходимости расширить защищаемый объем к торцам зоны защиты собственно тросового молниеотвода могут добавляться зоны защиты несущих опор, которые рассчитываются по формулам одиночных стержневых молниеотводов, представленным в табл. 1.12. В случае больших провесов тросов, например, у воздушных линий электропередачи, рекомендуется рассчитывать обеспечиваемую вероятность прорыва молнии программными методами, поскольку построение зон защиты по минимальной высоте троса в пролете может привести к неоправданным затратам.

Конфигурацию и размеры зоны защиты требуемой надежности одиночных тросовых молниеотводов определяют по формулам, представленным в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Расчет зоны защиты одиночного тросового молниеотвода

Надежность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса R_0 , м
0,9	От 0 до 150	$0,87h$	$1,5h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,95h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,95-7,14 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$0,8h$	$[0,9-10^{-3}(h-100)]h$
0,999	От 0 до 30	$0,75h$	$0,7h$
	От 30 до 100	$[0,75-4,28 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$	$[0,7-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,72-10^{-3}(h-100)]h$	$[0,6-10^{-3}(h-100)]h$

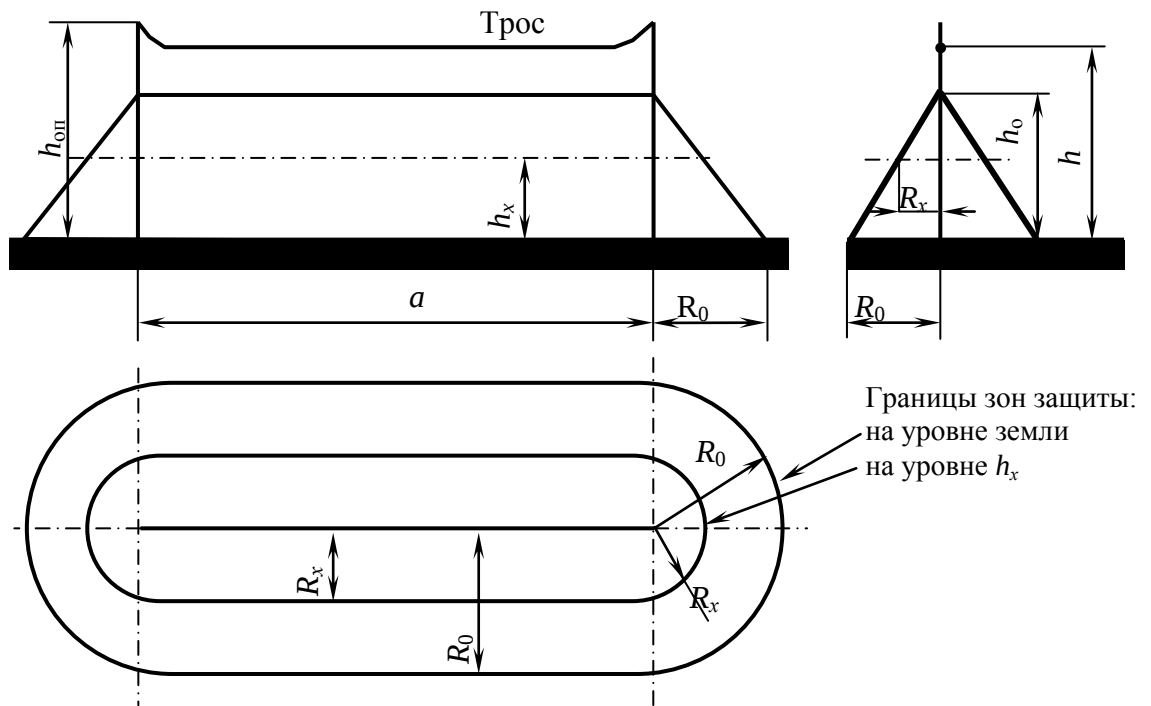


Рис. 1.16. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

Двойной тросовый молниеотвод (рис. 1.17). Молниеотвод считается двойным, когда расстояние между тросами L не превышает предельной величины $L_{\max}$. В противном случае оба молниеотвода рассматриваются как одиночные.

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного тросового молниеотвода (высотой h и расстоянием между тросами L) представлена на рис. 1.17. Построение внешних областей зон (двух односкатных поверхностей с габаритами h_0 , R_0) производится по формулам табл. 1.14 для одиночных тросовых молниеотводов.

Размеры внутренних областей определяются параметрами h_0 и h_c , первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у тросов, а второй - минимальную высоту зоны посередине между тросами. При расстоянии между тросами $L \leq L_c$ граница зоны не имеет провеса ($h_c = h_0$). Для расстояний $L_c \leq L \leq L_{\max}$ высота h_c определяется по выражению

$$h_c = [(L_{\max} - L)/(L_{\max} - L_c)]h_0. \quad (1.16)$$

Входящие в него предельные расстояния $L_{\max}$ и L_c вычисляются по эмпирическим формулам табл. 1.15, пригодным для тросов с высотой подвеса до 150 м. При большей высоте молниеотводов следует пользоваться специальным программным обеспечением.

Длина горизонтального сечения зоны защиты на высоте h_x определяется по формулам:

$$l_x = L/2, \quad \text{при} \quad h_c \geq h_x$$

$$l_x = L(h_0 - h_x)/(h_0 - h_c) \quad \text{при} \quad 0 < h_c < h_x. \quad (1.17)$$

Для расширения защищаемого объема на зону двойного тросового молниеотвода может быть наложена зона защиты опор, несущих тросы, которая строится как зона двойного стержневого молниеотвода, если расстояние L между опорами меньше $L_{\max}$, вычисленного по формулам табл. 1.13. В противном случае опоры должны рассматриваться как одиночные стержневые молниеотводы.

Когда тросы непараллельны или разновысоки, либо их высота изменяется по длине пролета, для оценки надежности их защиты следует воспользоваться специальным программным обеспечением. Также рекомендуется поступать при больших провесах тросов в пролете, чтобы избежать излишних запасов по надежности защиты.

Таблица 1.15

Расчет параметров зоны защиты двойного тросового молниеотвода

Надежность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	$L_{\max}$, м	L_c , м
0,9	От 0 до 150	$6,0h$	$3,0h$
0,99	От 0 до 30	$5,0h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$5,0h$	$[2,5-7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[5,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$
0,999	От 0 до 30	$4,75h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[4,5-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

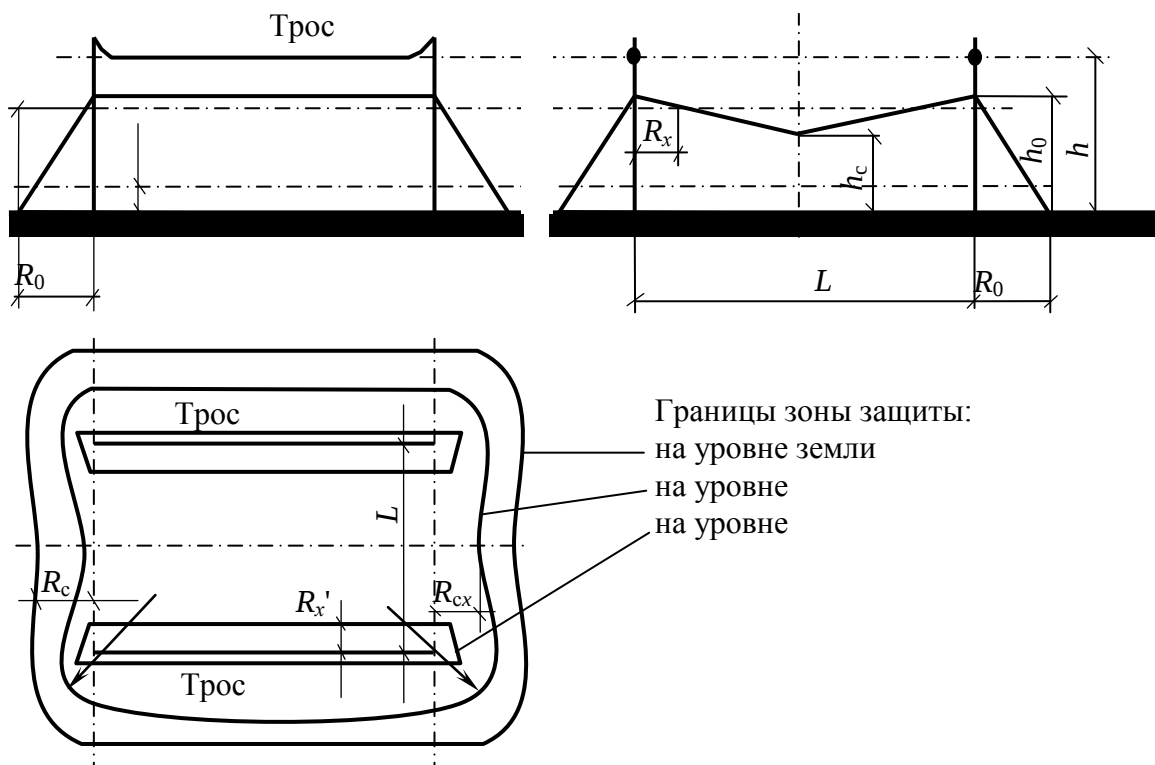


Рис. 1.17. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

На сегодняшний день объем фактических данных о поражаемости нисходящими молниями объектов большой высоты (более 150 м) очень мал и в большей своей части относится к Останкинской телевизионной башне. На основании фоторегистраций поражаемости нисходящими молниями башни утверждается [2], что нисходящие молнии прорываются более чем на 200 м ниже ее вершины и поражают землю на расстоянии около 200 м от основания башни. Рассматривая Останкинскую телевизионную башню как стержневой молниеотвод, можно сделать вывод, что относительные размеры зон защиты молниеотводов высотой более 150 м резко сокращаются с увеличением высоты молниеотвода.

1.5. Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии (ПУМ)

Защита специальных объектов

Защиту от прямых ударов молнии выполняют отдельно стоящими стержневыми (рис. 1.18) или тросовыми молниеотводами (рис. 1.19). Тем самым резко снижаются перенапряжения между элементами здания и вероятность искрения. Для специальных объектов минимально

допустимый уровень надежности защиты от ПУМ устанавливается в пределах 0,9–0,999 (в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от ПУМ по согласованию с органами государственного контроля). При ударе молнии в молниеотвод высокий потенциал приобретает все его части. Возникающие при этом разности потенциалов могут оказаться достаточными для пробоя изоляции между токоотводом и частями здания или пробоя в земле между заземлителем молниеотвода и подземными металлическими коммуникациями, связанными со зданием.

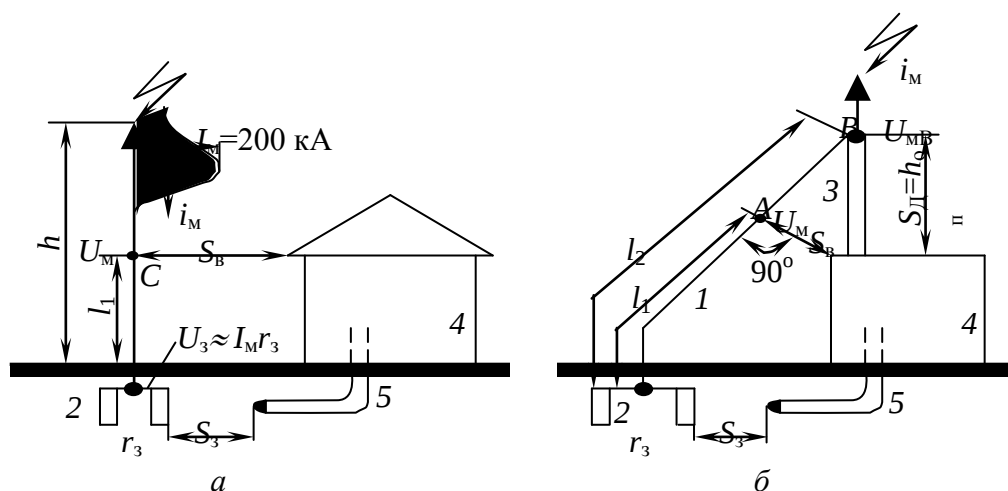


Рис. 1.18. Расчетная схема определения безопасных расстояний от отдельно стоящего стержневого молниеотвода до сооружения:
а – отдельно стоящий стержневой молниеотвод; *б* – изолированный молниеотвод на здании; 1 – токоотвод; 2 – заземлитель; 3 – опора изолированного молниеотвода; 4 – специальный объект; 5 – металлическая коммуникация

В связи с этим одним из основных элементов расчета молниезащиты здания, относящегося к специальным объектам, является определение минимально допустимых расстояний от молниеотвода до защищаемого здания. Они определяются по воздуху или земле на основании расчета потенциалов в тех точках, где может произойти наиболее вероятное перекрытие на здание. Согласно рис. 1.18 и 1.19, такими точками могут быть С, А и В. Потенциал этих точек зависит от величины амплитуды и крутизны тока, индуктивного или волнового сопротивления токоотвода, от длины участков l_A и l_B и от сопротивления заземлителя r_3 поскольку оно включено последовательно с этими участками.

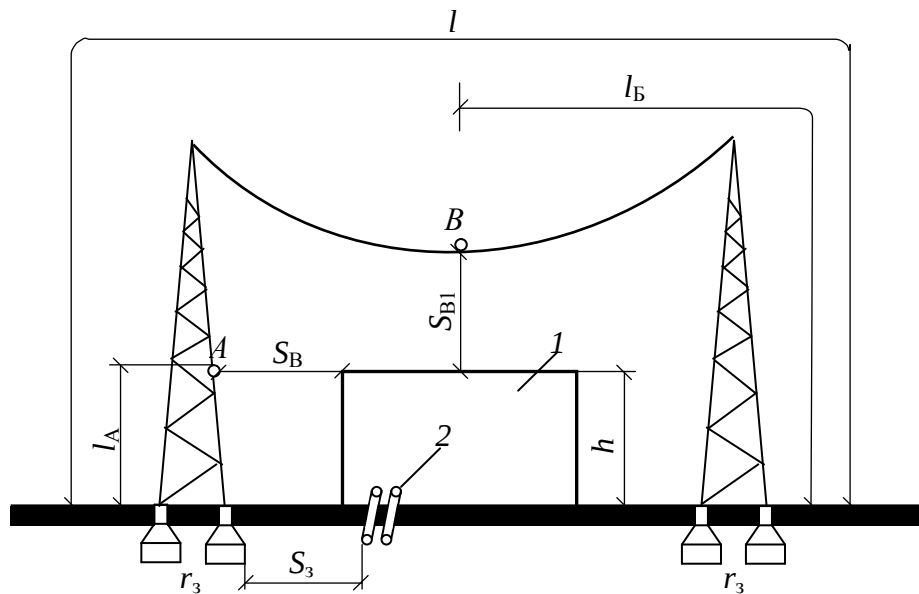


Рис. 1.19. Расчетная схема для определения безопасных расстояний от отдельно стоящего тросового молниеотвода до сооружения:
1 – защищаемый объект; 2 – металлические коммуникации

Выбор заземлителя защиты от прямых ударов молнии (естественного или искусственного) определяется общими требованиями, изложенными выше. При этом для отдельно стоящих молниеотводов приемлемыми являются варианты, приведенные в табл. 1.11 с учетом следующих уточнений:

- а) один (и более) железобетонный подножник длиной не менее 2 м или одна (и более) железобетонная свая длиной не менее 5 м;
- б) одна (и более) заглубленная в землю не менее чем на 5 м стойка железобетонной опоры диаметром не менее 0,25 м;
- в) железобетонный фундамент произвольной формы с площадью поверхности контакта с землей не менее 10 м^2 ;
- г) искусственный заземлитель, состоящий из трех и более вертикальных электродов длиной не менее 3 м, объединенных горизонтальным электродом, при расстоянии между вертикальными электродами не менее 5 м. Минимальные сечения (диаметры) электродов принимаются: круглые вертикальные диаметром не менее 10 мм; прямоугольные не менее 160 мм^2 , при толщине не менее 4 мм.

Наименьшее допустимое расстояние S_B по воздуху от защищаемого объекта до опоры (токоотвода) стержневого или тросового молниеотвода (см. рис. 1.18 и 1.19) определяется в зависимости от высоты здания, конструкции заземлителя и эквивалентного удельного сопротивления грунта.

Для зданий и сооружений высотой не более 30 м наименьшее допустимое расстояние S_B , м, определяется по табл. 1.16.

Таблица 1.16

S_B , м (рис. 1.18 и 1.19)	ρ , Ом·м	Вариант конструкции заземлителя
3	$\rho \leq 100$	1. Заземлитель любой конструкции (см. пп. а-г)
$3 + 10^{-2}(\rho - 100)$	$100 < \rho \leq 1000$	2. Одна железобетонная свая либо подножник или углубленная стойка железобетонной опоры, длины которых указаны в пп. а, б
4		3. Четыре железобетонные сваи или подножники, расположенные в углах прямоугольника на расстоянии 3-8 м один от другого, или железобетонный фундамент произвольной формы с площадью поверхности контакта с землей не менее 70 м^2 , или искусственный заземлитель, указанный в п. г

Для зданий и сооружений большей высоты определенное по табл. 1.16 S_B должно быть увеличено на 1 м в расчете на каждые 10 м высоты объекта сверх 30 м.

Наименьшее допустимое расстояние S_{B1} от защищаемого объекта до троса в середине пролета (рис. 1.19) определяется в зависимости от конструкции заземлителя, эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ и суммарной длины l молниеприемников и токоотводов.

При длине $l < 200$ м наименьшее допустимое расстояние S_{B1} определяется по табл. 1.17.

Таблица 1.17

S_{B1} , м (рис. 1.19)	ρ , Ом·м	Вариант конструкции заземлителя
3,5	$\rho \leq 100$	Заземлитель любой конструкции (см. пп. а-г)
$3,5 + 3 \cdot 10^{-3}(\rho - 100)$	$100 < \rho \leq 1000$	Заземлитель по варианту 2 (табл. 1.1)
4		Заземлитель по варианту 3 (табл. 1.1)

При суммарной длине молниеприемников и токоотводов $l = 200-300$ м наименьшее допустимое расстояние S_{B1} должно быть увеличено на 2 м по сравнению с определенными по табл. 1.17.

Для исключения заноса высокого потенциала в защищаемое здание или сооружение по подземным металлическим коммуникациям любого назначения заземлители защиты от прямых ударов молнии должны быть удалены от этих коммуникаций на максимальные расстояния, допустимые по технологическим требованиям.

Наименьшие допустимые расстояния S_3 (рис. 1.18 и 1.19) в земле должны составлять $S_3 = S_B + 2(\text{м})$, при S_B по табл. 1.17.

Зоны взрывоопасности. Для зданий и сооружений, имеющих газоотводные трубы, свечи или вентиляционные устройства, через которые происходит выброс взрывоопасных смесей горючих газов и паров в атмосферу, молниеотводы надо располагать так, чтобы контакт молнии с молниеприемником происходил вне пределов взрывоопасной зоны, которая должна вписываться в зону защиты молниеотвода. Необходимость выполнения этого требования тем более очевидна, если газоотводные или дыхательные трубы не имеют огнепреградителей. Размеры зон взрывоопасности, полученные исследованиями [4] и по инструкции [2], приведены в табл. 1.18

Таблица 1.18

Избыточное давление внутри установки, кПа	Плотность газа	Зоны взрывоопасности от обреза трубы, ограниченные цилиндром высотой H и радиусом R , м
Не более 5,05 (0,05 ат.)	Тяжелее воздуха	$H = 1 \text{ м}, R = 2 \text{ м}$
От 5,05 до 25,25 (0,05-0,25 ат.)	То же	$H = 2,5 \text{ м}, R = 5 \text{ м}$
Не более 25,25	Легче воздуха	$H = 2,5 \text{ м}, R = 5 \text{ м}$
Свыше 25,25	Любая	$H = 5 \text{ м}, R = 5 \text{ м}$

В табл. 1.18 зоны взрывоопасности от обреза трубы приведены при наличии конических колпаков, или «гусаков», над газоотводными или дыхательными трубами. Для газоотводных и дыхательных труб, не оборудованных коническими колпаками, зоной взрывоопасности является пространство над их обрезом, ограниченное полушарием радиусом 5 м. Оно должно входить в зону защиты молниеотвода. Размеры зоны взрывоопасности установлены независимо от избыточного давления взрывоопасной установки и наличия огнепреградителей на газоотводных трубах.

Молниезащита с учетом зон взрывоопасности не обязательна: для труб аварийного выброса горючих газов; труб с постоянно горящими факелами, поджигаемыми в момент выброса газов; при выбросе газов невзрывоопасной концентрации или при азотном дыхании технологических аппаратов; для вентиляционных шахт, предохранительных и аварийных клапанов, выброс газов взрывоопасной концентрации из которых осуществляется только в аварийных случаях.

Защита обычных объектов от ПУМ

Защиту от прямых ударов молнии зданий и сооружений с металлической кровлей выполняют отдельно стоящими или установленными на зданиях неизолированными стержневыми, либо тросовыми молниеотводами, обеспечивающими надежность защиты 0,8-0,98. От каждого стержневого молниеприемника или от каждой стойки тросового молниеотвода на здании прокладывают два токоотвода. При использовании сосредоточенных заземлителей они должны быть проложены по противоположным сторонам зданий.

При уклоне кровли не более $1/8$ может быть использована также молниеприемная сетка.

Молниеприемная сетка должна быть выполнена из стальной проволоки диаметром не менее 6 мм и уложена на кровлю сверху или под несгораемые или трудносгораемые утеплитель или гидроизоляцию. Шаг ячеек сетки должен быть не более 6×6 м. Узлы сетки соединяются сваркой. Выступающие над крышей металлические элементы (трубы, шахты, вентиляционные устройства) необходимо присоединять к молниеприемной сетке, а выступающие неметаллические элементы – оборудовать дополнительными молниеприемниками, присоединяемыми к молниеприемной сетке.

На зданиях и сооружениях с металлической кровлей в качестве молниеприемника необходимо использовать металлическую кровлю. При этом все выступающие неметаллические элементы необходимо оборудовать молниеприемниками, присоединяемые к металлу кровли.

Установка молниеприемников или наложение молниеприемной сетки не требуется для зданий и сооружений, имеющих металлические фермы, при условии, что в их кровлях используются несгораемые или трудносгораемые утеплители и гидроизоляция. Металлические фермы необходимо соединить токоотводами с заземлителями.

Токоотводы, соединяющие молниеприемную сетку или металлическую кровлю с заземлителями, прокладываются не реже чем через 25 м по периметру здания. Токоотводы, прокладываемые по наружным стенам зданий, следует располагать не ближе чем на 3 м от входа или в местах, недоступных для прикосновения к ним людей.

При использовании молниеприемной сетки и установке молниеприемников на защищаемом объекте, всюду, где возможно, в качестве токоотводов следует использовать металлические конструкции зданий и сооружений (колонны, фермы, рамы, металлические направляющие лифтов и т.п., а также арматуру железобетонных конструкций) при условии обеспечения непрерывной электрической связи в соединениях конструкций и арматуры с молниеприемниками и заземлителями, выполняемых, как правило, сваркой.

В качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии следует использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений. При невозможности такого варианта предусматриваются искусственные заземлители:

- при наличии стержневых и тросовых молниеотводов каждый токоотвод присоединяют к заземлителю;

- при наличии молниеприемной сетки или металлической кровли по периметру здания или сооружения прокладывается наружный контур следующей конструкции:

- в грунтах с эквивалентным удельным сопротивлением $\rho \leq 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при площади здания более 250 м^2 выполняется контур из горизонтальных электродов, уложенных в земле на глубине не менее 0,5 м, а при площади здания менее 250 м^2 к этому контуру в местах присоединения токоотводов приваривается по одному вертикальному или горизонтальному лучевому электроду длиной 2-3 м;

- в грунтах с $500 < \rho \leq 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при площади здания более 900 м^2 достаточно выполнить контур только из горизонтальных электродов, а при площади здания менее 900 м^2 к этому контуру в местах присоединения токоотводов приваривается не менее двух вертикальных или горизонтальных лучевых электродов длиной 2–3 м на расстоянии 3–5 м один от другого.

В зданиях большой площади (шириной более 100 м) наружный контур заземления может использоваться и для выравнивания потенциала внутри здания.

Во всех возможных случаях заземлитель защиты от прямых ударов молнии необходимо объединять с заземлителями электроустановок.

При установке отдельно стоящих молниеотводов расстояние от них по воздуху и в земле до защищаемого объекта и вводимых в него подземных коммуникаций не нормируется.

Для зданий и сооружений, имеющих газоотводные трубы и свечи, молниезащита проектируется с учетом зон взрывоопасности, как и для специальных объектов.

Защита взрывоопасных наружных технологических установок и открытых складов

Защита указанных в заголовке сооружений от прямых ударов молнии определяется рядом условий и специфических особенностей: материалом корпуса (металл, железобетон или синтетика); наличием дыхательной и предохранительной аппаратуры и возможностью выделения через нее (или неплотности крыши) горючих паров и газов и образования зон взрывоопасности; наличием большого количества горючих и легко-воспламеняющихся жидкостей или горючих газов и т.д. [2]. Так, для защиты от прямых ударов молнии металлических установок или отдельных резервуаров при толщине металла крыши 4 мм и более и отсутствии дыхательных клапанов, а также отдельных резервуаров объемом меньше 200 м³ (независимо от толщины металла) достаточно заземлить корпус.

Технологические установки и резервуары при толщине металла крыши 4 мм защищают отдельно стоящими или устанавливаемыми на них молниеотводами. Установки, корпуса которых выполнены из железобетона или синтетических материалов, защищают любым молниеотводом или укладывают на крышу молниеприемную сетку, присоединяя ее к заземлителю. Она допускается только при полной герметичности крыши.

Парк резервуаров со сжиженными газами при общем объеме более 8 тыс. м³, а также парки резервуаров из любого материала с общим объемом более 100 тыс. м³ защищают от прямых ударов молнии, как правило, отдельно стоящими молниеотводами. При защите металлических резервуаров отдельно стоящими молниеотводами корпуса резервуаров присоединяют к заземлителям; к этим же заземлителям допускается присоединение токоотводов отдельно стоящих молниеотводов. Парки подземных железобетонных резервуаров, не облицованных внутри металлом, защищают только отдельно стоящими молниеотводами. В зону защиты молниеотводов должны входить: вся площадь крыши резервуаров и часть площади круга с радиусом 40 м от стенок крайних резервуаров.

Высота молниеотводов должна быть равна высоте дыхательной аппаратуры плюс 2,5 м.

Парки подземных железобетонных резервуаров, содержащих мазут, при подмешивании к нему легких углеводородов и при подогреве должны защищаться от прямых ударов молнии также, как и подземные железобетонные резервуары с ЛВЖ, однако в зону защиты необходимо включать пространство с основанием, совпадающим с размерами резервуаров. Если на наружных технологических установках или резервуарах имеются газоотводные трубы, дыхательные или предохранительные клапаны, то они и зоны взрывоопасности около них также должны входить в зону защиты молниеотводов.

Исследованиями установлено, что размеры взрывоопасных зон для наземных вертикальных резервуаров со стационарными крышами и емкостью от 3 до 20 тыс. м³ зависят в основном от мощности выброса паров и газов и скорости ветра. Эти зоны можно определить по графику (рис. 1.21). На нем размеры взрывоопасных зон X_M соответствуют скорости ветра 1 м/с. При увеличении скорости ветра до 2 м/с размеры взрывоопасных зон можно уменьшить в 2 раза. При пользовании графиком следует иметь в виду: нулевой размер зоны означает, что вся площадь крыши резервуара является взрывоопасной зоной; размеры взрывоопасных зон для резервуаров, заполняемых сырой нефтью, могут быть уменьшены на 10 % по сравнению с зонами соответствующих бензинов.

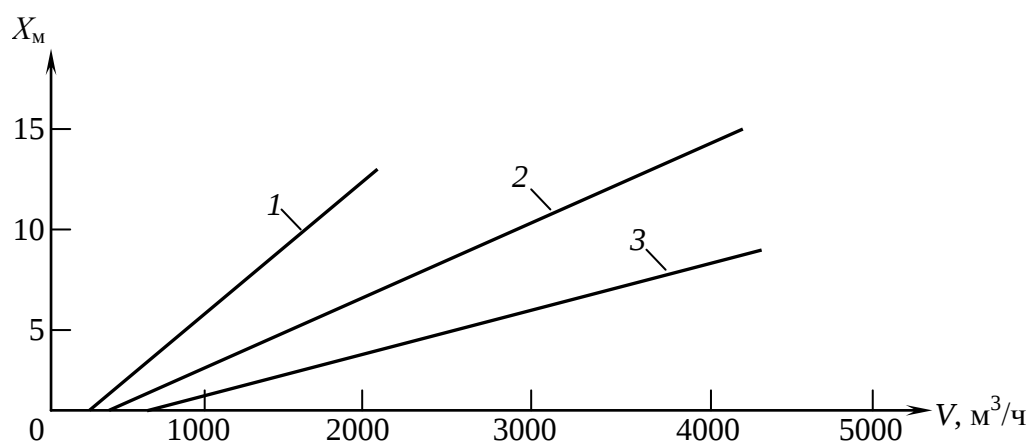


Рис. 1.21. Размеры взрывоопасных зон для вертикальных резервуаров:
 1 – нестабильные бензины (для них V – мощность выбросов паров и газов);
 2 – стабильные бензины при $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – стабильные бензины при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 (для стабильных бензинов V – производительность закачки)

Такое же пространство защищается над срезом горловины цистерн, в которые происходит открытый (негерметизированный) налив продукта на сливной эстакаде. Защите от прямых ударов молнии подлежат также дыхательные клапаны и пространство над ними, ограниченное цилиндром высотой 2,5 м с радиусом 5 м.

Для резервуаров с плавающими крышами или понтонами в зону защиты молниеотводов должно входить пространство, ограниченное поверхностью, любая точка которой отстоит на 5 м от легковоспламеняющейся жидкости в кольцевом зазоре.

Очистные сооружения защищают от прямых ударов молнии в том случае, когда температура вспышки содержащегося в сточных водах продукта превышает его рабочую температуру менее чем на 10 °С. В зону защиты молниеотводов должно входить пространство, основание которого выходит за пределы очистного сооружения на 5 м в каждую сторону от его стенок, а высота равна высоте сооружения плюс 3 м.

Для всех наружных взрывоопасных установок в качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии следует, по возможности, использовать их железобетонные фундаменты или опоры отдельно стоящих молниеотводов, либо выполнять искусственные заземлители, состоящие из одного вертикального или горизонтального электрода длиной не менее 5 м. К этим заземлителям должны присоединяться корпуса наружных установок или токоотводы установленных на них молниеприемников.

Число присоединений и соответственно количество заземлителей зависит от периметра основания установки. Необходимо, чтобы присоединения располагались не более чем в 50 м друг от друга, но число присоединений должно быть не менее двух.

1.6. Защита зданий и сооружений от вторичных воздействий молнии

Защите от вторичных воздействий молнии (электростатической и электромагнитной индукции) подлежат здания и сооружения обычных и специальных объектов. Она почти всегда сочетается с защитой от статического электричества.

Защита специальных объектов от электростатической индукции выполняется присоединением металлических корпусов всего оборудования и металлических конструкций здания к защитному заземлителю электроустановок, железобетонному фундаменту или специальному заземлителю.

Для защиты от искрения, обусловленного электромагнитной индукцией, все трубопроводы и другие протяженные металлические предметы здания и оборудования на участке их взаимного сближения на 10 см и меньше необходимо электрически соединять перемычками через каждые 20 м. Для кабелей с металлическими оболочками или броней перемычки должны выполняться из гибкого медного проводника в соответствии с указаниями [22]. Необходимо также обеспечить переходное сопротивление каждого электрического контакта не более 0,03 Ом во всех местах соединений трубопроводов (например, на фланцах) и других протяженных предметов. Если переходное сопротивление более 0,03 Ом, то на соединении устраивается перемычка.

Защита от опасности заноса высокого потенциала по линиям электропередачи напряжением до 1000 В сетей телефона, радио, сигнализации и др. обеспечивается тем, что ввод воздушных линий в здания должен осуществляться только кабелями длиной не менее 50 м с металлической броней или оболочкой или кабелями, проложенными в металлических трубах. На вводе в здание металлические трубы, броня и оболочки кабелей, в том числе с изоляционным покрытием металлической оболочки (например, ААШв, ААШп), должны быть присоединены к железобетонному фундаменту здания или к искусственному заземлителю.

В месте перехода воздушной линии в кабельную вставку металлические оболочки и броня кабеля, а также штыри или крючья изоляторов должны присоединяться к заземлителю. В этом же месте между каждой жилой кабеля и заземленными элементами должны быть устроены закрытые воздушные искровые промежутки с межэлектродным расстоянием 2–3 мм или установлен низковольтный разрядник. У следующей ближайшей опоры воздушной линии – также заземлитель и к нему должны быть присоединены штыри и крючья изоляторов.

Для защиты от заносов высоких потенциалов по подземным металлическим коммуникациям (трубопроводы, кабели в наружных металлических оболочках и трубах) при вводе в здание или сооружение эти коммуникации присоединяют к арматуре их железобетонных фундаментов, к заземлителю электроустановок или специальному заземлителю. В здание допускается вводить трубопроводы и кабели, монтируемые на эстакадах. У ввода в здание и на двух ближайших к этому вводу опорах эстакады трубопроводы и металлические оболочки кабелей присоединяют к заземлителям. В качестве заземлителей следует использовать железобетонные фундаменты здания и каждой из опор, а при невозможности – искусственные заземлители.

Защита обычных объектов от электростатической индукции обеспечивается присоединением металлических корпусов всего оборудования к защитному заземлению электроустановок или железобетонному фундаменту здания. Плавающие крыши (понтон) резервуаров независимо от материала крыш и корпусов резервуаров соединяют гибкими металлическими перемычками с токоотводами или металлическим корпусом не менее чем в двух точках. Защита от электромагнитной индукции выполняется как и в зданиях специальных объектов, но перемычки устанавливаются через 30 м в местах опасного сближения. Перемычки в местах соединений (на фланцах) трубопроводов и других протяжных конструкций не требуются.

Ввод воздушных линий любого назначения непосредственно в здание не допускается. Необходимо прокладывать кабельную вставку от воздушных линий, как и для специальных объектов. Для защиты от заноса высоких потенциалов по подземным коммуникациям при вводе в здание или сооружение их необходимо присоединить к любому из заземлителей. Эстакадные трубопроводы на вводе в здание следует подключать к заземлителю электроустановок или заземлителю молниеотвода, а на ближайшей к вводу опоре эстакады – к ее железобетонному фундаменту.

При невозможности использования фундамента должен быть установлен искусственный заземлитель, состоящий из одного вертикального или горизонтального электрода длиной не менее 5 м.

1.7. Эксплуатация устройств молниезащиты

Испытания и приемка в эксплуатацию устройств молниезащиты

Устройства молниезащиты должны быть заложены в проект и график строительства или реконструкции здания или сооружения таким образом, чтобы выполнение молниезащиты происходило одновременно с основными строительными-монтажными работами.

Устройства молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии, электростатической и электромагнитной индукции и заноса высоких потенциалов должны быть испытаны и введены в эксплуатацию к началу отделочных работ, а при наличии взрывоопасных зон – до начала комплексного опробования технологического оборудования. При этом оформляется и передается заказчику скорректированная при строительстве и монтаже проектная документация по устройству молниезащиты

(чертежи и пояснительная записка) и акты приемки устройств молниезащиты, в том числе акты по выполнению малодоступных элементов (молниеприемников, их креплений на сооружении), акты на скрытые работы по присоединению заземлителей к токоотводам и токоотводов к молниеприемникам, за исключением случаев использования стального каркаса здания в качестве токоотводов и молниеприемников, а также результаты замеров сопротивлений току промышленной частоты заземлителей отдельно стоящих молниеотводов.

Приемка в эксплуатацию устройств молниезащиты производится комиссией в составе представителей заказчика, генподрядной и монтажной организаций, представителя местных органов Ростехнадзора (для объектов, поднадзорных Ростехнадзору), представителя органов Госпожнадзора и др.. Вся техническая документация по окончании приемки устройств молниезащиты передается организации, ведущей ее эксплуатацию. В акте приемки-сдачи следует указывать гарантийный срок работы устройств молниезащиты.

Контроль состояния и обслуживание устройств молниезащиты

Эффективность действия устройств молниезащиты в значительной степени зависит от исправного технического состояния всех элементов.

Контроль за состоянием устройств молниезащиты и проведение ремонта и технического обслуживания должны проводиться по системе планово-предупредительных ремонтов и осмотров.

Для обеспечения постоянной надежности работы устройств молниезащиты ежегодно перед началом грозового сезона производится проверка и осмотр всех устройств молниезащиты.

Проверки проводятся также после установки системы молниезащиты, после внесения каких-либо изменений в систему молниезащиты, после любых повреждений защищаемого объекта. Каждая проверка проводится в соответствии с рабочей программой. Цель ревизии следующая:

- проверить надежность электрической связи между токоведущими элементами (в местах сварки, в болтовых и прочих соединениях);
- выявить элементы в защитных устройствах, требующие замены или усиления из-за механических повреждений;
- определить степень разрушения коррозией отдельных элементов молниезащиты, принять меры по антикоррозийной защите и усилению элементов, поврежденных коррозией;
- проверить соответствие устройств молниезащиты категории здания или установки;

– измерить сопротивление всех заземлителей отдельно стоящих молниеотводов.

При превышении сопротивления заземлителя более чем в 5 раз, по сравнению с результатами соответствующих замеров на стадии приемки, следует проводить полную ревизию заземлителя.

На основании ревизий определяют объем предупредительного ремонта устройств молниезащиты, который должен быть закончен к началу грозового сезона (март – для южных и апрель – для центральных районов РФ). Мелкие текущие ремонты молниезащитных устройств могут быть произведены во время грозового сезона, капитальные – в негрозовое время года.

Недостаточно квалифицированный надзор за состоянием и соответствием молниезащиты требованиям пожарной безопасности приводит к тому, что строительно-монтажные и технологические изменения на объекте повышают степень его пожаровзрывоопасности, а молниезащита остается без изменений.

Высококвалифицированный надзор за молниезащитными устройствами может быть достигнут на таких объектах, на которых в составе электроцеха создана специальная группа или бригада, занимающаяся вопросами эксплуатации молниезащитных устройств и устройств по защите от статического электричества. Главный энергетик (или начальник электроцеха) должен разработать инструкцию по эксплуатации указанных устройств, учитывающую все конкретные особенности объекта. Лица, проводящие ревизию молниезащиты, должны составлять акт осмотра и проверки с указанием обнаруженных дефектов. Результаты ревизий молниезащитных устройств по защите от разрядов статического электричества, проверочных испытаний заземляющих устройств, ремонтов и т.д. заносятся в паспорта и журнал учета состояния устройств молниезащиты, а также в эксплуатационный журнал произвольной формы.

После каждой грозы следует тщательно осмотреть все устройства молниезащиты в целях выявления повреждений. Обнаруженные неисправности и дефекты заносятся в акт осмотра и устраняются.

Во время грозы работы на устройствах молниезащиты и вблизи них не производятся.

ГЛАВА 2. ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Ряд производственных процессов с участием твердых, жидких или газообразных диэлектрических сред сопровождается статической электризацией, т.е. возникновением и разделением положительных и отрицательных зарядов. Иногда эти заряды быстро стекают в землю, рассеиваются или нейтрализуются. В других случаях они накапливаются и создают поле с высокой электрической напряженностью, обуславливающее электрические разряды (пробой воздуха или среды). В производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, газов с наличием горючих пылей и волокон, искровые разряды статического электричества могут вызвать взрыв и пожар. В некоторых случаях статическое электричество приводит к браку продукции, препятствует увеличению скорости работы машин и аппаратов и, следовательно, повышению производительности труда. При определенных условиях разряды статического электричества причиняют травмы обслуживающему персоналу.

2.1. Общие представления об электризации

Возникновение статического электричества – сложный процесс, зависящий от множества факторов, и в настоящее время нет еще единой теории, объясняющей это явление. Наиболее распространена гипотеза о контактной электризации веществ и материалов. Согласно этой гипотезе, электризация возникает при соприкосновении двух разнородных веществ, обладающих различными атомными и молекулярными силами притяжения на поверхности соприкосновения. Одна из контактирующих поверхностей должна быть из диэлектрического материала. При этом происходит перераспределение электронов или ионов веществ, образующее двойной электрический слой с зарядами противоположных знаков.

Однако образование двойных электрических слоев возможно при контакте тел и из одинаковых диэлектрических материалов за счет наличия на их поверхностях загрязнений, различной температуры тел и т.д. Находящиеся в контакте тела с образовавшимся на границе раздела двойным электрическим слоем остаются электрически нейтральными, т.е. суммарный заряд системы может быть равен нулю, если до соприкосновения тела не несли избыточного заряда. Каждое из контактирующих тел приобретает электрический заряд, плотность которого равна плотности

заряда, возникшего двойного электрического слоя. Знаки зарядов взаимодействующих тел противоположны. Заряды будут оставаться на поверхности тел после их разделения, если время разрушения контакта между ними будет меньше времени релаксации зарядов.

При оценке наэлектризованности пользуются удельной поверхностной (у твердых диэлектриков) или объемной (у сыпучих и жидких диэлектриков) плотностью заряда, а в некоторых случаях – удельным зарядом, приходящимся на единицу длины. Наэлектризованные тела или их участки, несущие заряды статического электричества, оказывают силовое воздействие друг на друга. В окружающем их пространстве образуется электрическое поле, действие которого проявляется и обнаруживается при внесении в него заряженных и нейтральных предметов. Основными параметрами, характеризующими электрическое поле зарядов, являются напряженность электрического поля и потенциалы его отдельных точек.

Контактная разность потенциалов не одинакова и зависит от диэлектрических свойств соприкасающихся материалов, их физического состояния, величины давления поверхностей друг на друга, а также от влажности, температуры поверхности и окружающей среды. При разделении поверхностей с возникшей контактной электризацией каждая из них сохраняет свой заряд, а контактная разность потенциалов по мере уменьшения емкости между поверхностями может достигать десятков и сотен киловольт. Так, при максимальной плотности (30 мкКл/м^2 и более) увеличение расстояния между наэлектризованными поверхностями на 1 см повышает разность потенциалов на десятки киловольт. Этим и объясняются высокие потенциалы, встречающиеся в производстве. Экспериментами установлено также, что из двух трущихся веществ положительно заряжается то, у которого диэлектрическая проницаемость больше. Если вещества имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость, то заряды не возникнут. В ряде технологических процессов потенциал относительно земли (или проводящих металлических тел, связанных с землей) при статической электризации достигает десятков киловольт. Ниже приведены потенциалы от электрического поля статического электричества, кВ.

Таблица 2.1

Примеры технологических процессов и производств	Потенциал от электрического поля статического электричества, кВ
1	2
В кинофотопленочной промышленности	15 и выше
На предприятиях резиновой промышленности и искусственной кожи	10–15
В производствах, связанных с размолотом, тонким добавлением и т.д.	10–15
При разбрызгивании красок	10
При трении целлулоида	40
При движении резиновой ленты транспортера (со скоростью 4 м/с)	45
При фильтрации смеси бензина с асфальтом через шелк	335

Токи при статической электризации составляют обычно несколько микроампер и даже меньше. Так, при протекании к цистернам бензина по трубопроводу был измерен ток от 1 до 10 мкА, и этот ток оказался прямо пропорционален скорости течения бензина.

Статическое электричество может накапливаться и на людях, особенно если на человеке обувь с непроводящими электричество подошвами, одежда и белье из шерсти, шелка и искусственного волокна, а также при движении по токонепроводящему полу и при выполнении ручных операций с диэлектриками. Потенциал изолированного от земли тела человека может превышать 7 кВ. Иногда (в зависимости от вида полимера и интенсивности трения частей костюма) этот потенциал может достигать 14–45 кВ.

Гипотеза о контактной разности потенциалов не может дать количественной, а иногда и качественной оценки процесса электризации. Однако наряду с этой гипотезой имеются и другие, где образование двойного электрического слоя объясняется поверхностной ориентацией нейтральных молекул, содержащих электрические диполи, пьезоэлектрическими явлениями, трением или образованием электролита на контактирующих поверхностях и т.д. Таким образом, при статической электризации могут наблюдаться процессы, которые пока еще изучены недостаточно, поэтому для борьбы со статическим электричеством в конкретных условиях требуются предварительные экспериментальные исследования и проверка предложенных защитных мер.

2.2. Воспламеняющая способность искр статического электричества и его физиологическое воздействие на организм человека

Когда на разделенных поверхностях веществ образуются электрические заряды Q и эти поверхности становятся пластинами конденсатора с емкостью C , между ними возникает напряжение U , равное

$$U = Q/C, \quad (2.1)$$

где U – напряжение, В; C – емкость, Ф; Q – заряд, Кл.

Энергия искры ($W_{\text{и}}$, Дж), способной возникнуть под действием этого напряжения (или напряжения между пластиной и каким-либо заземленным предметом), может быть оценена по запасенной конденсатором энергии

$$W_{\text{и}} = 0,5 \cdot CU^2, \quad (2.2)$$

поэтому воспламеняющую способность искровых зарядов характеризуют в основном их энергией. Однако формула (2.2) не может быть использована для расчета энергии разряда между заряженными диэлектрическими поверхностями, так как только часть накопленного заряда на диэлектрике может быть перенесена в разряде.

Энергия $dW_{\text{и}}$, рассеиваемая при переносе бесконечно малого заряда dq с заряженной поверхности, при разряде равна

$$dW_{\text{и}} = U \cdot dq. \quad (2.3)$$

где U – разность потенциалов между начальной и конечной точками траектории разряда.

Полная энергия определяется по формуле

$$W_{\text{и}} = \int_0^q U dq. \quad (2.4)$$

Определение полной энергии, выделенной в разряде, представляет значительную трудность, так как заряженные диэлектрики имеют неэквипотенциальную поверхность. Кроме того, поверхность заряженного диэлектрика, которая отдает заряд, не имеет точных размеров. В этом случае энергию электростатического разряда можно приближенно

определить, если принять в формуле (2.4) вместо переменной U максимальный потенциал на диэлектрической поверхности, рассчитанный по пробивному расстоянию для данной конфигурации электродов. Для определения полного заряда, переносимого в единичном разряде с заряженного диэлектрика, можно использовать метод осциллографирования.

В некоторых случаях для приближенной оценки энергии разрядов статического электричества с диэлектрических поверхностей применяют методы непосредственного контроля искровых разрядов статического электричества (на слух, по физиологическому воздействию, визуально и фотографированием и др.), аналитические методы, а также экспериментальное воспламенение горючих смесей электростатическими разрядами. Следует отметить, что экспериментальное исследование воспламеняющей способности электростатических разрядов является наиболее объективным методом оценки их энергии.

Реальная воспламеняющая способность электрической искры зависит от концентрации, температуры и давления взрывоопасной смеси. Условием воспламенения (взрыва) такой смеси от искры статического электричества является следующее:

$$W_{\text{и}} \geq W_{\text{мин}}, \quad (2.5)$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия разряда статического электричества с заряженного материала (зависит от свойств материала, конструкции аппарата, технологического процесса и др.); $W_{\text{мин}}$ – минимальная энергия зажигания горючей смеси, образование которой возможно в данном технологическом процессе (зависит только от свойств горючей смеси и является характеристикой чувствительности ее к воспламенению), определяется экспериментально.

Обычно минимальная энергия, необходимая для воспламенения пылевоздушных взрывоопасных смесей, выше энергии, воспламеняющей паровоздушные взрывоопасные смеси. Например, для многих паро- и газоздушных взрывоопасных смесей $W_{\text{мин}}$ составляет 0,009...2 мДж, а для пылевоздушных – 2...250 мДж. Примеры минимальных энергий приводятся в работе [3], а также в правилах [6]. Разряды статического электричества не в состоянии воспламенить смеси с минимальной энергией воспламенения 100 мДж и выше.

Средняя напряженность электрического поля, при которой возможен разряд, составляет $4 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^2$ кВ/м для резко неоднородного, $1,5 \cdot 10^2 \dots 20 \cdot 10^2$ кВ/м для слабонеоднородного и до $30 \cdot 10^2$ кВ/м для однородного электрического поля.

При разности потенциалов 3 кВ искровой разряд может воспламенить почти все горючие газы, а при 5 кВ также большую часть горючих пылей.

Степень электризации предмета (машины, аппарата и т.п.) или вещества является безопасной, если измеренная поверхностная плотность заряда σ , напряженность поля E или потенциал V на любом участке этой поверхности не превосходят допустимых значений в этой среде. При этом допустимыми считаются такие значения σ , E и V , при которых максимально возможная энергия разряда с поверхности данного предмета или вещества не превосходит 1/4 минимальной энергии воспламенения окружающей среды (например, смеси горючих паров жидкости с воздухом).

Таким образом, статическое электричество может вызвать воспламенение взрывоопасной смеси при совокупности следующих условий:

- наличии источника статических электрических разрядов;
- накоплении значительных зарядов на контактирующих поверхностях;
- достаточной разности потенциалов для электрического пробоя среды;
- наличии достаточной запасенной электрической энергии;
- возможности возникновения электрических разрядов.

Отсутствие любого из условий исключает пожаровзрывоопасные последствия статического электричества.

Условие безопасности от статического электричества может быть выражено неравенством

$$W_{\text{и}} \leq 0,4W_{\text{мин}}. \quad (2.6)$$

В пожаро- и взрывоопасных производствах реальную опасность представляет «контактная» электризация людей, работающих с движущимися диэлектрическими материалами (при прорезинивании тканей, покрытии резиной кордов на каландрах, обработке синтетических тканей и нитей, полимерных пленок и т.д.). На человеке накапливается статическое электричество, которое при соприкосновении человека с заземленным предметом вызывает искры и воспламенение смеси. Энергия разряда этой искры может составлять 2,5–7,5 мДж. Кроме того, такое электричество оказывает неприятное физиологическое воздействие на человека, вызывая слабые, умеренные или сильные уколы или удары, зависящие от энергии разряда. Так как ток при этом незначителен, уколы и удары непосредственную опасность для человека не представляют. Но известны случаи с тяжелым исходом, когда искра, проскакивающая между телом человека и заряженным объектом, вызывает испуг,

сопровожающийся произвольными нескоординированными движениями и соприкосновением с неогороженными вращающимися частями машин, падение с высоты и т.п. Длительное воздействие статического электричества является причиной ряда заболеваний.

Расчетная зависимость, показывающая, при каком значении будет существовать опасность физиологического воздействия на человека и при каком потенциале возникает опасность воспламенения некоторых горючих смесей, представлена на рис. 2.1. Границы зон видов физиологического воздействия несколько условны, так как это воздействие зависит от особенностей человеческого организма и специфики производства. Поэтому допустимым потенциалом на человеке по физиологическому воздействию считают $V_{\text{доп}} = 4 \dots 6$ кВ. Допустимый же потенциал по пожаро- и взрывоопасности для некоторых сред определяется непосредственно по кривой (рис. 2.1).

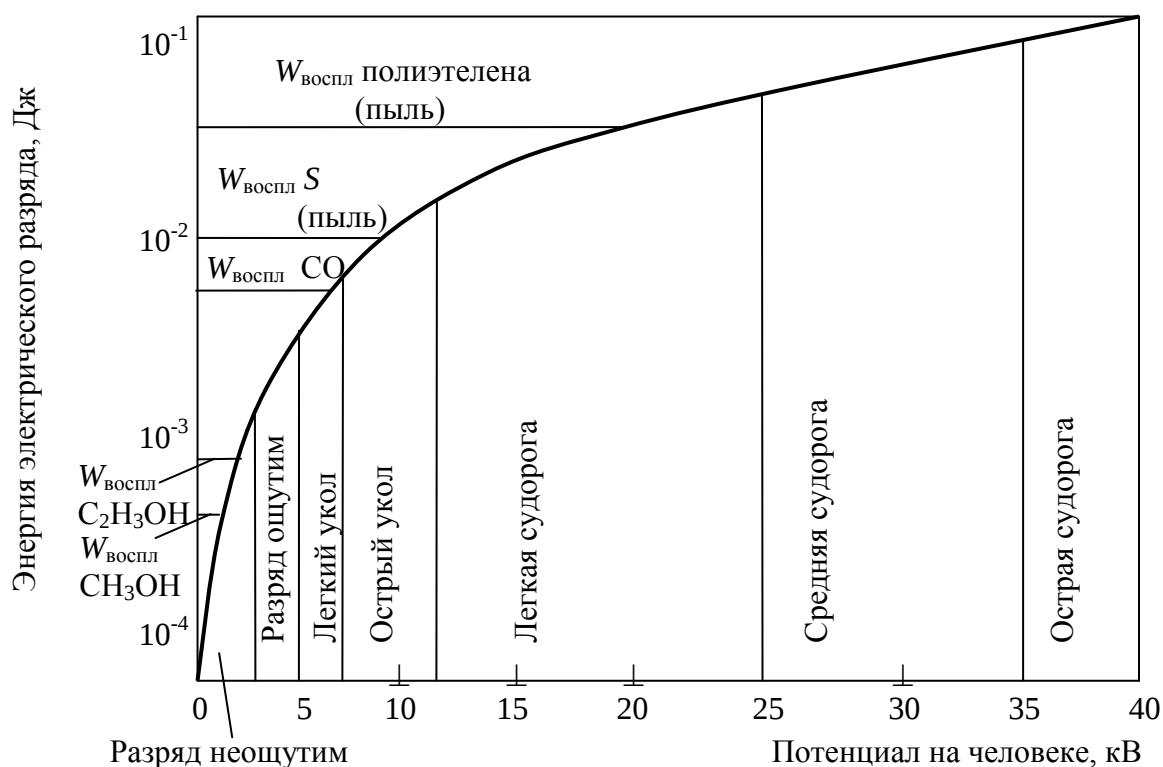


Рис. 2.1. Зависимость энергии электрического разряда с тела человека и физиологического воздействия от потенциала зарядов статического электричества

Чтобы исключить формирование воспламеняющих разрядов с тела человека, необходимо обеспечить быструю утечку зарядов. С этой целью уменьшают сопротивление обуви и пола. В производствах, где существует

опасность воспламенения взрывоопасных смесей разрядом с человека, необходимо обеспечивать работающих электропроводящей (антистатической) обувью (например, с кожаным верхом и подошвой из электропроводящей резиновой пластины).

Обувь считается электропроводящей, если электрическое сопротивление между электродом в форме стельки, находящимся внутри обуви, и наружным электродом меньше 10^7 Ом.

Покрытие пола считается электропроводящим из бетона толщиной 3 см, спецбетона или пенобетона, ксилолита, настила из антистатической резины и т.д.

Особое внимание устранению электрического заряда с человека следует уделять при выполнении некоторых ручных операций (промывка, чистка, протирка, проклеивание, прорезинивание) с применением бензина, бензола, ацетона, резинового клея и т.п.

2.3. Приборы для измерения параметров статического электричества

Электрические измерения необходимы для изучения причин и условий электризации и постоянного контроля электростатических величин: разности потенциалов U между заряженным телом и землей или заземленными предметами; поверхностной плотности электрических зарядов σ и напряженности электрического поля E .

Указателями электрических потенциалов служат различные механические (лепестковые, стрелочные, струнные, квадрантные) и электронные электрометры. В механических электрометрах измеряемый заряд подается на один из пары электродов, кулоновское взаимодействие которых фиксируется различными методами. Например, принцип действия квадрантных электрометров положен в основу электростатических вольтметров. Электростатический заряд воздействует на подвижный секторный электрод, который под воздействием кулоновских сил перемещается. По углу поворота судят о величине измеряемого напряжения. При этом потенциал, показываемый прибором, нельзя считать потенциалом заряженного тела, так как входная емкость его переменна и вносит погрешность. Основные характеристики выпускаемых промышленностью электростатических вольтметров приведены в табл. 2.2. Время успокоения у всех – 6 с, класс точности – 1.

Таблица 2.2

Тип прибора	Конечное значение рабочей части шкалы, кВ	Входная емкость, пФ
C50/1	0,08	10
C50/2	0,075	7
C50/3	0,15	7
C50/4	0,3	7
C50/5	0,6	4
C50/6	1,0	4
C50/7	1,5	4
C50/8	3,0	4
C50/9	0,45	4
C196	7,5-15-30	12

Примечание. Выпускаются приборы C53 класса точности 0,5, имеющие такую же модификацию, как приборы типа C50.

Электронные электрометры позволяют измерять электростатические величины без непосредственного контакта с заряженным телом. В простейших статических индукционных электрометрах с преобразованием входного сигнала удаленный от заряженной диэлектрической поверхности конец проводника-датчика соединен с сеткой электрометрической лампы или полевого транзистора. Поэтому индуцированный на нем заряд определяет ток анода лампы (ток транзистора).

По такому принципу работает прибор ПК2-3А, созданный научно-исследовательским институтом охраны труда. Прибор проградуирован в единицах поверхностного потенциала и плотности заряда. Диапазон 0,1–50 кВ ($0,2\text{--}20 \text{ мКл/м}^2$) перекрывается тремя пределами: 0,1–1 кВ; 0,5–10 кВ; 1,0–50 кВ. Перейти с одного предела на другой можно с помощью сменных насадок с дисковыми диафрагмами, надеваемых на переднюю цилиндрическую часть прибора, внутри которой находится электрометрическая лампа в герметичном стальном экране. Прибор не может применяться во взрывоопасных зонах. Характеристики некоторых приборов приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Прибор	Характеристика прибора и измерения
Индикатор статических зарядов типа:	
ИСПИ-4	Потенциал заряженной поверхности до 50 кВ. Питание батарейное. Взрывозащищенный.
МИЭП-1 и МИЭП-2	Потенциал до 40 кВ. Без питания. Взрывозащищенный
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Напряжение 0,03–3 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный
Электрометр электронного типа: ПК-2-3А	Потенциал поверхности и тела человека до 50 кВ. Поверхностный заряд 0,2–20 мкКл/м ²
П2-1	Напряженность электрического поля до 50 кВ/м. Питание 3–127–220 В
П2-2	Напряжение до 2,5 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный
ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до 260 кВ/м. Питание батарейное 1,5 В. Взрывозащищенный
Динамический электрометр с вращающимся экраном: ВИНЭП-2	Напряженность электрического поля 3–2400 кВ/м. Питание батарейное 9 В. Взрывозащищенный Напряженность электрического поля 4–2500 кВ/м. Питание 127/220 В.
ИНЭП-1	Напряжение до 15 кВ. Питание 220 В.
ПЗСЭ-73	Сжатый воздух 4 кПа

По условиям пожаро- и взрывобезопасности приборы для электростатических измерений во взрывоопасных зонах должны иметь соответствующий уровень и вид взрывозащиты, а их датчики (в частности, у переносных приборов) должны соответствовать требованиям электростатической искробезопасности. Датчик прибора считают искробезопасным для данной взрывоопасной смеси, если искровой разряд на него с металлического электрода, имеющего потенциал 50 кВ и емкость 60–100 пФ, вызывает воспламенение этой смеси с вероятностью не более 10^{-3} (либо энергия этих зарядов, по крайней мере, в 2,5 раза меньше энергии воспламенения смеси). Так, датчик прибора ИСПИ-4 с отклонением электронного потока в вакууме покрыт толстым слоем

диэлектрика (фторопластом), что обеспечивает электростатическую искробезопасность. В приборе СМ-2/С-59 взрывозащита достигнута путем заключения электростатического вольтметра С-53 во взрывонепроницаемый корпус, а специальное покрытие датчика (например, фторопласт) обеспечивает его электростатическую безопасность. Взрывобезопасность процесса измерения достигается в том случае, когда во взрывоопасной зоне применяется искробезопасный датчик, а сам прибор (например, статический вольтметр любого типа) устанавливается в невзрывоопасной зоне.

2.4. Способы устранения опасности статического электричества

Согласно действующим правилам [6], защита от разрядов статического электричества должна осуществляться во взрыво- и пожароопасных производствах с наличием зон классов 0, 1, 2, П-I и П-II, в которых применяются и вырабатываются вещества с удельным объемным электрическим сопротивлением, превышающим 10^5 Ом·м. В остальных случаях защита осуществляется лишь тогда, когда статическое электричество представляет опасность для обслуживающего персонала, отрицательно влияет на технологический процесс или качество продукции. Основными способами устранения опасности от статического электричества (в соответствии со степенью эффективности и частотой применения) являются:

- заземление оборудования, коммуникаций, аппаратов и сосудов, а также обеспечение постоянного электрического контакта с заземлением тела человека;
- уменьшение удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления путем повышения влажности воздуха или применения антистатических примесей;
- ионизация воздуха или среды, в частности, внутри аппарата, сосуда и т.д.

Кроме этих способов прибегают к дополнительным, дающим в конкретных случаях нужный эффект при операциях с жидкими, газообразными и сыпучими материалами и веществами: предотвращение образования взрывоопасных концентраций, ограничение скорости движения жидкости, замена ЛВЖ на негорючие растворители и т.д.

Практический способ устранения опасности от статического электричества выбирается с учетом эффективности и экономической целесообразности.

Заземление

Заземление – наиболее часто применяемая мера защиты от статического электричества, его целью является устранение формирования электрических разрядов с проводящих элементов оборудования. Поэтому все проводящие части оборудования и электропроводные неметаллические предметы подлежат обязательному заземлению, независимо от того, применяются ли другие способы защиты от статического электричества. Заземлять следует не только те части оборудования, которые участвуют в генерировании, но и все другие, так как они могут зарядиться по законам электростатической индукции. Во многих случаях индуцированные заряды более опасны, чем заряды, которые являются причиной их образования.

В случаях, когда оборудование выполнено из проводящих электрический ток материалов, заземление является основным и почти всегда достаточным способом защиты. Особенно эффективно заземление токопроводящих частей оборудования при переработке веществ с удельным сопротивлением не более 10^8 Ом·м для жидкостей и 10^7 Ом·м для твердых тел. Если же на внешней поверхности или внутренних стенках металлических аппаратов, резервуаров и трубопроводов образуются отложения непроводящих веществ (смолы, пленки, осадки), заземление становится неэффективным и создается ложное впечатление о надежности и безопасности. Заземление не устраняет опасности и в случае применения аппаратов с эмалированными и другими неэлектропроводящими покрытиями.

Неметаллическое оборудование считается электростатически заземленным, если сопротивление растеканию тока на землю с любых точек его внешней и внутренней поверхности не превышает 10^7 Ом при относительной влажности воздуха не выше 60 %. Такое сопротивление обеспечивает необходимое значение постоянной времени релаксации в пределах десятой доли секунды в невзрывоопасной и тысячные доли секунды во взрывоопасной среде. Постоянная времени релаксации τ связана с сопротивлением r заземления предмета или оборудования и его емкостью C соотношением $\tau = rC$.

Если емкость C мала, сопротивление растеканию тока может быть выше 10^7 Ом. С учетом этой величины рассчитываются максимально допустимые значения сопротивлений заземляющих устройств.

Трубопроводы наружных установок (на эстакадах или в каналах), оборудование и трубопроводы, расположенные в цехах, должны представлять на всем протяжении непрерывную электрическую цепь

и присоединяться к заземляющим устройствам. Считается, что электрическая проводимость фланцевых соединений трубопроводов и аппаратов, соединений крышек с корпусами аппаратов и т.п. достаточно высока (обычно не более 10 Ом) и не требуется установки специальных параллельных перемычек.

Каждая система аппаратов и трубопроводов в пределах цеха должна быть заземлена не менее чем в двух местах. Все резервуары и емкости вместимостью более 50 м³ и диаметром более 2,5 м заземляют не менее чем в двух противоположных точках. На поверхности горючих жидкостей в резервуарах не должно быть плавающих предметов.

Наливные стояки эстакад для заполнения железнодорожных цистерн и рельсы железнодорожных путей в пределах сливноналивного фронта должны быть электрически соединены между собой и надежно заземлены. Автоцистерны, наливные суда, самолеты, находящиеся под наливом или сливом горючих жидкостей и сжиженных газов, должны также заземляться. Контактные устройства (без средств взрывозащиты) для присоединения заземляющих проводников должны быть установлены за пределами взрывоопасной зоны (не менее 5 м от места налива или слива [7]). При этом проводники вначале присоединяются к корпусу объекта заземления, а затем к заземляющему устройству. Применяемые для этих целей зажимы, розетки, магниты и другие примитивные устройства и приспособления не отвечают требованиям электростатической искробезопасности и не имеют соответствующих разрешительных документов (лицензии, свидетельство об электростатической искробезопасности и взрывозащите, сертификаты качества и т.д.) на право их изготовления и применения во взрывоопасной зоне.

Кроме того, имеют место существенные конструктивные различия устройств для заземления автоцистерн (АЦ) на нефтебазах и автозаправочных комплексах (АЗК) от аналогичных на автозаправочных станциях (АЗС) общего пользования и ведомственных пунктов заправки топливом [23].

Подобные различия существуют и при оборудовании АЦ заземляющими проводниками, конструктивно непригодными для применения при наливке топлива на нефтебазе (или АЗК) или при сливе его на АЗС.

Таким образом, применяемые до сих пор для этих целей заземляющие устройства не обеспечивают требуемого уровня пожаровзрывобезопасности технологии налива или слива топлива и других ЛВЖ.

В целях устранения указанных недостатков и нарушений требований пожарной безопасности [23, 24, 25] в настоящее время разработаны и серийно выпускаются специальные устройства заземления автоцистерн (УЗА) типов УЗА-2МИ, УЗА-2МК и УЗА-2МК-03. УЗА соответствуют требованиям ГОСТов [26-30], являются взрывозащищенными с маркировкой соответственно $1E_xs\text{II}T6$ и $1E_xsi_b\text{II}CT6$ могут устанавливаться во взрывоопасных зонах [7]. УЗА имеют необходимые разрешительные документы на их изготовление и применение: разрешение и лицензию Ростехнадзора, свидетельство о взрывозащищенности и электростатической искробезопасности.

УЗА состоит из самого заземляющего устройства, устанавливаемого в зоне наливного стояка нефтебазы (или АЗК) или сливного устройства АЗС, заземляющего проводника, имеющего с одной стороны наконечник, закрепляемый жестко на автоцистерне болтом М6, а с другой стороны – специальный ключ. Предохранение ключа в транспортном положении обеспечивается специальным держателем, закрепленным на АЦ.

УЗА выполняет следующие функции:

- УЗА-2МИ заземляет автоцистерну, блокирует систему налива (слива) и информирует о наличии заземления при помощи светоиндикатора. Применяется при наливе или сливе нефтепродуктов на нефтебазах (или АЗК) и АЗС.

- УЗА-2МК заземляет автоцистерну, блокирует запуск системы налива (слива), контролирует целостность цепи «транспортная емкость – УЗА» и индицирует при помощи светоиндикатора о заземлении АЦ. Применяется при наливе или сливе нефтепродуктов на нефтебазах (или АЗК) и АЗС.

Технические характеристики УЗА приведены в табл. 2.3.

С учетом малых разрядных токов при статической электризации допускается сопротивление заземляющего устройства до 100 Ом. Однако допустимое сопротивление заземления, определяемое скоростью накопления электрических зарядов, может составлять 10^7 Ом. При таком сопротивлении удаляются заряды, накапливающиеся со скоростью 100 мкКл/с. Обычно же скорость накопления зарядов, например, при перекачке жидких углеводородов, значительно ниже и часто равна одному или нескольким микрокулонам в секунду. Если объект защищают одновременно и от вторичных воздействий молнии (с использованием общего заземления), то сопротивление такого заземления устранит формирование зарядов статического электричества.

Таблица 2.4

№ п/п	Характеристика	УЗА-2МИ	УЗА-2МК
1	Световая сигнализация о заземлении	Есть	Есть
2	Контакты для схемы блокировки	Есть	Есть
3	Контроль цепи «транспортная емкость – УЗА»	Нет	Есть
4	Электропитание	220 В, 50 Гц	12 В
5	Ток потребления, не более, А	0,008	0,3
6	Потребляемая мощность, не более, ВА	2,0	9,0
7	Нагрузочная способность контакта для схемы блокировки: – напряжение, В – ток, не более, А	220 1,0	220 1,0
8	Маркировка по взрывозащите	1ExsIIT6	1ExsibIICT6

Если для защиты от статической электризации проводящего неметаллического оборудования с проводящей футеровкой применяется заземление, к нему применяются те же требования, что и к заземлению металлического оборудования. Например, заземление трубопровода из диэлектрического материала, но с проводящим покрытием (краска, лак) может выполняться присоединением его к заземляющему контуру с помощью металлических хомутов и проводников через 20–30 м.

Заземление не всегда решает проблему защиты от статического электричества. Так, заземление резервуара, заполняемого наэлектризованной жидкостью, лишь исключает накопление заряда (натекающего из объема жидкости) и на его стенках, но не ускоряет процесс рассеяния заряда в жидкости. Это объясняется тем, что скорость релаксации зарядов статического электричества в объеме диэлектрической жидкости нефтепродуктов определяется постоянной времени релаксации τ . Следовательно, в заполняемом наэлектризованными нефтепродуктами резервуаре в течение всего времени закачки жидкости и в течение времени, приблизительно равном 3τ , после ее окончания существует электрическое поле зарядов независимо от того, заземлен этот резервуар или нет. Именно в этот промежуток времени может существовать опасность воспламенения паровоздушной смеси нефтепродуктов в резервуаре разрядами статического электричества.

Особую опасность, в свете указанного, представляет собой забор проб из резервуара сразу после его заполнения. Однако через промежуток времени, примерно равный 3τ , после окончания заполнения заземленного резервуара заряды статического электричества в нем практически

полностью релаксируют, электрическое поле исчезает и проведение каких-либо манипуляций по забору проб жидкости становится безопасным. Поэтому в целях исключения разрядов при заполнении стационарных резервуаров или железнодорожных цистерн на пробоотборник при отборе проб через люк из резервуара или на наливную трубу в процессе ее извлечения из цистерны необходимо выдержать промежуток времени, равный [4]

$$T = 3K\tau, \quad (2.7)$$

где τ – постоянная времени релаксации нефтепродукта, с; K – коэффициент, учитывающий увеличение времени релаксации за счет поверхностного заряда нефтепродукта.

Для светлых нефтепродуктов, имеющих низкий уровень электропроводности (при $\rho_v > 10^{11}$ Ом·м), необходимое время выдержки T , обеспечивающее безопасность дальнейших операций, должно быть не менее 10 мин после успокоения жидкости. Заземление резервуара и выдержка необходимого времени после заполнения не дадут нужного эффекта безопасности в случаях, когда в резервуаре имеются плавающие на поверхности жидкости изолированные предметы, которые могут приобрести заряд статического электричества в ходе заполнения резервуара и сохранять его в течение времени, значительно превышающем 3τ . В этом случае приближение к плавающему предмету заземленного проводящего тела может сопровождаться опасным искрообразованием.

Уменьшение объемного и поверхностного удельных электрических сопротивлений

Снижением объемного и поверхностного сопротивлений обеспечивается соответствующая электропроводность и способность диэлектрика отводить заряды статического электричества. Устранение опасности статической электризации диэлектриков этим способом является весьма эффективным и может быть достигнуто повышением влажности воздуха, химической обработкой поверхности, применением электропроводных покрытий и антистатических веществ (присадок).

Повышение относительной влажности воздуха. Большинство пожаров от искр статического электричества происходит обычно зимой, когда относительная влажность воздуха низка. При относительной влажности воздуха выше 65–70 %, как показывают исследования и практика, число вспышек и загораний становится незначительным.

Ускорение стекания электростатических зарядов с диэлектриков при высокой влажности воздуха связывают с тем, что на поверхности гидрофильных диэлектриков адсорбируется тонкая пленка влаги, содержащая обычно большое количество ионов из загрязнений и растворенного вещества, за счет которых обеспечивается достаточная поверхностная электропроводность электролитического характера. Электропроводность адсорбированной пленки влаги при прочих равных условиях определяется ее толщиной и в связи с этим в значительной степени зависит от относительной влажности воздуха. Чем она выше, тем толще пленка. Водные пленки толщиной 10^{-5} см визуально нельзя обнаружить, однако они увеличивают поверхностную электропроводность диэлектрика и способствуют утечке зарядов. Поэтому поверхностное сопротивление диэлектрика уменьшается. Однако если материал находится при более высокой температуре, чем та, при которой пленка может удерживаться на поверхности, указанная поверхность не может стать проводящей даже при очень высокой влажности воздуха. Эффект также не будет достигнут, если заряженная поверхность диэлектрика гидрофобна (сера, парафин, масла и другие углеводороды) или скорость ее перемещения больше, чем скорость образования поверхностной пленки. Таким образом, способ увлажнения воздуха не всегда эффективен.

Увеличение влажности воздуха достигается распылением водяного пара или воды, циркуляцией влажного воздуха, а иногда свободным испарением с поверхности воды.

В некоторых случаях желаемый эффект достигается местным увлажнением паров или охлаждением электризующейся поверхности до температуры на 10°C ниже температуры окружающей среды.

Химическая обработка поверхности, электропроводные покрытия. Снижение удельного поверхностного сопротивления полимерных материалов может быть достигнуто химической обработкой поверхности кислотами (например, серной или хлорсульфоновой). В результате этого поверхности полимера (полистирол, полиэтиленовые и полиэфирные пленки) окисляются или сульфатируются. При этом удельное поверхностное сопротивление снижается до 10^6 Ом при относительной влажности воздуха 75 %.

Положительный эффект достигается и при обработке изделий из полистирола и полиолефинов погружением образцов в петролейный эфир при одновременном воздействии ультразвуком. Методы химической обработки эффективны, но требуют точного соблюдения технологических условий.

Иногда необходимый эффект достигается нанесением на диэлектрик поверхностной хорошо проводящей пленки. Например, металлические тонкие пленки получают распылением, разбрызгиванием или испарением в вакууме или наклеиванием металлической фольги. Пленки на углеродной основе получают распылением углерода в жидкой среде или порошка (частицы меньше 1 мкм).

Применение антистатических веществ. Большинство горючих и легковоспламеняющихся жидкостей характеризуется высоким удельным электрическим сопротивлением. Поэтому при некоторых операциях, например с нефтепродуктами, происходит накопление зарядов статического электричества, которое не только препятствует интенсификации технологических операций, но и служит источником многочисленных взрывов и пожаров на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Движение жидких углеводородов относительно твердого, жидкого или газообразного тела может привести к разделению электрических зарядов на поверхности соприкосновения. При движении жидкости по трубе слой находящихся на поверхности жидкости зарядов уносится ее потоком, а заряды противоположного знака остаются в трубе и, если металлическая труба заземлена, стекают в землю. Если металлический трубопровод изолирован или изготовлен из диэлектрических материалов, он приобретает положительный заряд, а жидкость – отрицательный.

Степень электризации нефтепродуктов зависит от состава и концентрации содержащихся в них активных примесей, физико-химического состава нефтепродуктов, состояния внутренней поверхности трубопровода (коррозии и т.д.) или технологического аппарата, диэлектрических свойств, вязкости и плотности жидкости, а также от скорости движения жидкости, диаметра и длины трубопровода. Так, присутствие 0,001 % механических примесей превращает инертное углеводородное топливо в электризуемое до опасных пределов.

Один из наиболее эффективных методов, позволяющих устранить электризацию нефтепродуктов, – введение специальных антистатических веществ. Добавление присадок в тысячных и десятитысячных долях процента позволяет на несколько порядков уменьшить удельное сопротивление нефтепродуктов и обезопасить операции с ними. Электрическую проводимость углеводородов и нефтепродуктов наиболее эффективно повышают олеаты и нафтенаты хрома и кобальта, соли хрома синтетических жирных кислот, присадка «Сигбаль» и другие вещества. Так, присадка на основе олеиновой кислоты олеат хрома повышает

электропроводность бензина Б-70 в $1,2 \cdot 10^4$ раз. Широкое применение в операциях по промывке деталей нашли присадки «Аккор-1» (10–15 г присадки на 100 л жидкости) и АСП-1.

Для получения «безопасной» электропроводности нефтепродуктов в любых условиях необходимо вводить 0,001–0,005 % присадок. Они обычно не влияют на физико-химические свойства нефтепродуктов.

Для получения проводящих растворов полимеров (клеев) также применяют антистатические присадки, растворимые в них, например соли металлов переменной валентности высших карбоновых и синтетических кислот.

Положительные результаты достигаются при использовании антистатических веществ на предприятиях по переработке синтетических волокон. Наиболее важным свойством антистатических веществ является способность увеличивать ионную проводимость и, тем самым, снижать электрическое сопротивление волокнистых материалов. Обработку волокнистых материалов антистатическими веществами производят до процесса либо непосредственно в процессе их изготовления.

Есть несколько главных групп химических препаратов, применяемых для приготовления антистатических материалов, которые влияют на электрические свойства волокон: углеводороды парафинового ряда, жиры, масла, гигроскопические вещества, поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Углеводороды парафинового ряда, жиры и масла влияют на электрический контакт между волокнами и частями машин, способствуя образованию проводящих масляных пленок между ними. Гигроскопические вещества образуют на поверхности волокон пленку влаги, снижая таким образом трение. При наличии влаги и веществ, обладающих свойствами электролитов, образуются ионы. Поверхностно-активные вещества при добавлении в воду снижают ее поверхностное натяжение, в результате улучшается смачивание, пенообразующие, моющие и другие важные для текстильной промышленности свойства воды.

Эффективность антистатических веществ используют в промышленности полимеров, например при обработке полистирола и полиметилметакрилата. Обработка полимеров антистатическими добавками производится как поверхностным нанесением, так и введением в расплавленную массу. В качестве антистатических добавок применяют, например, некоторые образцы ионогенных поверхностно-активных веществ. При поверхностном нанесении ПАВ обладают хорошим антистатическим эффектом. Удельное поверхностное сопротивление

полимеров при этом снижается на 5–8 порядков, но срок эффективного действия незначителен (до одного месяца). Введение антистатических добавок внутрь более перспективно, так как антистатические свойства полимеров стабильны во времени (несколько лет), менее подвержены действию растворителей, истиранию и т.д. Для каждого диэлектрика оптимальные концентрации ПАВ различны: например, для полиэтилена низкого давления 0,05–0,1 %, полиэтилена высокого давления 0,2–0,3 %, полипропилена 0,5 %, поливинилхлорида твердого 0,5–1,5 %, полиакрила 2–3 %, полистирола 1,5–2,5 %.

Широкое применение труб для пневмотранспорта, продуктопроводов и других устройств из полимеров (например, полиэтилена низкой и высокой плотности) привело к созданию полупроводящих полимерных композиций путем введения наполнителей (ацетиленовой сажи, алюминиевой пудры, графита, цинковой пыли).

Лучший наполнитель – ацетиленовая сажа, хорошо распределяемая в полимере и снижающая сопротивление на 10–11 порядков даже при 20 % от массы полимера. Оптимальная массовая концентрация ацетиленовой сажи для создания электропроводящего полимера составляет 25 %. Для пневмотранспорта могут быть рекомендованы неметаллические трубы из проводящей полиэтиленовой композиции.

В народном хозяйстве широко используются резинотехнические изделия, обычно диэлектрические. Это связано с опасностью статической электризации. Чтобы получить электропроводные или антистатические резины, в них вводят электропроводящие наполнители – порошок графит, различные сажи (например, липецкую, ацетиленовую), мелкодисперсные металлы. В таких резинах образуется токопроводящая структура. Так, при введении в латекс сажи электропроводность резины (вследствие лучшего распределения наполнителя) оказалась на 2–3 порядка выше электропроводности резины, полученной на основе твердого каучука. Удельное сопротивление антистатической резины достигает 10^6 Ом·м, проводящей – до $5 \cdot 10^2$ Ом·м.

Антистатическими резинами марки КР-388, КР-245 пользуются во взрывоопасных производствах, покрывают полы, рабочие столы, детали оборудования и колеса внутрицехового транспорта. Такое покрытие лучше металлического или бетонного, оно более гигиенично, быстрее отводит возникающие заряды, снижает электризацию людей до безопасного уровня.

В последнее время разработана рецептура маслобензостойкой электропроводящей резины с использованием бутадиеннитрильных и полихлоропреновых каучуков. Наиболее широко эти резиновые смеси

используются при изготовлении напорных рукавов и шлангов для перекачки ЛВЖ. Такие рукава значительно снижают опасность воспламенения при сливе и наливе ЛВЖ в авто- и железнодорожные цистерны и другие емкости, исключают применение специальных устройств для заземления заправочных воронок и наконечников.

До последнего времени электропроводящие слои создавали вакуумным напылением или катодным нанесением металла на поверхность диэлектрика. Но этот способ не всегда приемлем. Были эффективны специальные лакокрасочные покрытия, основанные на образовании в полимерном связующем цепочных структур наполнителя. Эти структуры, образованные контактирующими частицами проводящего наполнителя, обеспечивают покрытие хорошую электропроводность. Наполнителями служат порошкообразные металлы, сажа, графит. Так, 15 % карбонильного никеля в полимере снижает удельное сопротивление до 10^4 Ом·м и менее, а 35–40 % такого никеля приближает проводимость ряда полимеров к металлической. Для «чистых» полимерных связующих без наполнителя удельное сопротивление $\rho = 10^9$ – 10^{13} Ом·м.

В настоящее время созданы электропроводящие эмали марки ХС-928 и АК-562. Их наносят на поверхность в два слоя кистью или пульверизатором, и они дают пленку черного цвета, устойчивую к температуре, давлению, вакууму, агрессивным средам и радиационному облучению. Электропроводными эмалями окрашивают заземляемые устройства технологического оборудования: внутренние части химической реакционной аппаратуры, изготовленной из стекла и пластмассы, внутренние части диэлектрического трубопровода, по которому транспортируются жидкости или сыпучие материалы, способные электризоваться, и т.д.

Если во взрывоопасных производствах работают ременные передачи и ленточные транспортеры, изготовленные из материалов с $\rho_r > 10^5$ Ом·м, заряды статического электричества и потенциал ремней и лент достигает нескольких десятков киловольт. Эффективное снижение потенциала получается при увеличении поверхностной проводимости ремня и обязательном заземлении установки. Внутреннюю поверхность ремня покрывают антистатической смазкой, возобновляемой не реже одного раза в неделю. Для кожаных и резиновых ремней рекомендуется, например, такая смазка: 100 вес. ч. глицерина и 40 вес. ч. сажи. Иногда хорошее снижение потенциала дают увеличение относительной влажности воздуха в месте нахождения ременной передачи до 70 % и более и снижение линейной скорости движения ремня и лент.

Ионизация воздуха

Сущность этого способа заключается в нейтрализации или компенсации поверхностных электрических зарядов ионами разного знака, которые создают специальные приборы, называемые нейтрализаторами. Ионизация воздуха осуществляется двумя способами: электрическим полем с высокой напряженностью E и радиоактивным излучением.

Принцип работы нейтрализаторов состоит в том, что они создают вблизи наэлектризованного диэлектрика положительные и отрицательные ионы. Ионы, имеющие полярность, противоположную полярности зарядов наэлектризованного материала, под действием электрического поля оседают на поверхности диэлектрика, нейтрализуя его.

Ионизация воздуха электрическим полем с высокой напряженностью получается от нейтрализаторов двух типов: индукционных и высоковольтных.

Индукционные нейтрализаторы очень просты и давно применяются. Существуют индукционные нейтрализаторы с остриями и проволочные. В нейтрализаторе с остриями (рис. 2.2, *а*) в деревянном или металлическом стержне укреплены заземленные острия, тонкие проволочки или фольга. У проволочного нейтрализатора (рис. 2.2, *б*) вместо острия применена тонкая стальная проволочка, натянутая поперек движущегося заряженного материала.

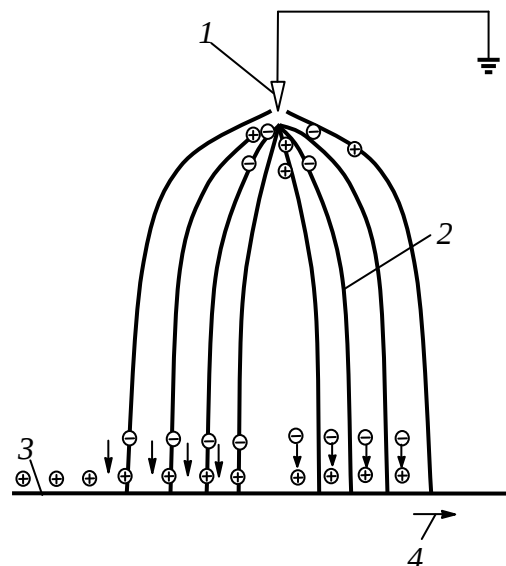
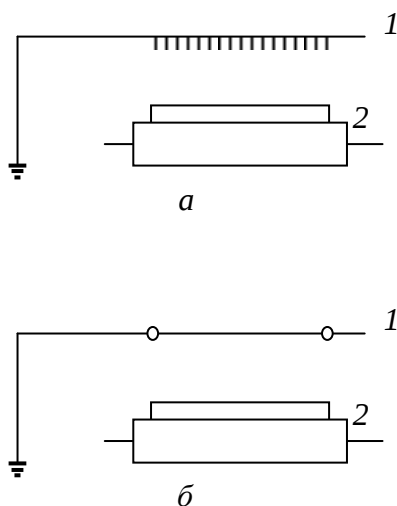


Рис. 2.2. Схема индукционного нейтрализатора:
 а – с остриями; б – проволочного;
 1 – острия и проволока;
 2 – заряженная поверхность

Рис. 2.3. Схема нейтрализации зарядов индукционным нейтрализатором:
 1 – разрядный электрод; 2 – зона ударной ионизации; 3 – наэлектризованный диэлектрик; 4 – направление движения диэлектрика

Действие индукционных нейтрализаторов основано на использовании электрического поля наэлектризованного тела, и постороннего источника напряжения для них не требуется. Под действием сильного электрического поля вблизи разрядного электрода происходит ударная ионизация, в результате которой образуются ионы обоих знаков (рис. 2.3). Для увеличения эффективности действия нейтрализаторов следует стремиться к сокращению расстояния между кончиками игл и нейтрализуемой поверхностью до 5–20 мм. Нейтрализаторы монтируются непосредственно перед местом, где заряды создают технологические помехи, или вблизи от места генерации зарядов. Они обладают высокой ионизационной способностью, особенно при высоких потенциалах заряженного тела. Проволочные нейтрализаторы менее эффективны. Основным их недостатком является то, что они действуют, если потенциал наэлектризованного тела достигает нескольких киловольт. Основные преимущества индукционных нейтрализаторов заключаются в простоте конструкции, низкой стоимости, минимальных эксплуатационных затратах и отсутствии источников питания.

Высоковольтные нейтрализаторы работают на переменном, постоянном и токе высокой частоты. Они состоят из трансформатора с высоким выходным напряжением и игольчатого разрядника (рис. 2.4). В нейтрализатор на постоянном токе входит и высоковольтный выпрямитель. Принцип действия всех трех типов нейтрализаторов, основанный на ионизации воздуха высоким напряжением, одинаков, но эффективность различна. Максимальное расстояние между разрядным электродом и нейтрализуемым материалом, при котором нейтрализатор еще эффективен, может достигать 600 мм. Обычно рабочее расстояние принимается равным 200–300 мм. Достоинство всех трех типов нейтрализаторов – достаточное ионизирующее действие и при низком потенциале тела. Особенно полезны нейтрализаторы там, где не соблюдаются температурно-влажностные условия и относительная влажность воздуха может быть ниже 50 %. Недостатком высоковольтных нейтрализаторов является большая энергия возникающих искр, способных воспламенить любые взрывоопасные смеси. Поэтому нейтрализаторы для взрывоопасных зон должны иметь только взрывозащищенное исполнение.

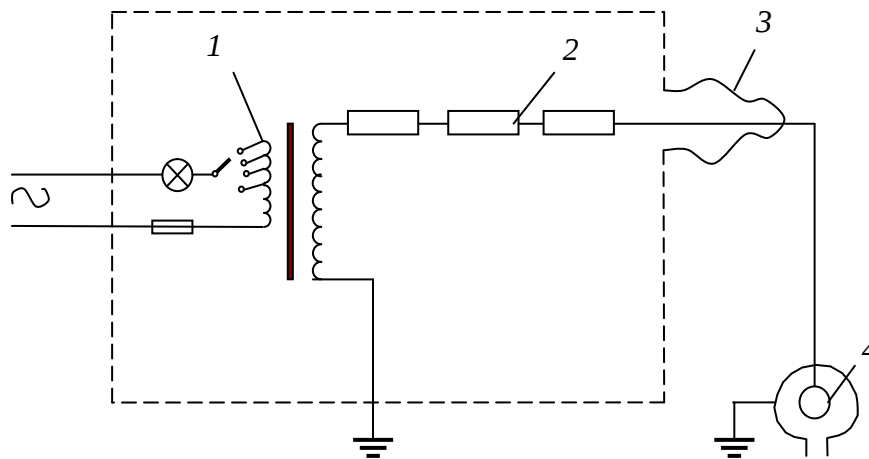


Рис. 2.4. Высоковольтный нейтрализатор переменного тока:
1 – трансформатор; 2 – защитное сопротивление; 3 – проходной изолятор;
4 – игольчатый разрядник

При использовании высоковольтных нейтрализаторов должна быть предусмотрена надежная защита обслуживающего персонала от высокого напряжения. В этих целях в высоковольтную цепь нейтрализатора включаются защитные сопротивления (рис. 2.4), которые ограничивают ток до величины в 50-100 раз меньше тока, опасного для жизни.

Радиоизотопные нейтрализаторы очень просты по устройству, не требуют источника питания, достаточно эффективны и безопасны при использовании в пожаровзрывоопасных средах. Они широко применяются в химической, резинотехнической, текстильной, бумажной, полиграфической и других отраслях промышленности. При использовании радиоизотопных нейтрализаторов необходимо предусматривать надежную защиту людей, оборудования и выпускаемой продукции от вредного воздействия радиоактивного излучения.

Радиоизотопные нейтрализаторы чаще всего имеют вид длинных плоских пластинок (рис. 2.5) или маленьких дисков. Одна сторона их содержит радиоактивное вещество, создающее радиоактивное излучение, ионизирующее воздух. Чтобы не загрязнять воздух, продукцию и оборудование, радиоактивное вещество покрывают тонким защитным слоем из специальной эмали или фольги. Для защиты от механических повреждений ионизатор помещают в металлический кожух, который создает нужное направление ионизированного воздуха.

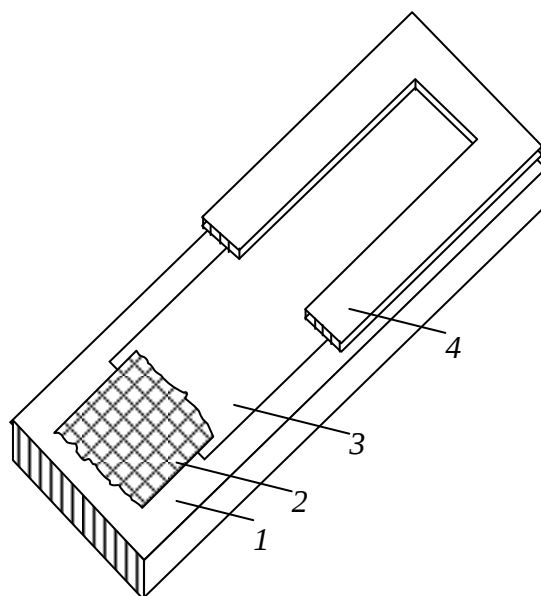


Рис. 2.5. Радиоизотопный нейтрализатор в виде полосы:
1 – основание; 2 – радиоизотопная фольга; 3 – защитная алюминиевая фольга;
4 – пластина, удерживающая фольгу

Радиоактивные вещества выбираются с учетом типа энергии, частиц излучения, длины их пробега, действия излучения на людей и т.д. В табл. 2.5 приведены данные о проникающей способности всех трех видов излучений.

Таблица 2.5

Излучение	Число пар ионов, создаваемых в 1 мм ³ воздуха	Проникающая способность частиц в воздухе, м
α -частицы или ядра гелия (радий-226, полоний-208, плутоний-238, 239 и 240)	600	0,1
β -частицы или электроны (гелий-204, стронций-90, криптон-85 и др.)	6	10
γ -лучи	0,1	600

Наиболее эффективны и безопасны радиоактивные вещества с α -частицами. Проникающая способность α -частиц в воздухе составляет до 10 см. В более плотных средах проникающая способность α -частиц еще меньше. Лист обычной писчей бумаги полностью ее поглощает.

Нейтрализаторы с таким излучением пригодны для локальной ионизации воздуха и нейтрализации зарядов в месте их образования. Там, где необходимо нейтрализовать электрические заряды в аппарате с большим объемом, лучше использовать β -излучатели. Среди β -излучателей широко распространены тритиевые источники. Подножки у них изготавливают из молибдена, нержавеющей стали или меди; на подножки наносят слой титана, насыщаемый тритием. Как видно из табл. 2.4, ионизирующая способность β -частиц в 100 раз меньше, чем у α -частиц. Однако они обладают большой проникающей способностью. Длина пробега β -частиц в воздухе исчисляется метрами, но в более плотных средах она поглощается сравнительно легко. Свинцовые защитные экраны толщиной 1,5 мм, стальные толщиной 3 мм или деревянные толщиной 20 мм полностью поглощают β -лучи. Радиоактивные вещества с γ -излучением из-за высокой проникающей способности и опасности для людей при нейтрализации электрических зарядов не применяются. Сравнительные характеристики различных типов нейтрализаторов, выпуск которых налажен в нашей стране, приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Нейтрализатор	Принцип действия	Длина рабочей части, мм	Максимальный ионный ток, А, на 1 см длины при $E = 200$ кВ/м
НР-1	α -излучение, плутоний 239	140	$1,2 \cdot 10^{-7}$
НРИ-1	Радиоактивно-индукционный	140	$5 \dots 10^{-5}$
НР-3	α -излучение, плутоний 239	210	$1,2 \cdot 10^{-7}$
НРИ-3	Радиоактивно-индукционный	210	$5 \cdot 10^{-5}$
НР-5	α -излучение, плутоний 239	350	$1,2 \cdot 10^{-7}$
НРИ-5	Радиоактивно-индукционный	350	$5 \cdot 10^{-5}$
НР-7	α -излучение, плутоний 239	800	$(0,6-0,9) \cdot 10^{-7}$
НР-8 до НР-14	То же	1000	$(0,3-0,6) \cdot 10^{-7}$
		1800	$(0,6-1,2) \cdot 10^{-7}$
НСЭ-350АТ-1	«	350	$0,6-10^{-7}$
НСЭ-200А	«	20	$0,5 \cdot 10^{-7}$
НСЭ-140АТ-1	«	140	$0,6 \cdot 10^{-7}$
НСЭ-1000Б	α -излучение, прометий-147	1000	$(0,2-0,4) \cdot 10^{-7}$
Тритиевые	β -излучение, тритий	—	$(0,5-1,2) \cdot 10^{-7}$

Основным недостатком радиоизотопных нейтрализаторов является малый ионизационный ток по сравнению с другими типами нейтрализаторов.

Для нейтрализации электрических зарядов могут использоваться комбинированные нейтрализаторы, например, сочетание высоковольтного и радиоизотопного, и индукционного. Подобные комбинации из двух типов нейтрализаторов позволяют улучшить их рабочие характеристики и увеличить эффективность. Подобные нейтрализаторы (например, типа НРИ) также выпускаются промышленностью (табл. 2.5).

Эффективность различных типов нейтрализаторов сравнивают по рабочим характеристикам (рис. 2.6). Рабочие характеристики выражают зависимость разряжающего ионизационного тока от величины потенциала заряженного тела.

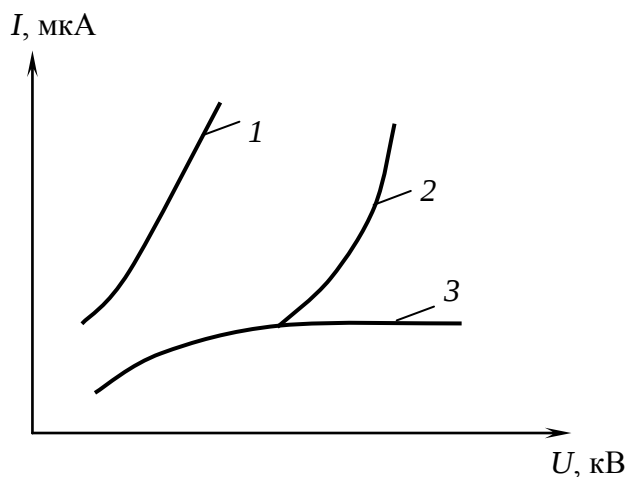


Рис. 2.6. Рабочие характеристики нейтрализаторов различных типов:

1 – высоковольтный; 2 – индукционный; 3 – радиоизотопный

Дополнительные способы уменьшения опасности от статической электризации

Рассмотренные способы уменьшения опасности статической электризации могут оказаться иногда малоэффективными или неприемлемыми во взрывоопасных производствах. Поэтому может возникнуть необходимость создания условий, исключающих образование взрывоопасных концентраций, например, применение в резервуарах плавающих крыш, заполнение свободного пространства в аппаратах азотом или углекислотой, применение постоянно действующей вентиляции с высокой кратностью обмена воздуха, а также автоматическое включение аварийной вентиляции и т.п.

Иногда удовлетворительные результаты дает подбор контактных пар, изменение отдельных операций или замена горючих жидкостей на негорючие. Опасность статической электризации легковоспламеняющихся и горючих жидкостей может быть значительно снижена или даже устранена, например уменьшением скорости потока v . Эффективность этого способа объясняется тем, что при ламинарном потоке степень электризации пропорциональна скорости движения и не зависит от диаметра трубопровода D_T , а при турбулентном потоке она пропорциональна скорости жидкости v в степени 1,75 и диаметру трубопровода в степени 0,75. При этом статическое электричество более интенсивно возникает в трубопроводах с шероховатой поверхностью.

Рекомендуется следующая скорость v диэлектрических жидкостей: при удельном сопротивлении $\rho \leq 10^5$ Ом·м принимают $v \leq 10$ м/с; $\rho > 10^5$ Ом·м – $v \leq 5$ м/с. Для жидкостей с $\rho > 10^9$ Ом·м скорость транспортировки и истечения устанавливается отдельно для каждой жидкости. Устанавливается такая скорость для данного диаметра трубопровода, при которой потенциал на поверхности жидкости в приемном сосуде не превосходил бы предельно допустимого. Безопасной для таких жидкостей обычно является скорость движения или истечения 1,2 м/с.

Для транспортировки жидкостей с $\rho > 10^{11}-10^{12}$ Ом·м со скоростью не менее 1,5 м/с рекомендуется применять релаксаторы (например, горизонтальные участки трубы увеличенного диаметра) непосредственно у входа в приемный резервуар. Необходимый диаметр D_p , м, этого участка определяется по формуле

$$D_p = 1,4 D_T \sqrt{v_T}. \quad (2.8)$$

Длина релаксатора L_M определяется по формуле

$$L \geq 2,2 \cdot 10^{-11} E_p, \quad (2.9)$$

где E – диэлектрическая проницаемость жидкости.

При заполнении резервуара жидкостью с $\rho > 10^5$ Ом·м до момента затопления загрузочной трубы рекомендуется сначала подавать ее со скоростью не более 1 м/с, а затем со скоростью, соответствующей удельному сопротивлению, как было указано выше.

При использовании релаксаторов в современных крупнотоннажных производствах необходимо иногда увеличивать скорость жидкости в трубопроводе до 4–5 м/с. Диаметр, рассчитанный по формуле (2.8), оказывается непомерно большим. Поэтому для увеличения эффективности релаксатора рекомендуется применять их со струнами (рис. 2.7) или иглами (рис. 2.8). Это позволяет использовать эффект увеличения электропроводности органических жидкостей в сильном электрическом поле.

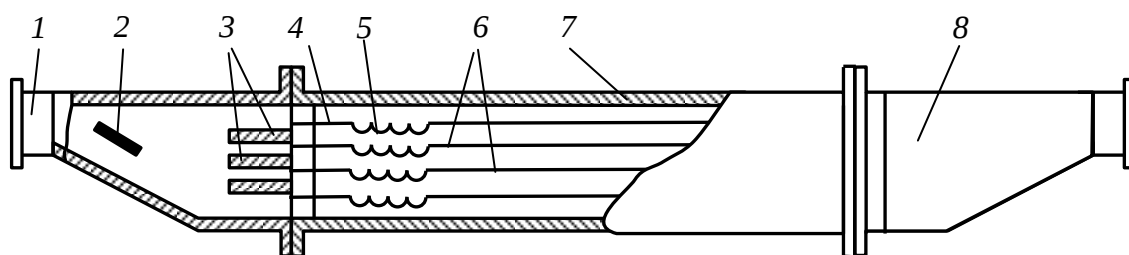


Рис. 2.7. Схема релаксатора со струнами:

1 – входной конический переход; 2 – рассеивающая пластина; 3 – направляющие пластины; 4 – вертикальные пластины для крепления струн; 5 – натяжные пружины; 6 – струны; 7 – корпус релаксатора; 8 – выходной конический переход

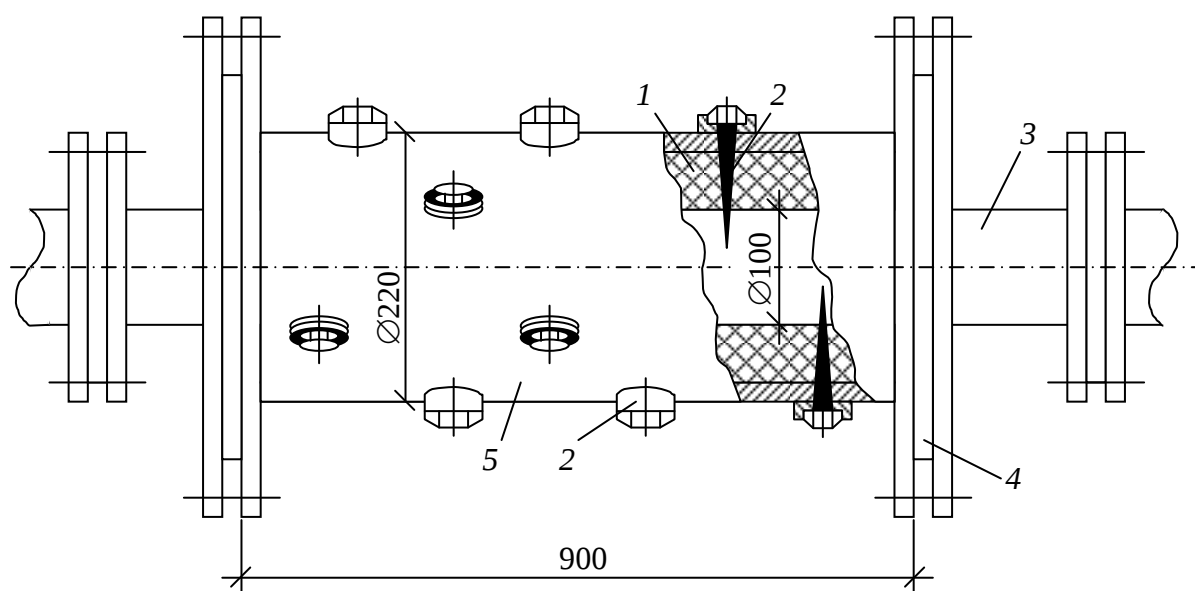


Рис. 2.8. Схема нейтрализатора с иглами:

1 – изоляционная труба; 2 – иглы (16-18 шт.); 3 – переходник; 4 – изоляционная прокладка; 5 – корпус нейтрализатора

В первом случае внутри релаксатора и вдоль его оси натягиваются заземленные струны, что более чем на 50 % уменьшает ток электризации. Тот же эффект используют в релаксаторе (рис. 2.8), когда в поток жидкости вводят заземленные острия для того, чтобы из него отвести заряды.

Релаксатор состоит из толстостенной изоляционной трубы (полиэтилен, фторопласт) с установленными на ней заземленными игольчатыми электродами. Внутренние диаметры трубы и основного трубопровода одинаковы. Электрическое поле, созданное зарядами жидкости, концентрируется у острия иглы. У электродов поле значительно увеличивается (в результате адсорбции ионов на диэлектрических стенках релаксатора), и напряженность его у острия может значительно превысить 30000 кВ/м, что приведет к резкому возрастанию удельной электропроводности.

Максимально допустимые и безопасные (в отношении возможности воспламенения паров жидкости в промышленном резервуаре) режимы транспортировки нефтепродуктов по длинным трубам диаметром 100–250 мм могут быть оценены по соотношению

$$v_T^2 D_T \leq 0,64, \quad (2.10)$$

где v_T – линейная скорость жидкости в трубе, м/с; D_T – диаметр трубы, м.

При наличии в магистрали трубопровода, фильтров, сепараторов и другого технологического оборудования, расположенного на небольшом расстоянии от приемного резервуара, режим транспортировки нефтепродуктов выбирается из условия, чтобы плотность заряда в резервуаре не превышала 30 мкКл/м³ при электропроводности жидкости 0,5 пкСм.

За последние годы были проведены серьезные теоретические и экспериментальные исследования по оценке электростатической безопасности при технологических операциях заполнения резервуаров нефтепродуктами [31].

Исследования позволили дать практические рекомендации [32] по режимам налива светлыми нефтепродуктами стационарных резервуаров и железнодорожных цистерн. Рекомендации позволяют предотвращать аварийные ситуации от разрядов статического электричества в ходе наливных операций путем ограничения скорости заполнения резервуаров до величины, при которой образующийся в нефтепродукте заряд

статического электричества создает в резервуаре или железнодорожной цистерне электрическое поле, недостаточное для возникновения опасного искрообразования (по технологической схеме, не содержащей фильтров тонкой очистки, нефтепродукт не должен содержать эмульсионную воду и мелкодисперсные частицы).

Ниже приводятся примеры технологических схем заполнения железнодорожных цистерн (рис. 2.9) и резервуаров (рис. 2.10) светлыми нефтепродуктами. Примеры допустимых режимов заполнения железнодорожных цистерн и резервуаров светлыми нефтепродуктами приводятся в работе [4].

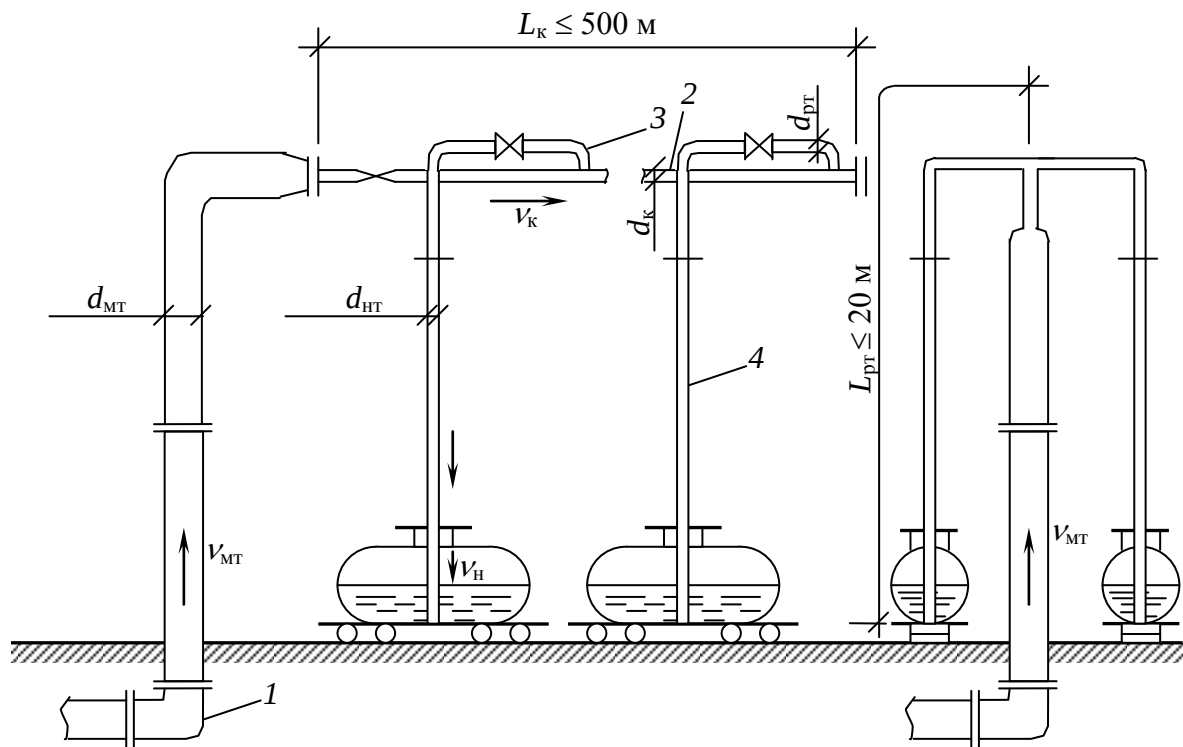


Рис. 2.9. Технологическая схема заполнения железнодорожных цистерн светлыми нефтепродуктами на наливной эстакаде:

1 – магистральный трубопровод, $d_{MT} = 400...700$ мм; 2 – коллектор, $d_K = 200-600$ мм;

3 – раздаточный трубопровод, $d_{PT} = 100$ мм; 4 – наливная труба, $d_{HT} = 100$ мм;

L_K – длина коллектора; L_{PT} – суммарная длина раздаточного трубопровода и наливной трубы; v_{MT} – скорость продукта в магистральном трубопроводе; v_K – скорость продукта в коллекторе; v_H – скорость продукта в наливной трубе

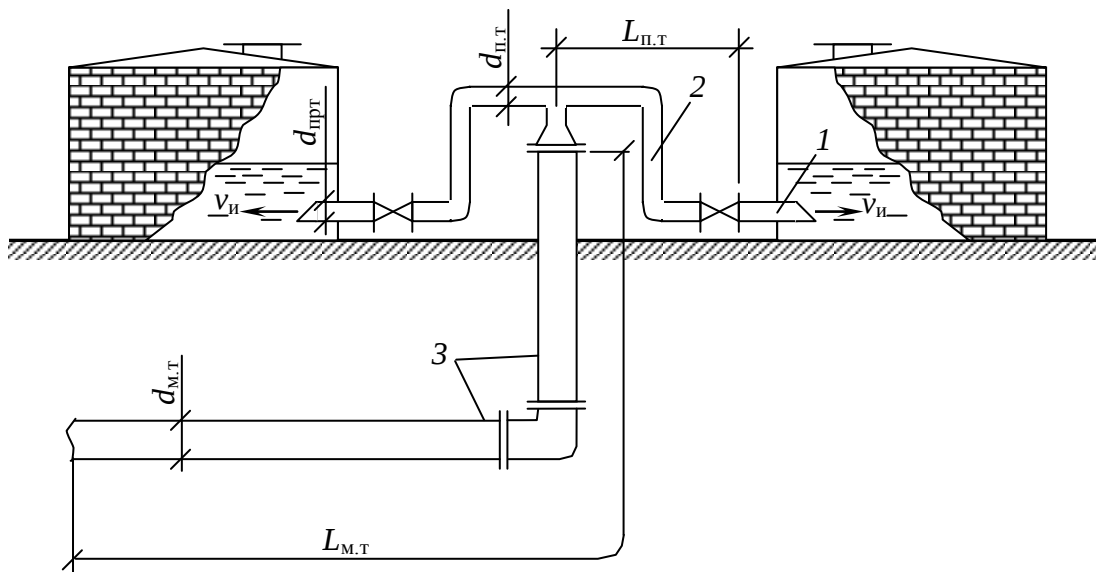


Рис. 2.10. Технологическая схема заполнения стационарных резервуаров светлыми нефтепродуктами на нефтеперерабатывающих заводах:

1 – приемно-раздаточный трубобок; 2 – подводящий трубобок; 3 – магистральный трубопровод; $d_{м.т}$ – диаметр магистрального трубопровода; $d_{прт}$ – диаметр приемно-раздаточного трубопровода; $d_{п.т}$ – диаметр проводящего трубопровода; $v_{и}$ – скорость истечения нефтепродукта в резервуар; $L_{м.т}$ – длина магистрального трубопровода; $L_{п.т}$ – длина проводящего трубопровода

Допустимые режимы заполнения вертикальных цилиндрических резервуаров с понтоном или плавающей крышей ограничиваются не только электризацией нефтепродукта, но и допустимой скоростью движения понтона или плавающей крыши, равной скорости поднятия уровня нефтепродукта в резервуаре. Если допустимая безопасность поднятия уровня в резервуаре по условиям электростатической безопасности превышает 0,6 м/ч в основной стадии и 2,5 м/ч в начальной, то производительность закачки нефтепродукта в резервуар следует ограничить до величин, соответствующих допустимым скоростям движения понтона или плавающей крыши.

Для определения *допустимых режимов заполнения железнодорожных цистерн* на наливных эстакадах по технологической схеме (рис. 2.9) выбирают диаметр магистрального трубопровода $d_{м.т}$, диаметр коллектора $d_{к}$ и диаметр наливной трубы $d_{н.т}$.

Для определения допустимой производительности P , м³/ч, заполнения конкретного резервуара по технологической схеме (рис. 2.10) выбирают минимальный диаметр трубы $d_{\text{м.т. min}}$, входящей в состав магистрального трубопровода и диаметр подводящего трубопровода $d_{\text{п.т}}$ [4]. Для выбранных значений диаметров определяются допустимые режимы заполнения стационарных резервуаров. Допустимые режимы заполнения для вертикальных резервуаров вместимостью 100–10000 м³ и горизонтальных вместимостью 3–200 м³ приводятся в рекомендациях [31, 32].

В ряде случаев подбор материала контактирующих поверхностей уменьшает интенсивность генерации зарядов статического электричества. При этом можно рекомендовать, например, изготовление взаимодействующих поверхностей из однородного материала.

Следует исключить возможность загрязнения диэлектрических жидкостей коллоидными частицами. При сливе жидкости нельзя перемешивать, распылять или разбрызгивать; при наливе жидкости в резервуары, цистерны и тару сливная труба должна опускаться почти до дна приемного сосуда; свободно падающая струя вообще не допускается. Жидкости должны поступать в резервуар ниже уровня имеющегося в нем остатка жидкости.

При операциях с сыпучими и мелкодисперсными материалами снижения опасности от статической электризации можно достичь следующими мерами: при их пневмотранспортировке рекомендуются трубы из полиэтилена или трубы из того же материала (или близкого по составу транспортируемому веществу); относительная влажность воздуха на выходе из пневмотранспорта должна быть не менее 65 % (если это неприемлемо, рекомендуется ионизировать воздух или применять инертный газ). Следует избегать возникновения пылевоздушных горючих смесей, не допускать падения или сброса пыли, ее всхлобливания или завихрения. Необходимо очищать оборудование и конструкции здания от осевшей пыли.

При операциях с горючими газами необходимо следить за их чистотой, отсутствием на пути их движения незаземленных частей оборудования или приборов.

Замена горючих средств на негорючие. Хороший эффект по условиям пожаро- и взрывобезопасности не только от искр статического электричества, но и от всех других источников зажигания достигается путем замены органических растворителей и ЛВЖ на негорючие. Тем более если замена горючих сред на негорючие не нарушает нормального хода технологического процесса и экономически целесообразна.

Из органических растворителей для промывки и обезжиривания деталей чаще всего применяют бензин и керосин, которые наряду с хорошей растворяющей способностью обладают большой пожароопасностью, низкими температурами вспышки и воспламенения, широким диапазоном пределов воспламенения, склонностью к электризации. Опасность усугубляется еще и тем, что при процессах обезжиривания и промывки в открытых аппаратах над поверхностью этих жидкостей образуется взрывоопасная смесь даже при нормальной температуре.

Для химического обезжиривания рекомендуются негорючие составы [4], представленные в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Компоненты	Содержание компонентов (г/л воды) в составах						
	Для черных металлов			Для меди и ее сплавов		Для алюминия и его сплавов	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
NaOH и KOH	80-100	100-150	20-30	–	–	–	3–5
Фосфорнокислый натрий трехзамещенный	30–40	–	70–80	30–35	80–100	20–25	2–4
Натрий углекислый	–	30–50	–	20–25	–	20–25	40–50
Жидкое стекло	–	3–5	5–8	5–10	10–15	–	20–30
Эмульгаторы ОП-7 или ОП-10	–	5–7	5–7	3–5	–	5–7	–

Примечание. Обезжиривание проводят при 70–80 °С в течение 10–15 мин, раствор перемешивается сжатым воздухом.

Разработан ряд составов, предназначенных для замены ЛВЖ и ГЖ на операциях: очистки деталей от паст, суспензий, веретенного масла, нагара, коррозии; расконсервации, мойки деталей и агрегатов машин; отмыкания поверхностей от нефтепродуктов, очистки резервуаров под смену грузов и производства в них ремонтных работ с применением открытого огня и т.п.

Характеристика составов, области применения и режимы обезжиривания описаны в работе [33].

2.5. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества

Нормальная эксплуатация и поддержание всех устройств защиты от разрядов статического электричества в исправном состоянии являются важным звеном в обеспечении пожаро- и взрывобезопасности на химических, нефтехимических и других производствах.

Согласно действующим правилам [6], ответственность за исправность устройств защиты от статического электричества в цехе возлагается на начальника цеха, а по заводу – на главного энергетика. Осмотр и текущий ремонт защитных устройств необходимо производить одновременно с осмотром и текущим ремонтом всего технологического и электро-технического оборудования.

Заземляющие устройства нужно контролировать при помощи приборов не реже одного раза в год. Результаты ревизии и ремонта защитных устройств заносятся в специальный журнал.

Для каждого цеха (с учетом специфических особенностей) в технологические инструкции или инструкции по технике безопасности должны быть включены разделы «Защита от статического электричества» и «Эксплуатация устройств защиты от статического электричества».

Электрические нейтрализаторы должны эксплуатироваться в соответствии с прилагаемыми к ним Правилами технической эксплуатации или Инструкциями по эксплуатации и правилами [34].

Установка и эксплуатация радиоактивных нейтрализаторов должна производиться в соответствии с инструкциями на них. Радиоактивные нейтрализаторы других конструкций допускаются к применению, если отвечают требованиям [35, 36, 37].

Профилактические осмотры и ремонты радиоизотопных нейтрализаторов целесообразно выполнять, прибегая к услугам специализированных организаций, например специализированного управления по монтажу и наладке радиоактивной техники.

При расширении и реконструкции производства следует проверить наличие, достаточность и эффективность действующих устройств защиты от статического электричества и, при необходимости, внести соответствующие изменения.

Устройства защиты от статического электричества (нейтрализаторы, заземления и др.) принимаются в эксплуатацию одновременно с приемкой технологического и энергетического оборудования.

При приемке средств защиты в эксплуатацию должны быть представлены проекты, акты на скрытые работы, исполнительные схемы, протоколы замеров сопротивлений заземляющих устройств и инструкция по эксплуатации.

ГЛАВА 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Обобщенным показателем эффективности молниезащиты и защиты от статического электричества является

$$C_{\text{макс}} = (C_{\text{пр}} / C_{\text{з}}) \eta, \quad (3.1)$$

где $C_{\text{макс}}$ – обобщенный показатель эффективности применения защиты; $C_{\text{пр}}$ – результат применения защиты; $C_{\text{з}}$ – суммарные затраты на защиту; η – показатель, учитывающий социальные аспекты защиты, $\eta > 1$.

Защиту можно считать целесообразной при $C > 1$. Результат применения защиты характеризуется математическим ожиданием предотвращенного ущерба:

$$C_{\text{пр}} = C_0 P_{\text{экстр}} P_{\text{пз}}, \quad (3.2)$$

где C_0 – общая стоимость защищаемых материальных ценностей; $P_{\text{экстр}}$ – вероятность возникновения экстремальной пожаровзрывоопасной ситуации; $P_{\text{пз}}$ – вероятность того, что применяемая защита предотвратит пожар или взрыв; α – коэффициент, характеризующий степень убытка от общей стоимости C_0 в случае пожара или взрыва.

Стоимость защищаемых материальных ценностей, как правило, известна.

Вероятность возникновения пожаровзрывоопасной ситуации может быть определена на основании статистических данных. Коэффициент $\alpha = 1$ в том случае, когда возникший пожар или взрыв уничтожает все защищаемые материальные ценности; $\alpha < 1$ в случаях, когда материальные ценности уничтожаются частично. Он определяется или устанавливается для каждого объекта или группы характерных объектов.

Вероятность того, что применяемая защита предотвратит пожар или взрыв, зависит от характеристик технических решений защиты и степени ее соответствия для заданного объекта:

$$P_{\text{пз}} = K_{\Gamma} \cdot K_C, \quad (3.3)$$

где K_{Γ} – коэффициент готовности защиты; K_c – коэффициент соответствия выбранной защиты заданному объекту по требованиям, обеспечивающим предотвращение пожара или взрыва.

В свою очередь,

$$K_{\Gamma} = T_{\text{н.о}} / (T_{\text{н.о}} + T_{\text{в}}), \quad (3.4)$$

где $T_{\text{н.о}}$ – время наработки на отказ защиты; $T_{\text{в}}$ – время восстановления отказа защиты.

Более высокий коэффициент готовности защиты дает возможность с большей вероятностью предотвратить пожар или взрыв, следовательно, и ущерб.

$$C_y = C_{y.c} \cdot (n_1 T_{\text{в1}} - n_2 T_{\text{в2}}), \quad (3.5)$$

где C_y – стоимость ущерба от простоя защиты; $C_{y.c}$ – стоимость убытков, приходящихся на единицу времени неработоспособного состояния защиты; n_1, n_2 – число отказов для первого и второго коэффициентов готовности ($K_{\Gamma1}, K_{\Gamma2}$); $T_{\text{в1}}, T_{\text{в2}}$ – время восстановления защиты для $K_{\Gamma1}$ и $K_{\Gamma2}$ соответственно.

На практике редко удастся подобрать такие технические средства защиты, при которых предотвращение пожара или взрыва зависит только от коэффициента их готовности. Поэтому коэффициент соответствия чаще всего меньше единицы.

Характерным примером, подтверждающим на практике, что $K_c < 1$, может быть применение для защиты электроустановок различных аппаратов защиты, которые, как известно, имеют дискретный ряд нормированных порогов с определенным шагом.

По-видимому, лишь для молниезащиты возможно достичь $K_c = 1$ за счет введения избыточности защиты. Однако такой подход едва ли можно распространить на все объекты. Для электроустановок избыточность защиты во многих случаях применить вообще невозможно, так как это может привести к экономически неоправданным остановкам электрооборудования.

Учитывая, что в настоящее время отсутствует научно обоснованный подход к выбору K_c , для расчетов следует пользоваться ориентировочными значениями, исходя из опыта эксплуатации тех или иных объектов.

Суммарные затраты на защиту составят:

$$C_3 = C_{\text{ТСЗ}} + C_{\text{М}} + C_9, \quad (3.6)$$

где $C_{\text{ТСЗ}}$ – затраты на приобретение технических средств защиты; $C_{\text{М}}$ – стоимость монтажных работ; C_9 – стоимость эксплуатации защиты в течение заданного времени.

Значение $C_{\text{ТСЗ}}$ и $C_{\text{М}}$ определяются на основании соответствующих прейскурантов и каталогов цен покупных изделий и монтажных работ.

Эксплуатационные расходы равны

$$C_3 = C_{\text{П}} + C_p n, \quad (3.7)$$

где $C_{\text{П}}$ – стоимость профилактических работ, предупреждающих отказы; C_p – стоимость восстановления одного отказа защиты; n – число отказов.

Повышение K_{Γ} приводит к снижению стоимости текущего ремонта при эксплуатации за счет снижения числа отказов $(n_1 - n_2) < n$.

Следовательно,

$$C_9 = C_{\text{П}} + C_p (n_1 - n_2) \quad (3.8)$$

при

$$n_1 = 1/T_1 = \lambda_1 \tau \quad n_2 = 1/T_2 = \lambda_2 \tau,$$

где λ_1, λ_2 – соответственно интенсивности отказов, соответствующие $K_{\Gamma 1}$ и $K_{\Gamma 2}$; τ – рассматриваемый промежуток времени.

Важным для оценки эффективности молниезащиты и защиты от статического электричества является показатель, учитывающий социальные аспекты защиты: опасность пожаров и взрывов для жизни людей и влияние их на моральное состояние людей, как правило, снижающее их общественную активность и производительность труда.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что представляет собой молния?
2. Какие атмосферные процессы предшествуют появлению разряда молнии?
3. Условия возникновения молнии.
4. Назовите электрические характеристики разряда молнии.
5. Какой вид молнии представляет наибольшую опасность для зданий, сооружений, подстанций и линий электропередач?
6. Какие воздействия на объекты может оказать прямой удар молнии?
7. Классификация объектов по устройству молниезащиты.
8. Как определяется надежность защиты объектов от прямых ударов молнии?
9. Назовите характеристики для оценки возможного числа поражений объектов молнией.
10. Для чего предназначены внутренние устройства молниезащиты?
11. Назовите элементы внешней молниезащитной системы.
12. Основные требования молниезащиты.
13. Конструктивное выполнение молниеотводов.
14. Из каких материалов выполняются опоры для молниеотводов?
15. Какие конструктивные элементы зданий и сооружений используют в качестве естественных молниеприемников?
16. Какие условия необходимо соблюдать при размещении токоотводов в устройстве молниезащиты?
17. Классификация заземлителей молниезащиты.
18. Что понимают под зоной защиты молниеотвода?
19. Назовите основные виды молниеотводов.
20. От каких факторов зависит возникновение статического электричества?
21. От каких факторов зависит степень электризации нефтепродуктов?
22. При каких условиях статического электричество может вызвать воспламенение взрывоопасной смеси?
23. Какая обувь считается электропроводящей?
24. Какие материалы принимают для электропроводящего покрытия пола?
25. Принцип действия квадратного электрометра.
26. Устройство и принцип работы электронного электрометра. Область применения.

27. Способы устранения опасности от статического электричества.
28. В чем заключается сущность ионизации воздуха как способа защиты от статического электричества?
29. Назовите основные типы нейтрализаторов.
30. Принцип действия индукционных нейтрализаторов.
31. Принцип действия радиоизотопных нейтрализаторов.
32. Кто несет ответственность за исправность устройств защиты от статического электричества на производстве?
33. Какие показатели используют для оценки эффективности молниезащиты и защиты от статического электричества?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черкасов В.Н., Костарев Н.П. Пожарная безопасность электроустановок. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002.
2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Литвинов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.
4. Черкасов В.Н. Защита пожаро- и взрывоопасных зданий и сооружений от молнии и статического электричества. – М.: Стройиздат, 1993.
5. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникации СО 153-34.21.122-2003.
6. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1973.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
8. Чернов К.П. Молниезащита. – Казань: КГЭУ, 2009.
9. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» Изменение №1 введено 9 декабря 2010 г. № 643.
10. ГОСТ 12.1.011-78 Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний.
11. ГОСТ 12.2.020-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Термины и определения. Классификация. Маркировка.
12. ГОСТ Р 51330.0-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования.

13. ГОСТ Р 51330.11-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазором и минимальным воспламеняющим токам.

14. ГОСТ Р 51330.17-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 18. Взрывозащита вида «герметизация компаундом (*m*)».

15. ГОСТ Р 51330.14-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 15. Защита вида *n*.

16. ГОСТ Р 51330.1-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Взрывонепроницаемая оболочка *d*.

17. ГОСТ Р 51330.7-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 6. Масляное заполнение оболочки *o*.

18. ГОСТ Р 51330.6-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 5. Кварцевое заполнение оболочки *q*.

19. ГОСТ Р 51330.3-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 2. Заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением *p*.

20. ГОСТ Р 51330.13-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 14 Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок).

21. ГОСТ Р 51330.16-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 17. Проверка и техническое обслуживание электроустановок во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок).

22. СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства.

23. НПБ 111-98*. Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности. – М.: ГУГПС МВД России, 1998.

24. Изменения и дополнения, внесенные в правила пожарной безопасности Российской Федерации (ППБ 01-93). – М.: ГУГПС, ВНИИПО МВД России, 1998.

25. ППБ 01-93. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. – М.: ГУГПС МВД России, 1993.

26. ГОСТ 12.2.020-76. Электрооборудование взрывозащищенное. Термины и определения. Классификация. Маркировка.

27. ГОСТ 22782.0-81. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний.

28. ГОСТ 22782.3-77. Электрооборудование взрывозащищенное со специальным видом взрывозащиты.

29. ГОСТ Р 50913-96. Автомобильные транспортные средства для транспортирования и заправки нефтепродуктов.

30. ГОСТ 12.01.18-86. Статическое электричество. Искробезопасность. Общие требования.

31. Электрическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами / Б.К. Максимов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

32. Рекомендации по режимам налива светлыми нефтепродуктами стационарных резервуаров и железнодорожных цистерн на нефтеперерабатывающих заводах. – М.: ХОЗУ Миннефтехимпрома СССР, 1988.

33. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. – М.: Энергия, 1978.

34. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Госэнергоиздат, 1994.

35. Санитарные правила по устройству и эксплуатации радиоизотопных нейтрализаторов статического электричества с эмалевыми источниками α -и β -излучения № 879-71.

36. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, № ОСП-72.

37. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1. МОЛНИЕЗАЩИТА.....	4
1.1. Молния и ее характеристики	4
1.2. Пожаро- и взрывоопасность воздействия молнии	11
1.3. Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты	22
1.4. Молниеотводы	33
1.5. Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии (ПУМ) .	55
1.6. Защита зданий и сооружений от вторичных воздействий молнии	64
1.7. Эксплуатация устройств молниезащиты.	66
ГЛАВА 2. ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА	69
2.1. Общие представления об электризации	69
2.2. Воспламеняющая способность искр статического электричества и его физиологическое воздействие на организм человека	72
2.3. Приборы для измерения параметров статического электричества	76
2.4. Способы устранения опасности статического электричества	79
2.5. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества	103
ГЛАВА 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЙ МОЛНИЕ-ЗАЩИТЫ И ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ..	104
Вопросы для самоконтроля	107
Библиографический список.	108

Учебное издание

Аверьянова Юлия Аркадьевна

Защита производственных объектов от молнии и статического электричества

Учебное пособие
по дисциплине
«Безопасность жизнедеятельности»

Кафедра безопасности жизнедеятельности КГЭУ

Редактор *К.В. Аришинова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 27.02.13.

Формат 60×84/16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 6,56. Уч.-изд. л. 7,29. Тираж 500 экз. Заказ 4592

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51