

насов

**ЗАЩИТА**

**ВЗРЫВООПАСНЫХ**

**СООРУЖЕНИЙ**

**ОТ МОЛНИИ**

**И СТАТИЧЕСКОГО**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**



В. Н. Черкасов

# ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ МОЛНИИ И СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Издание 3-е, переработанное и дополненное



Москва Стройиздат 1984

Таблица 2. Минимальная энергия, необходимая для воспламенения некоторых паро- и газозвудушных смесей (при давлении 1 атм и температуре 20 °С)

Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения, мДж	Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения, мДж
Ацетилен	0,11	Метиловый спирт	0,6
Ацетон	0,25	Окись углерода	8,0
Бензол	0,2	Окись этилена	0,06
Бутан	0,25	Пропан	0,26
Бутилацетат	0,5	Сероводород	0,077
Бутиловый спирт	0,5	Сероуглерод	0,009
Водород	0,011	Циклогексан	0,22
Гексан	0,24	Циклопропан	0,17
Гептан	0,24	Этан	0,24
Диоксан	0,9	Этилацетат	0,48
Диотилловый спирт	1,5	Этиловый спирт	0,14
Диотилловый эфир	0,19	Этиловый эфир	0,45
Метан	0,28		

Таблица 3. Минимальная энергия, необходимая для воспламенения некоторых пылевоздушных смесей

Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения, мДж	Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения, мДж
Алюминий	20	Поливиниловая смола	160
Ацетилцеллюлоза	10	Полиметилметакрилат	17
Ацетилцеллюлозная пресс-масса	10	Полиэтилен	80
Гексаметилентетрамин	10	Пропианат целлюлозы	60
Древесная мука	20	Резина из синтетического каучука	30
Инден-кумароновая смола	10	Сера	10
Казеин	60	Снеарат алюминия	10
Магниевая смола	20	Уголь	40
Магний	15	Фенольная пресс-масса	10
Метилметакрилат	105	Фенольная смола	10
Оксибензальдегид	15	Ферромарганец	250
Поливинилбутироль	8,8	Цинк	100
		Цирконий	15
		Шеллак	10

Рецензент: руководитель группы Государственного научно-исследовательского энергетического института им. Г. М. Кржижановского *Н. С. Берлина*

**Черкасов В. Н.**

Ч—48 Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат. 1984. — 80 с., ил.

80 с., ил.

Приведены понятия о молнии, пожаро- и взрывоопасности ее воздействия, классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты от прямых ударов и вторичных воздействий молнии. Обобщены результаты исследования зон взрывоопасности и вопросы молниезащиты, а также эксплуатации молниезащитных устройств. Освещены вопросы возникновения зарядов статического электричества, указаны приборы для измерения параметров и способы воздействия статического электричества. Даны сведения об эксплуатации устройств защиты от разрядов статического электричества.

Для инженерно-технических работников проектных и эксплуатационных организаций, пожарной охраны.

Ч 2302010000—212 42—84  
047(01)—84

ББК 31.247  
6П2.13

**Владимир Николаевич Черкасов**

**ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
ОТ МОЛНИИ И СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Редакция литературы по жилищно-коммунальному хозяйству

Зав. редакцией В. И. Киселев

Редактор А. М. Докучаев

Мл. редактор Г. А. Морозова

Технические редакторы Н. Г. Новак, Ю. Л. Цыганкова

Корректор Н. А. Беляева

ИБ № 3533

Сдано в набор 15.02.84. Порписано в печать 23.06.84. Т-16873.  
Формат 84×108<sup>1/2</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура «Литературная».  
Печать высокая. Усл. печ. л. 4,20. Усл. кр.-отт. 4,51. Уч.-изд. л. 6,02.  
Тираж 40.000 экз. Изд. № AVI—497. Заказ 715. Цена 30 коп.

Стройиздат 101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли.  
103051, Москва, Цветной бульвар, 26.

© Стройиздат, 1973  
© Стройиздат, 1984, с изменениями

## Предисловие

XXVI съезд КПСС в своих исторических решениях поставил конкретные задачи по дальнейшему развитию отраслей промышленности на основе всемерного использования достижений научно-технического прогресса. Большое значение при решении этих задач должно уделяться и безопасности производства, особенно в тех отраслях, где условия технологических процессов, применение горючих и легковоспламеняющихся жидкостей и газов создают повышенную пожаро- и взрывоопасность, наносящую иногда материальный ущерб народному добру.

Все это требует дальнейшего совершенствования, разработки нормативных и проектно-эксплуатационных решений, исключающих возможность возникновения пожаров (взрывов) от любых причин, в том числе от поражения разрядами молний и статического электричества, что иногда приводит к значительным убыткам, увечьям или человеческим жертвам.

Взрывоопасные здания и наружные взрывоопасные 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.

В книге обобщены данные по вопросам защиты взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества исходя из накопленного за последние десять лет нормативно-проектного и эксплуатационного опыта.

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  $\sigma^-$  — при существовании электрического поля земли с напряженностью  $E_n$ . Второй «обкладкой» этого сферического конденсатора является положительно заряженная ионосфера, расположенная очень высоко (рис. 1). Под действием  $E_n$  падающая капля поляризуется, в нижней ее части появляется положительный заряд, в верхней — отрицательный. Движущаяся в восходящем потоке воздуха электроны притягиваются нижней частью капли, а более инерционные положительные ионы воздуха отталкиваются и уносятся далее, сосредоточиваясь вверху. В результате этого капли получают суммарный отрицательный заряд и наполняют нижнюю

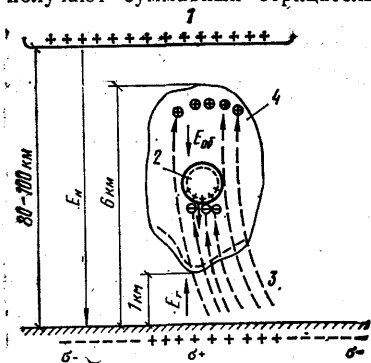


Рис. 1. Образование зарядов в облаке

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

30 кВ/см у его выступающих частей. Этому благоприятствует меньшая плотность воздуха вокруг облака, чем плотность у земли.

Исследованиями в Советском Союзе и за рубежом выявлены условия возникновения молнии и ее характеристики. Для равнинных районов делают различие между разрядами молнии непосред-

ственно в облаке 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  $\sigma^+$  и появляется местное грозовое электрическое поле с напряженностью  $E_g$ , достигающей иногда 100—200 кВ/м.

Разряд облака на землю (рис. 2) имеет вид линейной молнии и начинается в большинстве случаев при высокой концентрации в нем зарядов и напряженности  $E_g = 20$ —

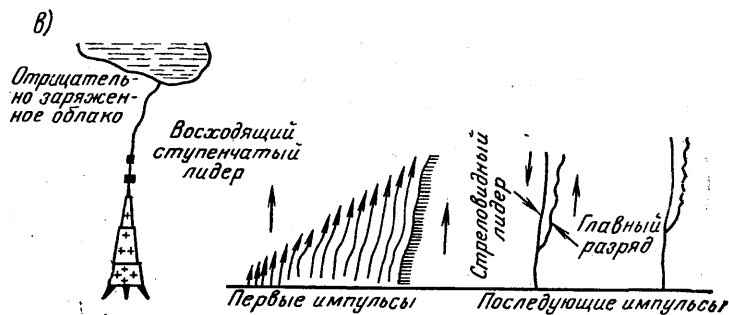
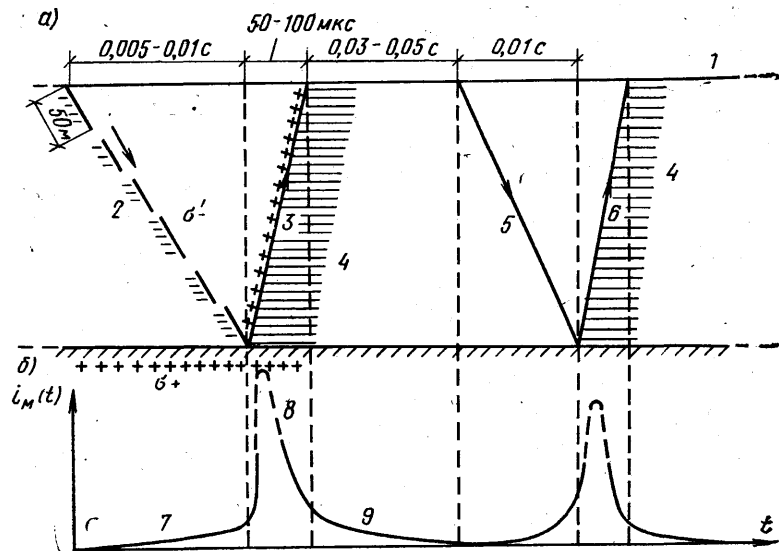


Рис. 2. Разряд облака на землю

а — оптическая осциллограмма (запись на движущейся слева направо фотопленке); б — кривая тока молнии; 1 — точка в облаке, из которой развивается разряд; 2 — ступенчатый лидер; 3 — главный разряд; 4 — послесвечение; 5 — стреловидный лидер; 6 — последующая компонента; 7 — ток лидера; 8 — ток главного разряда; 9 — ток послесвечения; в — оптическая картина восходящего разряда в вершину высокой башни

ственно 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.

Нисходящий разряд между облаком и землей разделяется на лидерный и главный разряд. Он обычно начинается с прорастания от облака к земле слабосветящегося канала — ступенчатого лидера (рис. 2, а), движущегося прерывисто (ступенями). Длина каждой ступени около 50 м, средняя скорость ее распространения составляет (2—5)  $10^8$  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  $(1-2)10^5$  м/с. Приближение его к земле обуславливает возрастание электрической напряженности на его головке, канал лидера заполняется отрицательным зарядом с линейной плотностью  $\sigma$ . Возрастает и плотность индуцированных зарядов  $\sigma+$  на земле или на ближайших выступающих объектах. Ток в лидере нарастает постепенно (кривая 7 на рис. 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 [1], поэтому встречный лидер имеет важное значение в развитии молнии. Им формируется завершающий участок траектории и в значительной степени предопределяется место поражения. Когда головка ступенчатого лидера соприкоснется с землей или встречным лидером, возникает главный разряд 3 (см. рис. 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 направляется снизу вверх и протекает весьма быстро (за 50—100 мкс). Наиболее вероятная скорость развития главного заряда равна  $\frac{1}{3}$  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 (кривая 8 на рис. 2, б) достигает большой величины (десятки и сотни кА за 50—100 мкс) и способен разогреть канал до температуры около 20 000—35 000°C. Вокруг него образуется ионизированная область, исчезающая после окончания главного разряда через 0,03—0,05 с. Образуется ток послесвечения 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 5 (рис. 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% среднее число компонент на один разряд молнии составляет 2—3, а в 45% — одну компоненту. Изредка наблюдаются молнии со значительно большим числом компонент. Общая продолжительность многокомпонентной нисходящей молнии достигает 0,2—0,3 с (50% случаев), но наблюдалась и длительность ее до секунды. Приносимый на землю отрицательный заряд может составлять 10—30 Кл. Им и пополняется общий заряд земли. Отрицательная

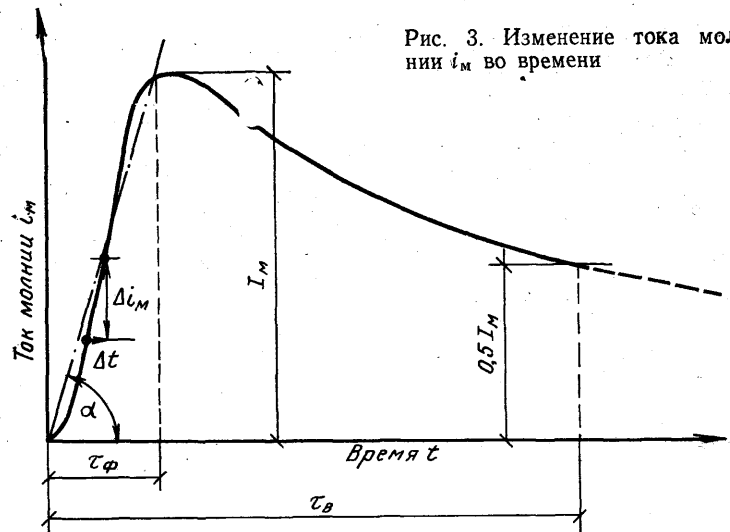


Рис. 3. Изменение тока молнии  $I_M$  во времени

молния изучена более полно, ее параметры известны с большей достоверностью.

При разрядах в объекты значительной высоты (сотни метров) обнаруживаются существенные различия первого импульса и завершающего разряда. В этом случае он начинается с прорастания восходящего лидера от вершин заземленных сооружений (рис. 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  $h_x \geq 200$  м оно составляло 24%, а при  $h_x \geq 380$  м — 96%). В горах соотношение между восходящими и нисходящими разрядами изменяется в сторону увеличения

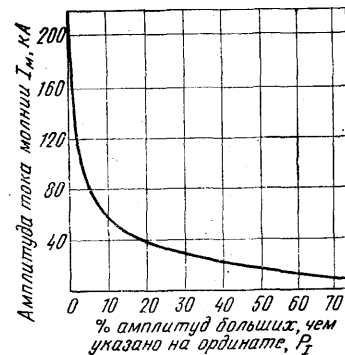


Рис. 4. Кривая вероятности амплитуд токов молнии (для высоты над уровнем моря менее 500 м)

первых. Лидер последующих компонент восходящих молний всегда продвигается по направлению к земле, поэтому их структура не отличается от структуры последующих компонент нисходящей молнии.

Наибольшую опасность представляет нисходящая отрицательная молния между облаком и землей (объектом) в виде линейной молнии, с чем связано подавляющее большинство повреждений зданий, сооружений, линий электропередач, подстанций. Таким образом, для молниезащиты представляет интерес только линейная молния, а не шаровая, как редкое явление. Электрическими характеристиками молнии являются амплитуда тока  $I_m$  (наибольшее значение тока главного разряда первой компоненты), крутизна тока  $a$ , длина фронта волны тока  $t_f$  и длина волны тока  $t_w$  (рис. 3). Они важны при расчете различных воздействий молнии. Наиболее полно характеристики молнии (на обобщении и анализе мировых данных) приведены в работе [1].

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. 4. Видно, что амплитуда в 100 кА и выше возникает очень редко и составляет около 2% общего числа разрядов. Наиболее часты амплитуды менее 20 кА. Расчетной величиной считают  $I_m=200$  кА, а в районах с малой грозовой деятельностью допустимо принимать 150 кА. Они появляются не более чем в 7 случаях из 100.

Вероятность  $p_1$  может быть определена и по простой формуле

$$\lg p_1 = -I_m/60, \quad (1)$$

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. Играет роль и высокое удельное сопротивление почвы в горах (скалы, снег).

Крутизна  $a = di_m/dt$  характеризует скорость нарастания тока, т. е. отношение приращения тока  $\Delta i_m$  к очень малому промежутку времени  $\Delta t$ , 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  $a$  всегда превышает 5 кА/мкс и может достигать 80 кА/мкс. Средняя крутизна  $a = I_m/t_f$  и пропорциональна  $\operatorname{tg} \alpha$  ( $\alpha$  — угол наклона штрихпунктирной кривой к оси времени). Максимальная расчетная крутизна принимается равной 60 кА/мкс. На ниспадающей ветви кривой ток изменяется медленнее, его крутизна гораздо меньше и во внимание ее не принимают.

Вероятность появления тока молнии с крутизной  $a$  или более определяется по формуле

$$\lg p_a = -a/36. \quad (2)$$

Крутизна важна для расчета индуктивного падения напряжения в проводниках цепи тока молнии. Она определяет в основном и введенные 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  $a$  и выше оценивается по аналогичной формуле

$$\lg p_{1a} = I_m/60 + a/36. \quad (3)$$

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

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

Длиной волны принято считать время  $t_w$ , протекающее от начала до того момента, когда  $i_m=0,5I_m$  и изменяется от 20 до 100 мкс. Расчетной величиной принимают  $t_w=50$  мкс.

Иногда кривую тока молнии идеализируют. Если интересуются процессами на фронте, то считают, что после  $t=t_f$  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  $i_m = I_m e^{-t/T}$ , где  $T$  — некоторая постоянная величина.

## 2. Пожаро- и взрывоопасность воздействия молнии

Воздействие молнии может быть двояким. Во-первых, она может поражать здания и установки непосредственно, что называется прямым ударом, или *первичным воздействием*. 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.

Воздействие прямого удара молнии. При прямом ударе молнии могут возникать пожары, взрывы, механические разрушения, поражения людей, перенапряжения на проводах электрических сетей. Ее канал имеет высокую температуру (30 000 °С и выше) и запас тепловой энергии, достаточный для нагревания горючей среды до температуры воспламенения, поэтому соприкосновение канала молнии с горючими и легковоспламеняющимися жидкостями, материалами, взрывоопасными смесями горючих газов, паров, пылей и волокон вызывает их воспламенение или взрыв. 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 связи с этим особую опасность при прямом ударе молнии представляют здания и наружные установки, где по условиям технологического процесса может образоваться взрывоопасная среда, что встречается редко; чаще она образуется при нарушении технологических процессов, при 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, газотводные трубы, свечи. Сюда относятся металлические и железобетонные резервуары для хранения нефтепродуктов, газгольдеры и

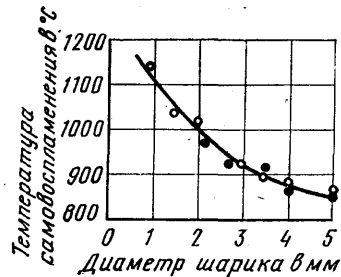
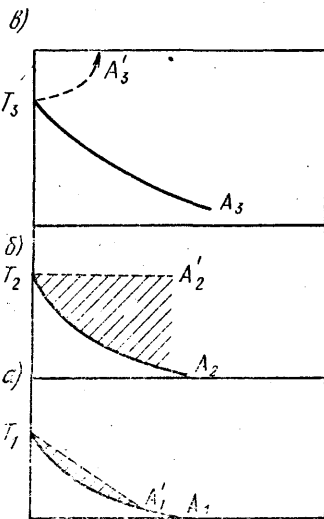


Рис. 6. Температура самовоспламенения в зависимости от диаметра шарика

Рис. 5. Схема зажигания накалившимся телом

резервуары со сжиженными горючими газами, многие аппараты наружных технологических установок нефтеперерабатывающих, химических и других объектов.

Тепловые процессы в месте контакта канала 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 толщине не более 4 мм.

В работе [1] указывается, что площадь прожога ( $S$ , мм<sup>2</sup>) слабо зависит от материала стенки, а определяется в основном ее толщиной ( $\delta$ , мм) и протекшим зарядом ( $q_m$ , Кл). Экспериментальные данные удовлетворительно интерполируются следующими соотношениями для меди, железа, стали и алюминия:

$$\text{при } 0_{\text{мм}} < \delta \leq 0,9 \text{ мм} \quad S = 25,3\delta^{-0,9} q_m, \quad (4)$$

$$\text{а при } 0,9 \text{ мм} < \delta \leq 3,8 \text{ мм} \quad S = 24,5\delta^{-1,54} q_m. \quad (5)$$

Проплавление током молнии металлических поверхностей может привести к взрыву и разрушениям, если внутри установок содержится взрывоопасная концентрация горючих газов и паров, поэтому с учетом коррозии за минимальную толщину металла, способную сохранить герметичность установок (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 накалившихся тел.

Пораженный участок стенки установки (рис. 5) примем за накалившее тело с температурой  $T_1$ . Если среда в аппаратуре, соприкасающаяся с ним инертна, то распределение температуры в ней изобразится кривой  $T_1A_1$  (рис. 5, а). Если же среда представляет го-

рючую 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 тепла, распределение температуры снижается значительно медленнее, чем  $A_2T_2$ . При определенном значении  $T_2$  понижения температуры в горючей среде (вблизи накалившегося 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 накалившегося 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. 5, в). Таким образом, температура накалившегося участка стенки  $T_2$  является предельной, так как при ней количество теплоты, выделяемого реакцией, равняется отводимому.

Если немного повысить температуру участков стенки (до  $T_3$ ), то скорость выделения теплоты превысит скорость теплоотвода, и смесь получит возможность разогреться до 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 накалившегося участка стенки, тем выше критическая температура. Результаты опытов показывают (рис. 6), что меньшему диаметру шарика, соответствует большая температура самовоспламенения газовой смеси (светильного газа с воздухом). Диаметр накалившегося 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 он окажется больше времени охлаждения накалившегося участка стенки аппарата до величины ниже температуры самовоспламенения. Если же он меньше времени охлаждения этого участка, то горючая смесь воспламенится.

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 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 метановоздушных смесей в зависимости от процентного содержания метана (6—10%) и температуры нагрева смесей (775—875 °C) 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 с. 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. 7 кривая  $t_{\text{max}} = f(\delta)$  позволяет выбрать допустимую толщину металла для наружных взрывоопасных уста-

Новок. Там, где допустимо повышение температуры внутренней стенки до 800—1200 °С (с учетом всех свойств горючей 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. Таким образом, при решении вопроса об использовании взрывоопасных наружных технологических установок в качестве естественных молниеприемников 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 молниеприемник.

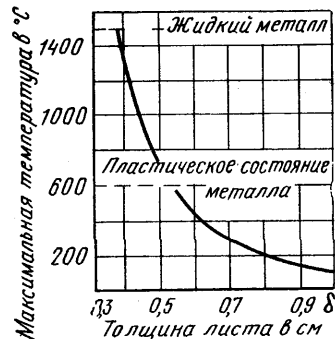


Рис. 7. Зависимость температуры от толщины листа

Такие молниеприемники необходимы и в том случае, если на установках имеются дыхательные клапаны, газоотводные трубы, свечи. При этом молниеприемники 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 будут приняты 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, возникнет 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 могут быть обусловлены не только прямым ударом молнии, но и каналами встречных (незавершенных) восходящих лидеров. Развивающиеся, например, от газоотводных и дыхательных труб, они даже при отсутствии разряда молнии могут вызвать воспламенение взрывоопасных смесей паров и газов, сбрасываемых в атмосферу.

**Термическое воздействие токов молнии на проводники.** Прямой удар молнии в металлические проводники вызывает не только их

нагрев, но и оплавление, т. е. оказывает термическое воздействие. При этом может выделиться 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, исключаяющее расплавление, составляет 16 мм<sup>2</sup>, а медных — 6 мм<sup>2</sup>. Учитывая же коррозию 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 мм<sup>2</sup> из круглой стали и 16 мм<sup>2</sup> из меди.

**Динамическое действие токов молнии.** При поражении молнией сооружений из твердого негорючего материала (каменя, кирпича, бетона) наблюдаются местные разрушения как результат динамического действия. Наиболее серьезные из них связаны с электрогидравлическими и электрогазодинамическими 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 разрыву (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 также 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, исключаяющее опасные повышения температуры.

Молния опасна еще и тем, что ее удар в незащищенное (неправильно защищенное) здание может поразить людей, находящихся как внутри, так и снаружи, в результате воздействия высоких потенциалов на отдельных участках здания (оборудования) через напряжения прикосновения и шаговые, поэтому опасно укрываться во время грозы под деревьями, особенно высокими или стоящими отдельно, находиться вблизи металлических труб, мачт, молниеотводов, заземлителей.

**Вторичные воздействия молнии.** Под вторичными воздействиями молнии подразумеваются явления во время 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 ин-



дукции и 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 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), освобожденные заряды распространяются в виде волн и создают напряжения по отношению к земле в десятки и сотни киловольт, способные вызвать 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.

Контур может быть незамкнутыми 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, размеров и конфигурации контура и их взаимного расположения. При расположении канала молнии и контура, представленном на рис. 8, напряжение в вольтах на разомкнутых концах контура может быть определено по формуле

$$U_k = M di_m / dt = MI_m / \tau_{\phi}, \quad (6)$$

где  $M = 2c \ln[(a+b)/c] \cdot 10^{-9}$  — коэффициент взаимной индукции между каналом молнии и контуром, Гн ( $a$  — расстояние от канала молнии до контура, см;  $b$  и  $c$  — размеры контура, см).

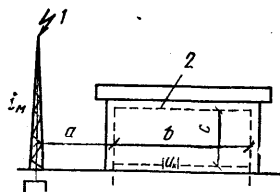
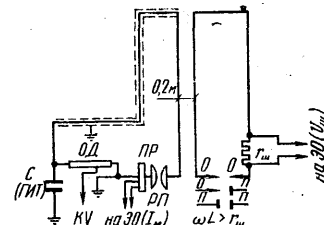


Рис. 8. Положение канала молнии и контура для расчета индуцированных напряжений  
1 — канал молнии; 2 — контур

Рис. 9. Схема установки для исследования величин энергии, выделяемой в искровых промежутках контура

С(ГИТ) — генератор импульсных токов; ОД — омический делитель; ПР — пояс Роговского; РП — разрядный промежуток;  $r_{ш} = 0,011$  Ом — безындуктивный шунт. Параметры ГИТ:  $C_6 = 13 \mu F$ ;  $L = 10 \cdot 10^{-6}$  Гн;  $r = 0,264$  Ом;  $U = 100$  кВ;  $I = 90$  кА



Значительное число пожаров нефтяных цистерн, резервуаров и складских емкостей обусловлено вторичными (индуцированными) воздействиями, а не прямым ударом молнии. Они 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, обуславливаемых электромагнитной индукцией и нагревом мест плохих контактов. 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 (рис. 9). Экспериментальный контур представлял собой рамку размером  $1 \times 3$  м, изготовленную из стальных труб  $3/4$ ". Путем замены электродов в ней создавались искровые промежутки: острие-острие ( $O-O$ ), острие-плоскость ( $O-П$ ) и плоскость-плоскость ( $П-П$ ).

Цель опыта заключалась в оценке энергии в искровом промежутке при минимальных, но соответствующих наибольшей вероятности параметрах тока молнии, имитируемых разрядом ГИТ. Важнейшим из них является крутизна фронта волны тока молнии ( $di_m/dt$ ), которая обуславливает появление ЭДС индукции в контурах, не подвергаясь непосредственному поражению молнией. Вариации этого параметра молнии весьма велики, но ток молнии часто имеет крутизну фронта 5 кА/мкс, поэтому эксперименты проводились в разрядной петле ГИТ, близкой по величине к указанной.

Для определения энергии, выделяемой в искровых промежутках контура, производили осциллографирование амплитуды напряжения  $U_{ш}$  с помощью безындуктивного шунта ( $r_{ш} = 0,011$  Ом), включенного последовательно с искровым промежутком. По известным величинам  $U_{ш}$  и  $r_{ш}$  вычисляли амплитуду тока искры  $I_{м.и}$ . Осциллографирование напряжения на искровом промежутке не производили, а для определения энергии искры (на основании имеющихся исследований) принимали минимальное напряжение  $U_{н.д}$ , равное 50 В, характерное для дуговой стадии искры. Вычисление энергии в искровых промежутках производили по следующей формуле:

$$W_{и} = \int_0^{\tau} i_{и} U_{н.д} dt. \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) значение

$$i_{и} = I_{м.и} \sin \omega t \quad (8)$$

и вычисляя интеграл в пределах от  $\tau=0$  до  $\tau=T/4$ , получим

$$|W_{и}| = I_m U_{и.д} T / 2. \quad (9)$$

Результаты определения энергии в искровых промежутках контура приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Величина энергии в искровых промежутках контура

Искровой промежуток	Период тока $T$ , мкс	$r_{ш}$ , Ом	$U_{ш}$ , В	$I_{м.и}$ , А	$U_{и.д}$ , В	$W_{и} \cdot 10^{-3}$ , Дж
О—О	68	0,011	28	2545	50	1400
О—П	69	0,011	29,7	2700	50	1490
П—П	69	0,011	28	2545	50	1400

Из табл. 1 видно, что конструкция электродов искрового промежутка существенного влияния на величину энергии не оказывает. Сравнение величин этой энергии с минимальной энергией электрических искр, достаточной для воспламенения более 50 различных паро-, газо- и пылевоздушных взрывоопасных смесей (см. приложения, табл. 2 и 3), 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 разрядом ГИТ. Необходимо учитывать и увеличенные размеры токопроводящих контуров по сравнению с экспериментальными.

Для исследования нагрева и искрообразований во фланцевых соединениях токопроводящих контуров при протекании по ним токов молнии или тока, обусловливаемого ЭДС индукции, были проведены два вида опытов как на чистых, так и с сильной коррозией фланцевых соединениях. Экспериментальная установка (рис. 10) состояла из генератора импульсных токов и фланцевого соединения,

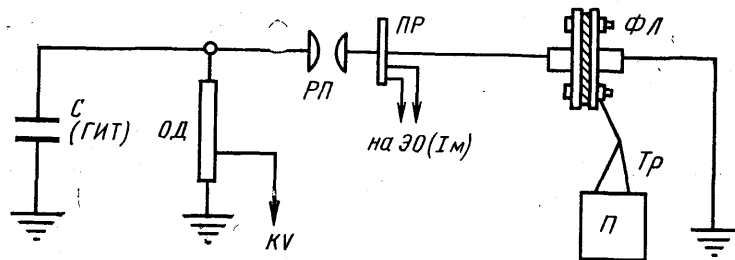


Рис. 10 Схема установки для исследования нагрева и искрообразований во фланцевых соединениях

$C$  (ГИТ) — генератор импульсных токов;  $ОД$  — омический делитель;  $РП$  — разрядный промежуток;  $ПР$  — пояс Роговского;  $ФЛ$  — экспериментальный фланец;  $ТР$  — термопара;  $П$  — потенциометр типа ПП

включенного в разрядную петлю ГИТ. Чистое фланцевое соединение имело пять соединительных болтов и резиновую прокладку. Для создания более жестких условий опыта применяли болты малых диаметров: 4,5 и 6 мм. Переходное сопротивление этого соединения не превышало нормативной величины (0,03 Ом) при наличии всего лишь одного-двух нормально затянутых болтов.

Для измерения температуры возможного нагрева элементов фланцевого соединения применяли термопару. Число нормально затянутых болтов изменялось от 1 до 5; величина амплитуды разрядного тока ГИТ колебалась в пределах 10,7—48,2 кА. Опыты проводились как одиночными разрядами, так и их сериями, следующими друг за другом. Такие же опыты были проведены и при сильно корродированном фланцевом соединении с диаметром соединительных болтов 6 и 8 мм. Величина переходного сопротивления при этом превышала нормативную и находилась в пределах 0,3—1 Ом. Проведенными 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 искрообразований проводили на тех же 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 искр 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 в них молнии, но и когда эти коммуникации слишком близко расположены, например, от 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.

### 3. Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты

В зависимости от вероятности вызванного молнией пожара или масштаба возможных разрушений и сложности молниезащитных

устройств для зданий и сооружений установлены три категории.

**I категория** — здания и сооружения или их части с взрывоопасными зонами классов В-I и В-II по «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ-76). В них хранятся или содержатся постоянно либо появляются во время производственного процесса смеси газов, паров или пыли горючих веществ с воздухом или иными окислителями, способные взорваться от электрической искры.

**II категория** — здания и сооружения или их части, в которых имеются взрывоопасные зоны классов В-Ia, В-Iб, В-IIa согласно ПУЭ. Эти опасные смеси могут появляться лишь при авариях или неисправностях в технологическом процессе. К этой же категории принадлежат наружные технологические установки и склады, содержащие взрывоопасные газы и пары, горючие и легковоспламеняющиеся жидкости (газгольдеры, цистерны и резервуары, сливно-наливные эстакады), относимые по ПУЭ к взрывоопасным зонам класса В-Iг.

**III категория** — несколько вариантов зданий и сооружений, в том числе: здания и сооружения с пожароопасными зонами классов П-I, П-II и П-IIa согласно ПУЭ; наружные технологические установки, открытые склады горючих веществ, где применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 61 °С или твердые горючие вещества, относимые по ПУЭ к зоне класса П-III.

**Обязательность устройства молниезащиты.** При выборе устройств молниезащиты по категориям учитывают важность объекта, его высоту, расположение среди соседних объектов, интенсивность грозовой деятельности и другие факторы. Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним количеством грозовых часов в год  $n_d$ . Эта величина может быть получена по данным местной метеорологической станции. Кроме того, существует карта [2], на которой нанесены линии средней годовой продолжительности гроз на территории СССР. 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—55° она колеблется от 20 до 80 ч, а на юге (Кавказ, Донбасс) она может достигать 100—120 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  $n_d$ . Принято считать продолжительность грозы приблизительно равной 1,5 ч, если  $n_d = 30$  дням, и 2 ч, когда  $n_d$  больше 30 дней. Следовательно,  $n_d = (1,5-2)n_d$ . Кроме этих оценок имеется более обобщенный показатель грозовой деятельности в данной местности — среднее число ударов в год  $n$  на 1 км<sup>2</sup> площади поверхности земли, — зависящий от интенсивности грозовой деятельности, величины которого приведены ниже:

Интенсивность грозовой деятельности в часах за год, $n_d$	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
Среднее число ударов молнии в год на 1 км <sup>2</sup> , $n$	1	3	6	9	12

Используя значение  $n$ , можно определить вероятное число ударов молнии в год  $N$  в здании, не имеющее молниезащиты:

$$N = (S + 6h_x)(L + 6h_x)n \cdot 10^{-6}, \quad (10)$$

где  $S$  — ширина защищаемого здания или сооружения, м;  $L$  — его длина, м;  $h_x$  — наибольшая высота здания или сооружения.

Если здание имеет сложную конфигурацию, то при расчете по формуле (10) в качестве  $S$  и  $L$  принимаются ширина и длина наибольшего прямоугольника, в которой вписывается план здания. Принято считать, что молнии попадают в здание или сооружение в пределах территории, контур которой удален от контура сооружений на три его высоты. Для таких объектов, как дымовые трубы котельных, водонапорные и силосные башни, мачты, деревья, имеющие высоту  $h_x$ , ожидаемое число поражений в год

$$N = 9h_x^2 n \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Среднее число ударов молнии в год на 1 км<sup>2</sup> площади поверхности земли  $n$  в месте дислокации объекта можно определить по формуле [1]:

$$n = 0,023n_d^{1,3}. \quad (12)$$

Здания и сооружения I категории должны быть обязательно защищены от прямых ударов молнии, от электростатической и электромагнитной индукции и от заноса в них высокого потенциала через наземные и подземные коммуникации на всей территории СССР, а молниеотводы предусматриваются с зонами защиты типа А. В районах с очень малой интенсивностью грозовой деятельности вероятность удара в здание I категории очень мала, но материальный ущерб может быть велик, и затраты на молниезащиту в этом случае вполне оправданы.

Здания и сооружения II категории должны быть защищены от прямых ударов молнии, вторичных ее воздействий и заноса в них высоких потенциалов через наземные и подземные коммуникации только в местностях со средней интенсивностью грозовой деятельности  $n_d \geq 10$ . Тип зоны защиты молниеотводов зависит от показателя  $N$ : зона типа А принимается при  $N > 1$ , а зона типа Б — при  $N \leq 1$ . Наружные технологические установки класса В-Iг, относимые также ко II категории, подлежат защите от прямых ударов молнии на всей территории СССР, а молниеотводы предусматриваются с зонами типа Б. Некоторые из этих установок подлежат защите и от электростатической индукции (резервуары с плавающими крышами или понтонами).

Здания и сооружения III категории (с зонами классов П-I, П-II и П-IIa) подлежат молниезащите в местностях с грозовой деятельностью 20 и более часов в год, а тип зоны защиты молниеотводов зависит от степени огнестойкости здания. Например, зона типа Б требуется для зданий и сооружений I и III степени огнестойкости при  $0,1 < N \leq 2$ , а для III, IV и V степени огнестойкости при  $0,02 < N \leq 2$ ; при  $N > 2$  необходима зона типа А. Для наружных установок класса П-III молниезащита предусматривается при грозовой деятельности 20 и более часов в год при зоне защиты типа Б.

Все здания и сооружения III категории должны быть защищены от прямых ударов молнии и заноса высоких потенциалов через наземные металлические коммуникации, а наружные установки должны быть защищены только от прямых ударов молнии. Таким образом, обязательность устройства молниезащиты зданий или сооружений I, II и III категории определяется интенсивностью грозовой деятельности  $n_d$  и ожидаемым количеством поражений  $N$  молнией в год. При несовпадении одного из этих показателей с вели-

чинами по нормам [2] устройство молниезащиты становится не обязательным.

**Требования к устройствам молниезащиты.** К основным требованиям могут быть отнесены: соответствие типа молниезащиты характеру производственного процесса в здании, сооружении, на всем объекте; возможность типизации ее конструктивных элементов; надежность действия всех ее элементов и «равнопрочность» их в этом отношении; большой срок службы, достигающий десятка и более лет; возможность применения недорогостоящих материалов и использование 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 не очень затруднительный доступ ко всем элементам при контроле, восстановлении или ремонте.

Кроме того, при выполнении молниезащиты зданий и сооружений всех категорий для повышения безопасности людей следует размещать заземлители (кроме углубленных) в редкопосещаемых местах (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 места, чтобы люди не имели к ним доступа.

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

Для нестандартных объектов, молниезащиту которых не удается осуществить по типовым рекомендациям [2], должны быть определены те воздействия, которые представляют наибольшую опасность, а затем на основе технико-экономического анализа выбрать оптимальные меры защиты. В ряде случаев, особенно для объектов новой техники, 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 молниезащиты следует учитывать и то, что 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 воздушники, свечи, газоотводные трубы по специальной аварийным срабатывающим 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 воздушшек. Перечисленные устройства располагаются, как правило, на зданиях, наружных установках, рабочих площадках и эстажерках, 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 срабатываниях из аппаратов, либо в смеси с воздухом в границах концентрационных пределов взрыва (при выбросе газо- и паровоздушных смесей из дыхательных труб, воздушшек), поэтому около таких устройств выброса также могут создаваться зоны взрывоопасности.

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, которые будут влиять на выбор схемы и типа молниезащитного устройства, мест их расположения, необходимого удаления и превышения зон защиты молниеотводов над устройством выброса. В практике проектирования молниезащиты встречались случаи, когда наличие большого количества газоотводных труб и вентиляционных устройств приводило к отказу от защиты зданий II категории молниеотводами, располагаемыми на них, и сооружались отдельно стоящие молниеотводы.

Трудности, возникающие при решении вопросов молниезащиты с учетом зон взрывоопасности, объяснялись, с одной стороны, весьма противоречивыми указаниями в литературных и нормативных источниках, с другой — отсутствием каких-либо исследований распределения взрывоопасных концентраций и зон. Все это приводило к усложнению и чрезмерному удорожанию молниезащитных устройств, к применению недостаточно надежного и безопасного варианта молниезащиты. В связи с этим были проведены исследования [3] распределений концентраций горючих смесей при непрерывном выбросе их в атмосферу.

#### 4. Молниеотводы

**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

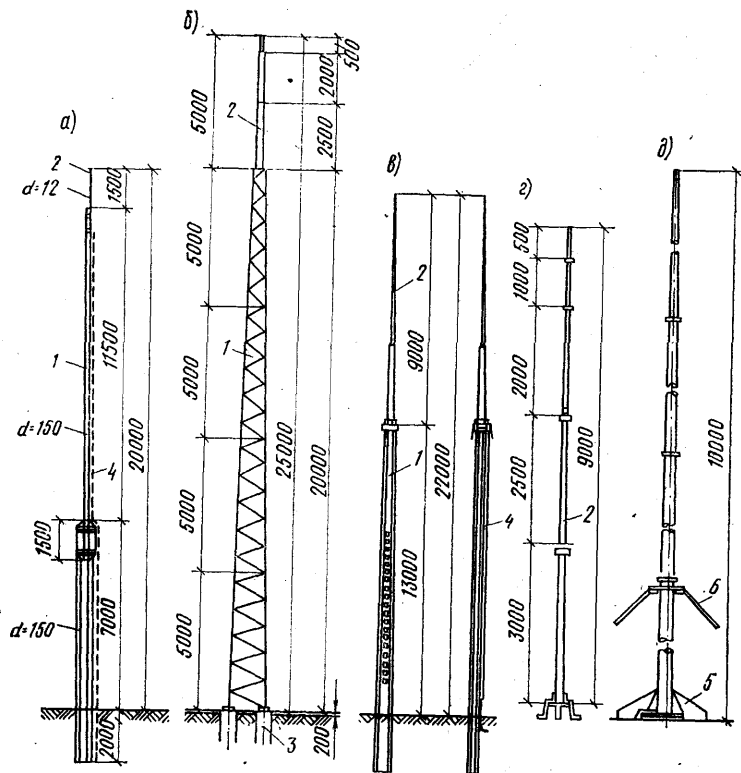


Рис. 11. Конструкции стержневых молниеотводов

а — на деревянной опоре; б — металлический решетчатый М-25; в — на железобетонной опоре; г — молниеприемник железобетонного молниеотвода; д — из газовых труб, устанавливаемых на крыше; 1 — опора (стойка); 2 — молниеприемник; 3 — подножник; 4 — токоотвод (спуск); 5 — фланец; 6 — оттяжка

быть деревянными, металлическими и железобетонными (рис. 11). 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.

Опоры высотой более 8—10 м выполняют на одном или двух пасынках (рис. 11, 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 Ст3 или Ст5, и в поперечнике могут

быть прямоугольного, двутаврового, круглого и других сечений.

Металлическую опору для молниеотвода высотой 20—75 м (рис. 11, б) чаще всего выполняют в виде жесткой решетчатой конструкции. Ее устанавливают на четырех железобетонных подножках, 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 различной формы (рис. 11, в) имеют часть арматуры или полностью предварительно напряженную. Бетон может быть вибрированным или центрифугированным. На вершине опоры устанавливают молниеприемник и соединяют с токоотводом, который прокладывают по опоре. В некоторых случаях молниеприемник электрически 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. Постепенно на этих участках начинается разрушение, особенно в прибрежных районах. Железобетонные опоры экономически более выгодны, они проще в эксплуатации и долговечны.

Молниеотводы, устанавливаемые на сооружениях, делятся на настенные и кровельные. Первые применяют чаще, их молниеприемники изготовляют из трубы или угловой стали и закрепляют посредством скоб, хомутов или кронштейнов. Молниеприемники кровельные (рис. 11, д) 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 (II и III категории молниезащиты), 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 стрелку, отстоящие от здания более чем на 5 м. Если дерево невысоко, 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 тепловое и динамическое воздействия, быть надежными в эксплуатации. Стержневые изготовляются из покрытой антикоррозионной защитой (оцинковывание, лужение, покраска) полосовой, круглой и угловой стали или из некондиционных водогазопроводных труб. Конец трубы сплющивают или надежно закрывают металлической пробкой. Наименьшее сечение молниеприемника должно быть 100 мм<sup>2</sup> (это позволяет выдержать термические и динамические воздействия тока молнии), а длина не менее 200 мм.

В качестве молниеприемников можно использовать дымовые, вы-

хлопные и другие металлические трубы объекта, дефлекторы (если они не выбрасывают горючие пары и газы), кровлю и другие металлические элементы сооружений. Применяют и в виде сетки, сваренной из круглой стали диаметром 6—8 мм или полосовой стали сечением не менее 48 мм<sup>2</sup>, уложенных на кровлю под гидро- или теплоизоляцию (если она негорючая). Это не затруднит сток воды с кровли и очистку от снега. Размер ячейки берут 6×6 м<sup>2</sup>. Допустим и другой размер, но общая площадь ее должна быть не более 36 м<sup>2</sup> для зданий II категории, а для зданий III — не должен превышать 150 м<sup>2</sup>. Ячейка может быть и не квадратной.

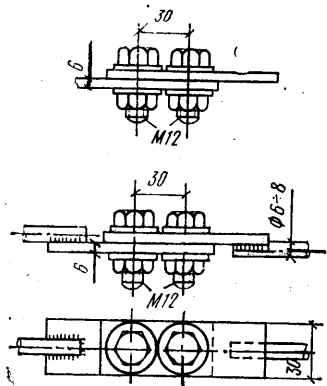


Рис. 12. Примерные конструкции разъемов токоотводов

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 молниеотвод выполняют из стального многопроволочного и только оцинкованного троса диаметром до 7 мм (сечение не менее 35 мм<sup>2</sup>).

**Токоотводы молниеотводов** применяют для соединения молниеприемников с заземлителями из стали любого профиля. Их рассчитывают на пропускание полного тока молнии без нарушений и существенного перегрева. Они должны быть оцинкованы, про-

лужены 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, 48 мм<sup>2</sup>, для расположенных внутри — 24 мм<sup>2</sup>, а круглые токоотводы должны иметь наименьший диаметр соответственно 5 и 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. Болтовые соединения и заклепки допускают только для объектов с III категорией устройства молниезащиты и тогда их не окрашивают, а лудят. 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 (рис. 12). 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

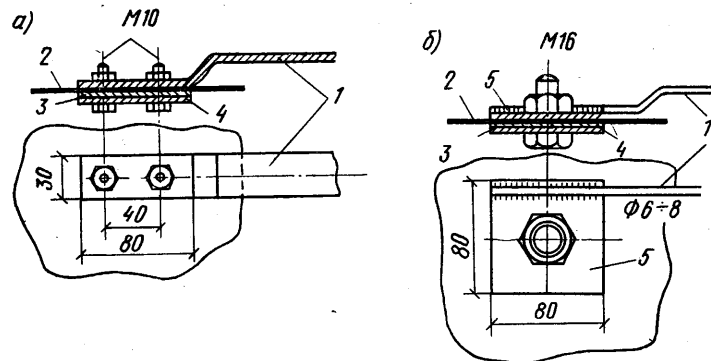


Рис. 13. Зажим для присоединения плоского (а) и круглого (б) токоотводов к металлической кровле

1 — токоотвод; 2 — кровля; 3 — свинцовая прокладка; 4 — стальная пластина; 5 — пластина с приваренным токоотводом

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, короба и трубы могут быть соединены с токоотводами болтовыми зажимами (рис. 13).

**Заземляющие устройства** являются важнейшим элементом в комплексе средств обеспечения защиты объектов от прямого удара молнии, заноса высоких потенциалов по коммуникациям и электростатической индукции. Основной частью их являются собственно заземлители, находящиеся в достаточно хорошо проводящей среде. Они бывают *одиночными* (простыми) и *сложными* (комбинированными). К первым относятся трубы, электроды из круглой, полосовой, угловой и листовой стали, а сложные образуются из комбинации 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 материала или высокой удельной проводимости грунта. Еще различают искусственные и естественные заземлители (водопроводные и обсадные трубы, металлические каркасы сооружений, трубопроводы, если они не доставляют газ или горючие жидкости).

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. Наконец, существуют *вертикальные* заземлители (обычно стержни из круглой и угловой стали и трубы, забиваемые в землю, реже — стальные круглые стержни, ввинчиваемые 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  $\rho$  менее 300 Ом·м и при сравнительно высоком уровне грунтовых вод. Если же верхние слои почвы обладают вы-

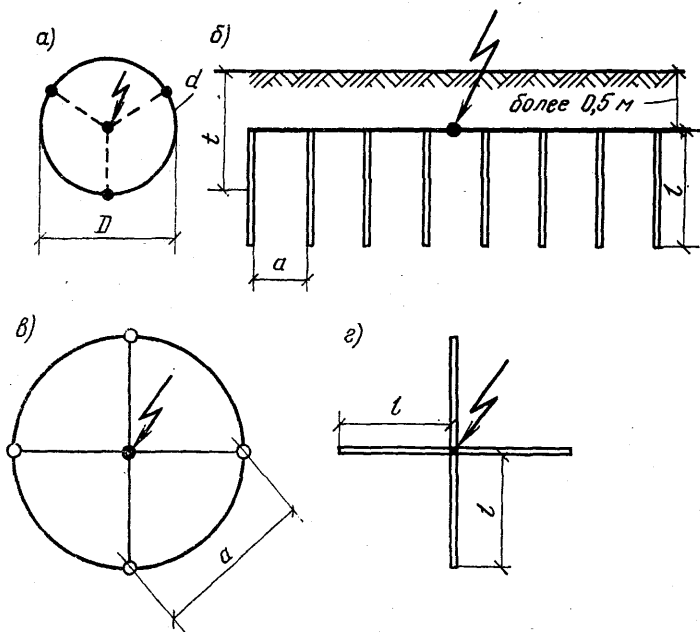


Рис. 14 Схематические конструкции заземлителей для молниеотводов

*a* — кольцевой в плане (стальная полоса шириной 4 см или круглая сталь диаметром 1—2 см); *б* — двухлучевой из вертикальных электродов, соединенных полосой сечением не менее 160 мм (аналогично выполняются трехлучевые и четырехлучевые с общей точкой присоединения к токоотводу); *в* — четырехэлектродный вертикальный заземлитель с соединениями полосовой сталью по периферии и радиусам (таким же образом создаются трех- и двухэлектродные заземлители); *г* — четырехлучевой симметричный из горизонтальных полосовых из угловых электродов в плане (аналогично делается заземлитель из трех и двух лучей)

соким  $\rho$  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 длительной влажностью 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, удобрением солями или их растворами. Для электродов берут преимущественно полосовую сталь сечением не менее 160 мм<sup>2</sup> (40×4 мм<sup>2</sup>) и реже круглую сталь эквивалентного сечения. Электроды укладывают на глубину 0,6—0,8 м в виде одного или нескольких симмет-

ричных 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 между собой и с токоотводами соединяют только сваркой.

На рис. 14 приведены схематично возможные конструкции заземлителей для молниеотводов. Заземлитель может быть при 3 и 4 лучах соединен полосой и по периферии. Кроме того, вертикальные заземлители располагают в несколько параллельных рядах или по контуру, обычно прямоугольнику. Конструкция заземлителя зависит от типа молниеотвода (отдельно стоящего или установленного на здании). В последнем случае рекомендуется широко использовать в качестве заземлителей молниезащиты железобетонные фундаменты зданий и сооружений.

Металлические и железобетонные конструкции зданий I категории по устройству молниезащиты могут быть использованы только для защитного заземления электроустановок и защиты от вторичных воздействий молнии. Для зданий II и III категории металлические и железобетонные конструкции используются и для защиты от прямых ударов молнии. Устройство молниезащиты зданий в железобетонном исполнении включает в себя молниеприемную сетку, соединяемую сваркой с арматурой всех колонн, затем стекает на арматуру фундамента и через защитный слой бетона — в землю.

Основанием для использования арматуры железобетонных фундаментов в качестве заземлителей является 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 в себя объединение в единую систему всех железобетонных (или металлических) конструкций, соединение с помощью сварки всех элементов арматурного каркаса и создание непрерывной электрической цепи по арматуре. Кроме того, железобетонные фундаменты можно использовать в качестве заземлителей при воздействии неагрессивных или слабоагрессивных вод, т. е. при отсутствии гидроизоляции или при защите поверхности фундаментов битумным или битумно-латексным покрытием и в грунтах с влажностью не менее 3%.

При использовании в качестве заземляющих устройств все элементы металлических и железобетонных конструкций (фундаментов, колонн, ферм, стропильных, подстропильных и подкрановых балок) должны образовывать непрерывную электрическую цепь по металлу, а в железобетонных элементах (колоннах) дополнительно должны предусматриваться закладные детали (изделия) для присоединения электрического и технического оборудования.

Методика расчета заземляющего устройства. Сопротивлением заземлителя или сопротивлением растеканию тока с него  $r$  называют отношение потенциала на нем  $U$  к току  $I$ , стекающему с него. Для сосредоточенных заземлителей величина  $r$  представляет собой сопротивление среды, в которой находится заземлитель. Оно не учитывает материала заземлителя и переходного или контактного сопротивления между ними. Сопротивление среды для сосредоточенных заземлителей зависит от свойств среды, размеров и формы электродов, их взаимного расположения. На сопротивление протя-

женных заземлителей, кроме того, влияют и проводящие свойства материала. Сопротивление растеканию одиночных, наиболее часто встречающихся электродов при токах промышленной частоты определяют согласно табл. 2.

Таблица 2. Определение сопротивления растеканию тока

Тип электрода (заземлителя)	Формула
Труба или электрод длиной $l$ из круглой стали радиусом $r'$ , забитые вертикально вровень с поверхностью земли	$r_1 = \rho / 2\pi l \ln(2l/r')$
То же, но погруженные на глубину $t$ , где $t$ — расстояние от поверхности земли до центра электрода	$r_2 = \rho / 2 \{ \pi l \ln(l/r') + l/2 [ \ln(4t + l)/(4t - l) ] \}$
Трубы или электрод из круглой стали, закопанные горизонтально на глубину $t$	$r_3 = \rho / \pi l \ln(l/\sqrt{2t \cdot r'})$
Кольцо диаметром $D$ из круглой стали радиусом $r'$ на глубине $t$ (рис. 14)	$r_4 = \rho / 20D [ \ln(4D/r') + \pi D / 4t ]$

Во всех формулах табл. 2 размеры принимаются в метрах, а удельное сопротивление грунта  $\rho$  — в Ом·м. В формуле для  $r_2$  второе слагаемое в скобке составляет 4—5% и им можно пренебречь, тем более, что в верхних слоях почва суха. Все формулы пригодны для электродов из уголкового стали, если заменить всюду  $r'$  на  $0,47 b$ , где  $b$  — ширина уголка, и для электродов из полосы, если заменить  $r'$  на  $0,25 b$ .

Сопротивление заземлителя не зависит непосредственно от его площади поверхности и оно прямо пропорционально удельному сопротивлению  $\rho$ , изменяющемуся в очень широких пределах и зависящих от состава почвы, ее влажности, температуры, плотности и других факторов. Имеются карты, на которых отмечены районы с одинаковыми значениями  $\rho$ . Можно ориентировочно принимать для него следующие средние значения в Ом·м:

Торф . . . . .	40	Смешанный грунт (глина, известняк, щебень) . . . . .	150
Садовая земля . . . . .	40	Чернозем . . . . .	200
Речная вода . . . . .	50	Супесок . . . . .	400
Глина . . . . .	70	Известняк, мергель . . . . .	1400
Каменская глина . . . . .	100	Скальный грунт . . . . .	3000
Суглинок . . . . .	150		

Определенные по вышеприведенным формулам сопротивления одиночных заземлителей оказываются выше тех, которые получаются при стекании с них больших токов молнии. Это вызывается большой плотностью токов, создающих высокие напряженности электрического поля вблизи поверхности заземлителя. Эта напряженность вызывает пробой грунта. Проявляются искры и даже кратковременные электрические дуги. Во влажном грунте увеличивается его электрическая проводимость из-за повышенной напряженности в нем, а в сухом — искрообразованию способствуют сравни-

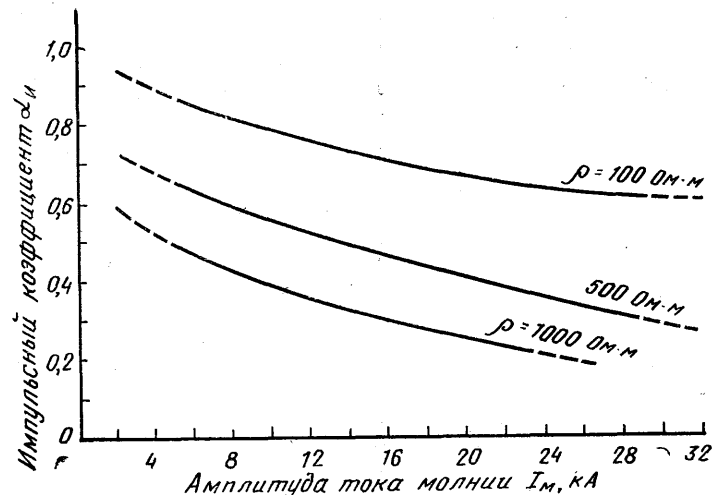


Рис. 15. Импульсный коэффициент  $\alpha_{и}$  для вертикального заземлителя длиной  $l=2,5$  м и диаметром до 6 см

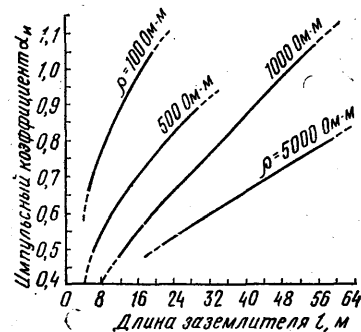


Рис. 16. Импульсный коэффициент для горизонтального электрода (стальная полоса шириной 2—4 см или круглая сталь диаметром 1—2 см) при амплитуде тока молнии  $I_M=20$  кА

тельно легко пробиваемые воздушные пузырьки. Сказывается и общее свойство грунтов уменьшать свое удельное сопротивление при возрастании в них электрической напряженности.

Сопротивление заземлителей при растекании тока молнии называют *импульсным* и определяют по формуле

$$r_{и} = r \alpha_{и}, \quad (13)$$

где  $r$  — сопротивление электрода при низкой (промышленной) частоте и при малых плотностях токов на поверхности;  $\alpha_{и}$  — импульсный коэффициент.

Этот коэффициент тем меньше, чем больше удельное сопротивление  $\rho$  (возникают лучшие условия для пробоев и искрообразования), выше амплитуда тока молнии  $I_M$  и меньше длина электрода, что видно из графиков на рис. 15 и 16. Для токов с амплитудой 10 кА можно ориентировочно значения коэффициента увеличить на 0,1, а для токов с амплитудой 20 кА — уменьшить на 0,1. У длинных электродов  $\alpha_{и}$  может превышать единицу. При этом сказывается индуктивное падение напряжения и конечные участки почти



не участвуют в распространении импульсного тока, так как большая часть напряжения теряется в начальной стадии, поэтому целесообразно применять лишь заземлители, для которых  $\alpha_n \leq 1$ . Ниже приведены предельные длины  $l_{пр}$  горизонтальных заземлителей, гарантирующих  $\alpha_n \leq 1$  при разных удельных сопротивлениях грунта

$\rho$ , Ом·м . . . . .	До 500	500	1000	2000	4000
$l_{пр}$ , м . . . . .	25	35	50	80	100

Значения коэффициента  $\alpha_n$  при разных удельных сопротивлениях грунта  $\rho$ , где верхние цифры относятся к комбинированным заземлителям, а нижние — к вертикальным заземлителям, следующие:

$\rho$ , Ом·м . . . . .	До 100	100	500	1000	2000
$\alpha_n$ . . . . .	$\frac{0,9}{0,9}$	$\frac{2,7}{0,9}$	$\frac{0,5}{0,7}$	$\frac{0,3}{0,5}$	—
					0,35

Сопротивление сложного заземлителя, содержащего  $n$  параллельно включенных одиночных стержней или полос:

$$r_{ис} = r_n / \eta_n, \quad (14)$$

где  $\eta_n$  — импульсный коэффициент использования, зависящий от числа электродов, их длины, поперечных размеров и их взаимного расположения.

Этот коэффициент учитывает, что при одном и том же потенциале растекание тока с поверхностей, обращенных друг к другу, затруднено. То же происходит у электродов, находящихся в средней части сложного заземлителя, т. е. процесс взаимного экранирования. В результате сопротивление заземлителя увеличивается в сравнении с тем, какое может быть, если отдельные электроды отстоят очень далеко друг от друга.

Наибольшее влияние оказывает на величину  $\eta_n$  отношение расстояния между вертикальными стержнями или горизонтальными полосами  $a$  к их длине  $l$ . Обычно стараются  $a/l$  принимать не менее 2—2,5. Поперечные размеры оказывают меньшее влияние на импульсный коэффициент использования. Приблизительно можно считать, что для вертикальных стержней, электрически связанных полосой и расположенных на расстоянии, вдвое большем их длины, а также для трех горизонтальных симметричных полос  $\eta_n = 0,75$ ; для двух расходящихся в обе стороны полос  $\eta_n = 0,95$ . Импульсное сопротивление сложного и часто встречающегося заземлителя из  $n$  вертикальных стержней, соединенных горизонтальной полосой или круглой сталью, определяется по формуле

$$[(r_{ив} \cdot r_{гг} / n) / (r_{ив} / n + r_{гг})] \cdot 1 / \eta_n. \quad (15)$$

Здесь символ «в» означает вертикальный, «г» — горизонтальный. Если не учитывать влияние горизонтальных соединительных полос, обычно находящихся в менее влажных слоях грунта, то для грунтов с  $\rho \leq 200$  Ом·м отношение  $\alpha_n / \eta_n$  несколько меньше единицы и действительная величина импульсного сопротивления системы  $r_{ис}$  будет меньше  $r/n$ . Так как импульсное сопротивление измерению не поддается, то его оценивают косвенно по измеренному сопротивлению при промышленной частоте, согласно табл. 3.

Например, если по нормам или по расчету нужно иметь  $r_{ис} = 20$  Ом, то при  $\rho = 500$  Ом·м необходимо получить измеренную величину сопротивления 30 Ом. Если оно окажется большим, то следует увеличить число электродов. В табл. 1 приложения приво-

Таблица 3. Связь между сопротивлениями при импульсе и промышленной частоте

Сопротивление заземления, измеренное на переменном токе, в зависимости от удельного сопротивления грунта, Ом·м				Величина импульсного сопротивления заземлителя, Ом
100	500	1000	более 1000	
5	7,5	10	15	5
10	15	20	30	10
20	30	40	60	20
30	45	60	90	30
40	60	80	120	40
50	75	100	150	50

дятся примеры типовых конструкций заземлителей и значения их сопротивлений растеканию тока промышленной частоты  $r$ , Ом. Значения  $r_n$  этих заземлителей оцениваются либо по формуле (13), либо по табл. 3.

Заземлители защиты от вторичных воздействий молнии рассчитывают по методике определения сопротивления растеканию тока промышленной частоты. 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. 17. Оно зависит от геометрических размеров электрода, способа его установки, но не за-

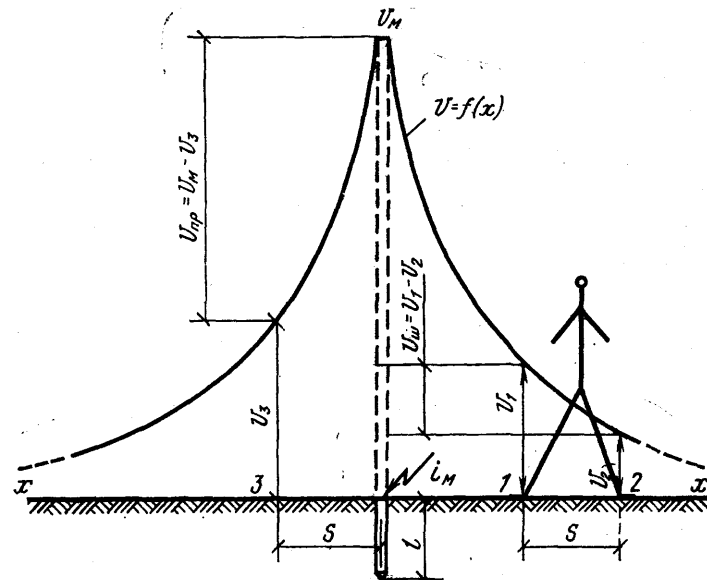


Рис. 17. Изменение потенциала на поверхности земли у заземлителя при растекании тока молнии

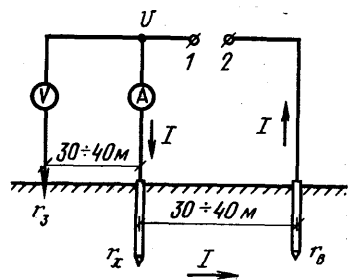


Рис. 18. Схема измерения сопротивления заземлителя методом амперметра-вольтметра

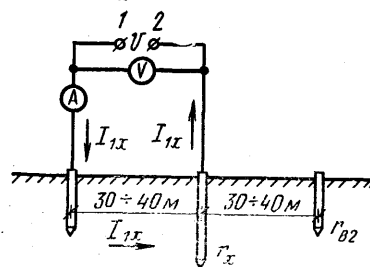


Рис. 19. Схема измерения сопротивления заземлителя методом «трех электродов»

висит от электрических свойств однородного грунта. На небольших удалениях от оси трубы потенциал  $U$  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  $U_m = I_m \cdot r_{ис}$ .

Если вблизи заземлителя будет находиться человек и расстояние между его ступнями равно  $S$ , то он подвергается действию шагового напряжения  $U_{ш}$ , равному 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  $U_m - U_s$  и называемой напряжением прикосновения  $U_{пр}$ .

Снижения шагового напряжения и напряжения прикосновения можно добиться уменьшением сопротивления  $r_{ис}$  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 6 м, располагать эти заземлители дальше от дорог, тротуаров.

**Методы измерения сопротивления заземлителей.** Существует три метода измерения и все они выполняются только при переменном токе. Наиболее простым является метод амперметра и вольтметра (рис. 18). К зажимам 1 и 2 сети или отдельного трансформатора присоединяют измеряемый  $r_x$  и вспомогательный  $r_b$  заземлители. К зажиму 1 (или непосредственно к измеряемому заземлителю) присоединяют один вывод вольтметра, а второй к зонду  $r_b$ . Расстояние между всеми тремя заземлителями должно быть таким, чтобы их потенциальные поля незначительно влияли друг на друга. Обычно оно составляет 30—40 м и тогда искомое сопротивление

$$r_x = U/I, \quad (16)$$

где  $U$  — напряжение, измеряемое вольтметром,  $I$  — ток в цепи.

Точность измерения тем выше, чем больше сопротивление обмотки вольтметра в сравнении с сопротивлением зонда  $r_b$ , поэтому лучше применять электростатический вольтметр. Тогда в качестве  $r_b$  можно использовать небольшой штырь. Если верхний провод вольтметра отсоединить от сети, снабдить его добавочным зондом и заглубить этот зонд на участке между  $r_b$  и  $r_x$  в разных точках, то вольтметр измерит потенциал в них. Это позволит построить график распределения потенциала на поверхности земли и принятом направлении.

**Метод трех земель или трех электродов** (рис. 19). На указанных расстояниях от измеряемого заземлителя устанавливают два вспомогательных  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ . Затем попарно подключают заземлители к зажимам сети 1 и 2, напряжение между которыми измеряют вольтметром  $V$ . Измерив амперметром  $A$  три возможных тока  $I_{1x}$ ,  $I_{2x}$  и  $I_{1,2}$ , получим  $r_{1x}$ ,  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ . Тогда будем иметь

$$r_x = (r_{1x} + r_{2x} - r_{2,1})/2. \quad (17)$$

Наибольшая точность получается, если сопротивления  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$  близки сопротивлению  $r_x$ . Но это иногда трудно осуществить, так как предполагаемое сопротивление  $r_x$  может быть малым и тогда вспомогательные получаются сложными. Недостатками обоих методов являются: необходимость производить вычисления после измерения (правда, несложные) и изменение режима сети при заземлении ее выводов, что вынуждает прибегать к разделительным трансформаторам или независимым источникам электрической энергии.

**Метод измерения заземления измерителями МС-08 и М-16** (рис. 20, 21). Основными элементами первого измерителя являются: генератор постоянного тока  $\Gamma$  с ручным приводом (рукояткой  $P$ ), механический преобразователь (коммутатор) постоянного тока в переменный  $\Pi$ , механический преобразователь переменного тока в постоянный (выпрямитель)  $B$ ; магнитно-электрический омметр логометрического типа  $L$  и резистор  $r_d$ . Оба преобразователя смонтированы на оси генератора и имеют одинаковую конструкцию. Каждый представляет два изолированных друг от друга металлических фасонных полуцилиндра. Щетки 1 находятся в непрерывном контакте с основаниями полуцилиндра и имеют переменную полярность, а щетки 2, связанные со щетками генератора, при вращении вала соприкасаются с боковой поверхностью то одного, то другого полуцилиндра. Следовательно, на выходе преобразователя  $\Pi$  (щетки 1) появляется переменный ток  $I_{пер}$ , который и проходит через заземлитель (эта часть цепи показана пунктирной линией). Использование переменного тока во внешней цепи исключает искажение в измерениях, возникшее из-за поляризации и электролиза в грунте.

Между заземлителем  $r_x$  и зондом  $r_b$  образуется разность потенциалов, и в этой части цепи возникает переменный ток  $I_{пер}^1$ , который выпрямляется в коммутаторе  $B$ . Постоянный ток  $I_{пост}^1$  протекает через резистор  $r_d = 150\,000$  Ом, позволяющий снизить погрешность измерения, и рамку с обмоткой напряжения  $H$ . В токовой рамке  $T$  логометра тоже имеется постоянный ток (ветви с постоянным током показаны сплошными линиями). Использование постоянного тока в обмотках логометра повышает точность измерения. От отношения токов  $I_{пост}^1 / I_{пост}^1$  зависит угол поворота рамок относительно друг друга, и этот угол будет пропорционален измеряемому сопротивлению  $r_x$ , так как ток  $I_{пост}^1$  пропорционален потенциалу

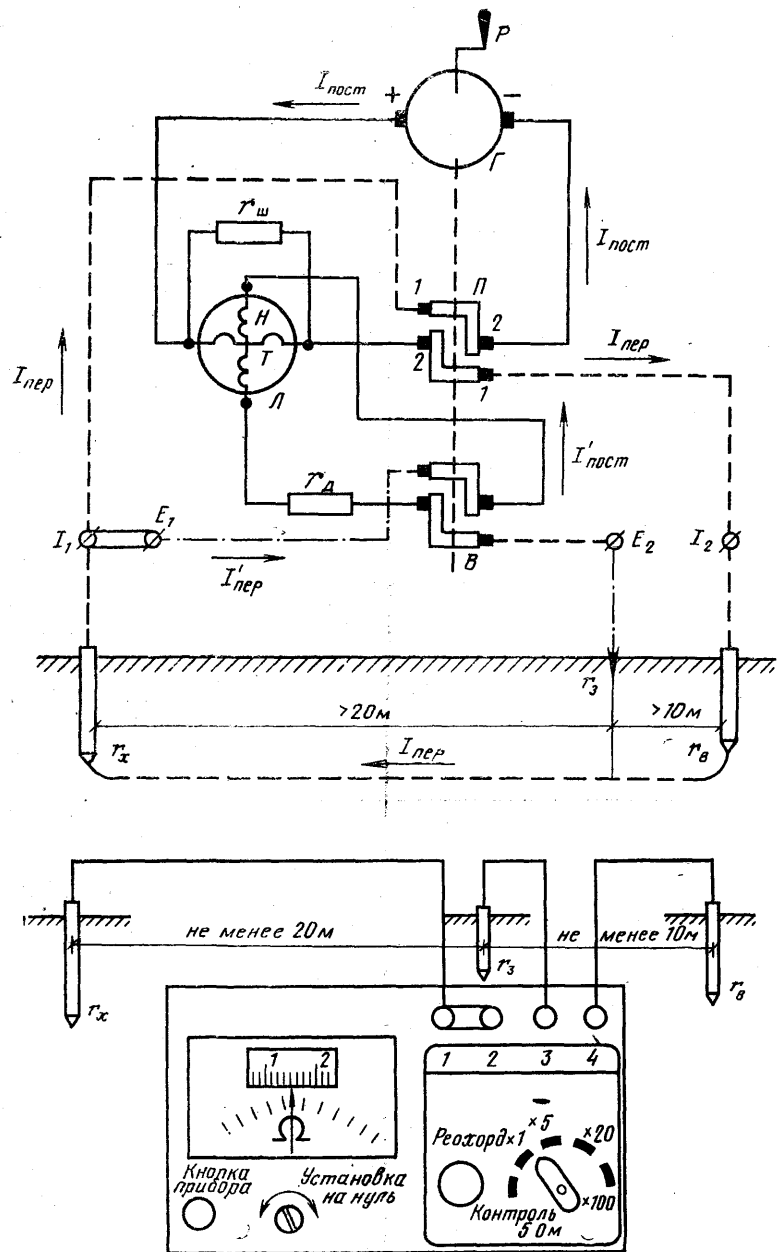


Рис. 21. Схема измерения сопротивления заземлителя прибором М-416

Рис. 20. Схема измерения сопротивления заземлителя прибором МС-08:

Г — генератор постоянного тока; П — механический преобразователь постоянного тока в переменный; В — механический выпрямитель; Л — логометр; Т — токовая обмотка; Н — обмотка напряжения;  $r_d$  и  $r_m$  — резисторы; Р — приводная рукоятка;  $I_1$  и  $I_2$  — токовые зажимы;  $E_1$  и  $E_2$  — потенциальные зажимы

исследуемого заземлителя. По положению стрелки прибора, связанной с одной из рамок, и определяется сопротивление.

В приборе имеется три предела (10, 100 и 1000 Ом), что достигается подключением параллельно к обмотке Т резистора  $r_m$  переключателем на панели прибора. Чтобы переменные блуждающие токи не исказили результатов, необходимо вращать рукоятку Р со скоростью, при которой стрелка не совершает колебаний. Они могут наступить, если частота тока  $I_{пер}$  близка к частоте блуждающего в земле тока. Постоянный блуждающий ток не действует на прибор, так как преобразуется коммутатором в переменный, который при неработающем генераторе вызывает дрожание стрелки, а постоянный ток — ее небольшое отклонение. Сопротивление вспомогательного заземлителя должно составлять 250—1000 Ом (чем выше предел измерения, тем выше это сопротивление), а сопротивление зонда — не более 1000 Ом. Наибольшая погрешность на рабочей шкале составляет 10%.

Измеритель М-416 не содержит вращающегося генератора (рис. 21). Внутрь вкладывается батарея из 3 элементов типа 373 или аналогичных (общее напряжение около 4,5 В). В приборе смонтирован полупроводниковый преобразователь постоянного тока в переменный (инвертор) для токовой цепи (зажимы 1 и 2), к которому присоединяют измеряемый заземлитель  $r_x$  и вспомогательный  $r_b$ , а также полупроводниковый выпрямитель (входные зажимы 2 и 3), логометра нет. Принцип измерения — компенсационный (сравнивается падение напряжения на внешнем сопротивлении  $r_x$  и на эталонном сопротивлении). Имеется четыре диапазона измерения. Отсчет производится, когда реохордом стрелка прибора приводится в нейтральное положение. Проверка прибора делается по эталонному сопротивлению 5 Ом. Если ожидаемое сопротивление  $r_x$  менее 5 Ом, то перемычку между зажимами 1 и 2 снимают и зажим 2 присоединяют к  $r_x$ .

Измерение удельного сопротивления грунта можно произвести прибором МС-08, применяя метод «вертикального электрического зондирования». Для этого забивают в землю на одной прямой четыре электрода на глубину 0,05 а, где а — расстояние между электродами. Электроды внешние присоединяют к зажимам  $I_1$  и  $I_2$  (рис. 20), внутренние — к зажимам  $E_1$  и  $E_2$ . Перемычку между  $I_1$  и  $E_1$  отсоединяют. Перед замером стрелку устанавливают на красной черте, переключатель — на положение «Регулировка». Затем его переводят в положение «Измерение» и делают отсчет  $r_z$ . Удельное сопротивление равно:

$$\rho_{изм} = 2\pi a r_z. \quad (18)$$

Такое измерение делают в теплое время года и в нескольких точках площадки. Если полученные  $\rho_{изм}$  для них отличаются более чем на 50%, то количество точек увеличивают. При разнице менее 30% грунт считают однородным. Для учета климатических условий  $\rho_{изм}$  умножают на повышающий коэффициент согласно табл. 4.

Таблица 4. Повышающие коэффициенты

Типы заземлителей при глубине залегания заземлителей, м	Повышающий коэффициент		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Поверхностный, 0,5	6,5	5	4,5
» 0,8	3	2	1,6
Углубленный (труба, стержень, уголок и т. п.), 0,8	2	1,5	1,4

Коэффициент  $K_1$  вводят при влажном грунте и больших осадках перед измерениями;  $K_2$  — при средней влажности и небольших осадках, предшествующих измерениям, и  $K_3$  — при сухом грунте и отсутствии осадков накануне. Коэффициенты равны единице для заземлителей, уложенных ниже глубины промерзания. Наконец, можно измерить сопротивление трубы  $r_1$  (табл. 2) и вычислить среднее значение удельного сопротивления:

$$\rho_{изм} = r_1 2\pi l / \ln(2l/r'). \quad (19)$$

**Зоны защиты молниеотводов.** Защитное действие молниеотвода 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 к защищаемый объект к общему числу разрядов в систему молниеотвод — объект. Анализом поражения молний различных сооружений [1] 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 [1] и было предложено два типа зон защиты: зона типа А, обладающая степенью надежности 99,5% и выше, и типа Б — 95% и выше. Степень надежности защиты объекта в любом случае возрастает, когда объект удается 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 для мол-

ниеотводов высотой до 150 м [2], которые преимущественно поражаются нисходящими молниями.

При одиночном стержневом молниеотводе зона защиты (при  $h \leq 150$  м) представляет собой конус (рис. 22). 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  $R_x$ . Эти величины определяются так:

$$\text{зона типа А:} \\ h_0 = 0,85h; \quad (20)$$

$$R_0 = (1,1 - 0,002h) h; \quad (21)$$

$$R_x = (1,1 - 0,002h) \times \\ \times (h - h_x/0,85). \quad (22)$$

зона типа Б:

$$h_0 = 0,92h; \quad (23)$$

$$R_0 = 1,5h; \quad (24)$$

$$R_x = 1,5(h - h_x/0,92), \quad (25)$$

где  $R_x$  и  $h_x$  определяются по закону подобия треугольников.

Для зоны типа Б высота молниеотвода при известных величинах  $h_x$  и  $R_x$  может быть определена по формуле

$$h = (R_x + 1,63h_x) / 1,5. \quad (26)$$

**Двойной стержневой молниеотвод** (рис. 23). Торцевые части зоны защиты определяются как зоны одиночных стержневых молниеотводов. Значения  $h_0$ ,  $R_0$ ,  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$  определяются по формулам (20) — (26) для обоих типов зон защиты. Другие величины этой зоны:

зона типа А (существует при  $L \leq 3h$ ):

при  $L \leq h$

$$h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad R_c = R_0; \quad (27)$$

при  $L > h$

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h) (L - h); \quad (28)$$

$$R_c = R_0; \quad R_{cx} = R_0 (h_c - h_x) / h_c. \quad (29)$$

Зона типа Б (существует при  $L \leq 5h$ ):

при  $L \leq 1,5h$

$$h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad R_c = R_0; \quad (31)$$

при  $L > 1,5h$

$$h_c = h_0 - 0,14 (L - 1,5h). \quad (32)$$

Величины  $R_c$  и  $R_{cx}$  определяются по формулам (29) и (30) соответственно. При известных  $h_c$ ,  $L$  и  $R_{cx} = 0$  высота молниеотвода для зоны типа Б определяется по формуле

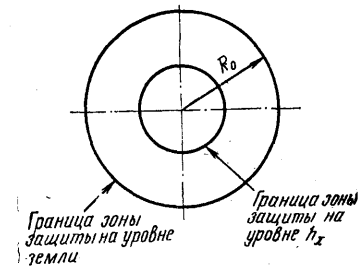
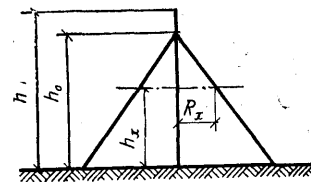


Рис. 22. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

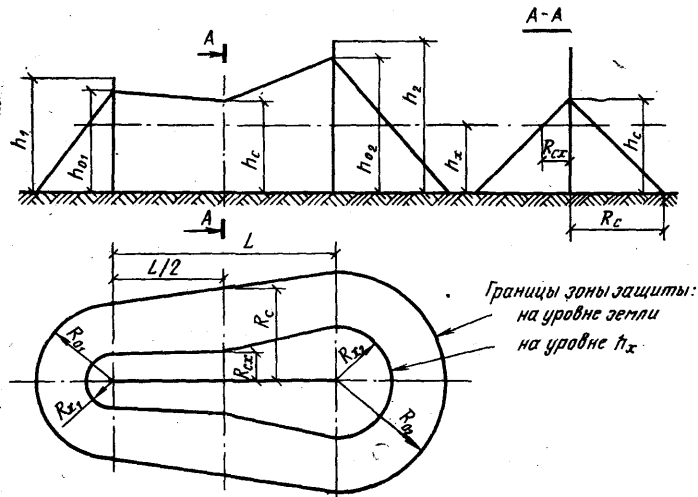
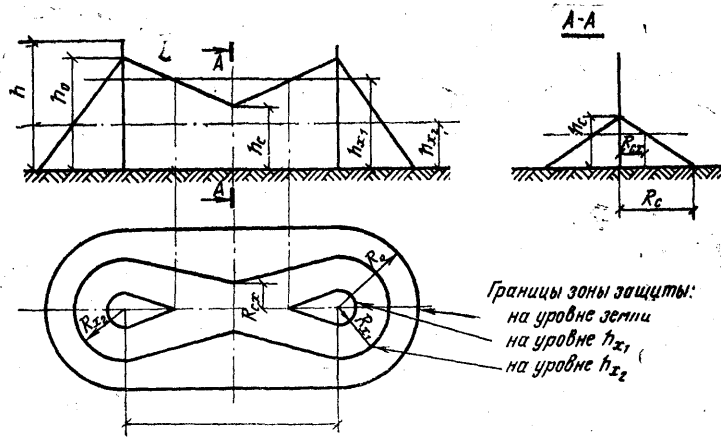


Рис. 23. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

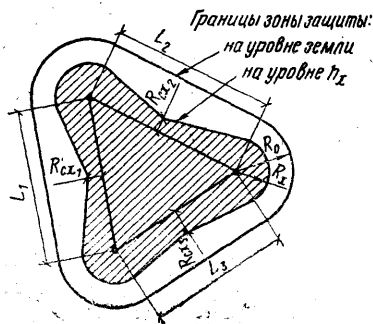


Рис. 24. Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты

Рис. 25. Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода

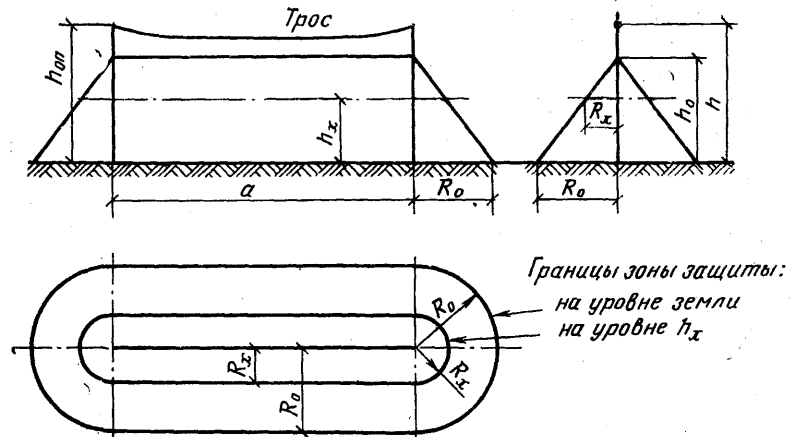


Рис. 26. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

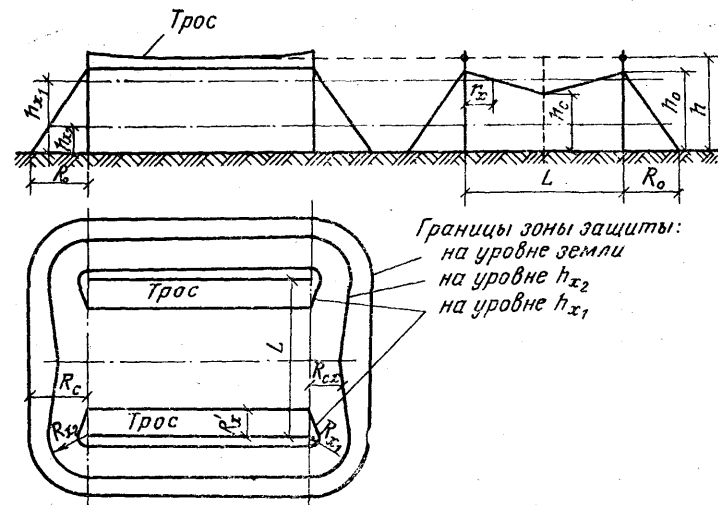


Рис. 27. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

$$h = (h_c + 0,14L) / 1,13. \quad (33)$$

Если стержневые молниеотводы находятся на расстоянии  $L > 3h$  и  $L > 5h$ , их надо рассматривать как одиночные.

Двойной стержневой молниеотвод разной высоты (рис. 24). Торцевые части также представляют собой зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов соответствующей высоты, а  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  вычисляются по формулам (20)–(26) для обоих типов зон. Величина  $R_{cx}$  определяется по формуле (30). Остальные размеры зоны определяются по формулам:

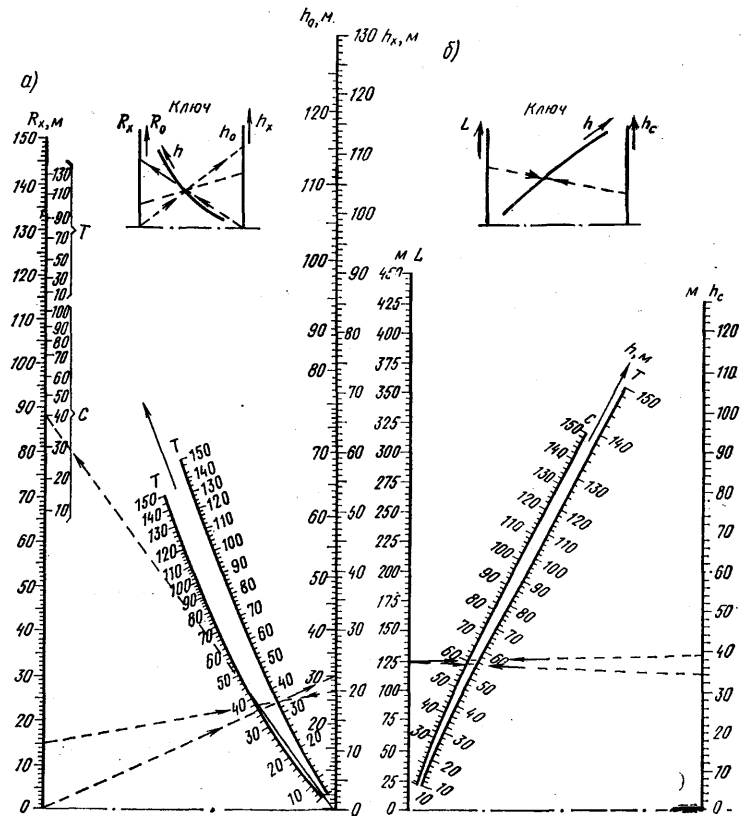


Рис. 28. Номограммы для определения высот одиночных (а) и двойных равной высоты (б) молниеотводов для зоны типа А

$$R_{cx} = R_c [(h_c - h_x) / h_c]; \quad (33)$$

$$R_c = (R_{01} + R_{02}) / 2; \quad (34)$$

$$h_c = (h_{c1} + h_{c2}) / 2, \quad (35)$$

где  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  для обоих типов зон защиты вычисляются по формулам (27), (28), (31), (32). Для разновысокого двойного стержневого молниеотвода зона защиты типа А существует при  $L \leq 3h_1$ , а зона Б — при  $L \leq 5h_1$ .

**Множественный стержневой молниеотвод.** Зона защиты многократного стержневого молниеотвода равной высоты определяется как зона защиты попарно взятых соседних стержневых молниеотводов (рис. 25). Основным условием защищенности одного сооружения или группы сооружений высотой  $h_x$  с надежностью, соответствующей зонам типа А и Б, является неравенство  $R_{cx} \geq 0$  для всех попарно взятых молниеотводов. Величина  $R_{cx}$  для обоих типов определяется по формулам (27), (29), (30) и (31).

**Одиночный тросовый молниеотвод** (рис. 26). Здесь  $h$  — высота троса в точке наибольшего провеса. С учетом стрелы провеса при

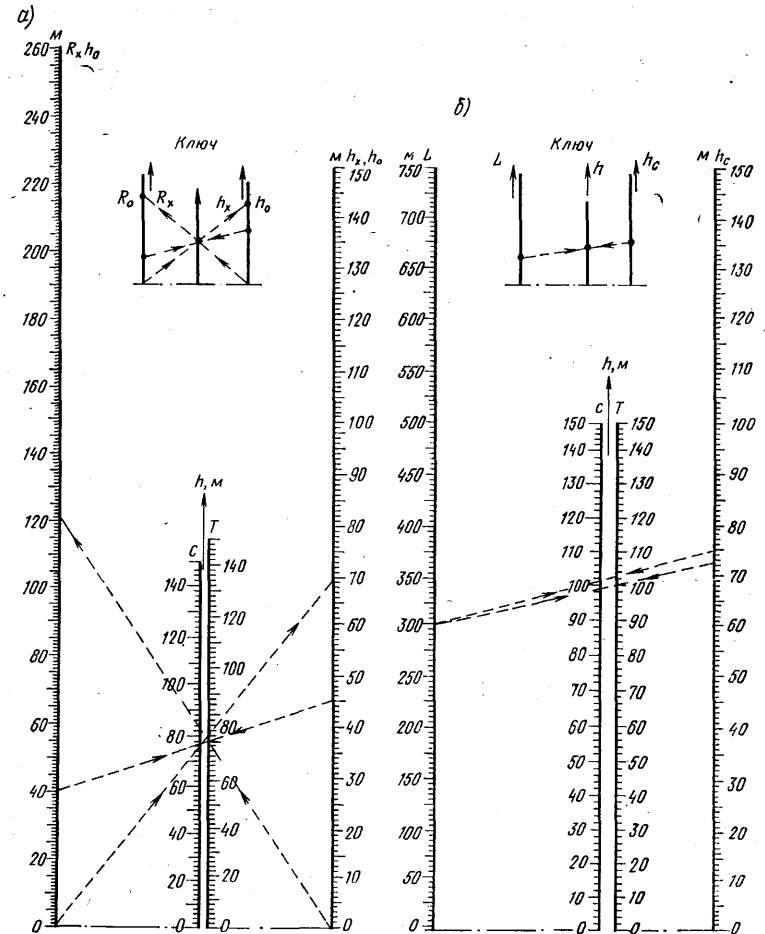


Рис. 29. Номограммы для определения высот одиночных (а) и двойных равной высоты (б) молниеотводов для зоны типа Б

известной высоте опор  $h_{оп}$  и длине пролета  $a < 120$  м высота троса  $h = h_{оп} - 2$  м, а при  $a = 120 \div 150$  м  $h = h_{оп} - 3$  м.

Конфигурацию и размеры зоны защиты одиночных тросовых молниеотводов определяют по выражениям (36) — (40).

Зона типа А:

$$h_0 = 0,85h; \quad R_0 = (1,35 - 0,0025h) h; \quad (36)$$

$$R_x = (1,35 - 0,0025h) (h - h_x / 0,85). \quad (37)$$

Значение  $h_0$  определяется по формуле (20).

Зона типа Б:

$$h_0 = 0,92h \quad (38); \quad R_0 = 1,7h; \quad (39); \quad R_x = 1,7 (h - h_x / 0,92). \quad (40)$$

Для зоны типа Б высота одиночного тросового молниеотвода при известных  $h_x$  и  $R_x$  равна

$$h = (R_x + 1,85h_x)/1,7. \quad (41)$$

Двойной тросовый молниеотвод (рис. 27). Здесь показаны чертания зоны защиты двойного тросового молниеотвода. Размеры  $R_0$ ,  $h_0$ ,  $R_x$  для обоих типов зон защиты определяются по формулам (36)—(41). Остальные габариты зоны защиты двойного тросового молниеотвода определяются следующим образом:

зона типа А (существует при  $L \leq 3h$ ):

$$\text{при } L \leq h \quad h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad (42)$$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4}h)(L - h); \quad R'_x = L/2 [(h_0 - h_x)/(h_0 - h_c)]; \quad R_c = R_0; \quad R_{cx} = R_0 (h_c - h_x)/h_c; \quad (43)$$

зона типа Б (существует при  $L \leq 5h$ ):

$$\text{при } L \leq h \quad h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x, \quad R_c = R_0; \quad (44)$$

$$\text{при } L > h \quad h_c = h_0 - 0,12(L - h); \quad R'_x = L/2 (h_0 - h_x)/(h_0 - h_c); \quad R_c = R_0; \quad R_{cx} = R_0 (h_c - h_x)/h_c. \quad (45)$$

При известных  $h_c$  и  $L$  ( $R_{cx}=0$ ) высота молниеотвода для зоны Б определяется по формуле

$$h = (h_c + 0,12L)/1,07. \quad (46)$$

Высоту молниеотводов и другие параметры их зон защиты можно определить по номограммам [4]. С высотой молниеотвода  $h$ , определяющим границы зон защиты, определенными зависимостями [формулы (20)—(46)] связаны:  $L$  — расстояние между опорами двойного молниеотвода;  $h_0$  и  $R_0$  — наивысшая точка и наименьший (на уровне земли) радиус зоны защиты;  $h_c$  и  $R_{cx}$  — наименьшая высота и половина ширины средней части зоны между опорами двойного молниеотвода;  $h_x$  и  $R_x$  — высота защищаемого объекта и радиус зоны защиты на этой высоте.

Номограммы для определения высот одиночных и двойных равной высоты молниеотводов с зонами А и Б представлены на рис. 28 и 29. Эти номограммы могут быть использованы и при определении параметров  $R_0$  и  $h_0$  (как частных значений  $R_x$  при  $h_x=0$  и  $h_x$  при  $R_x=0$ ). Для этого точку, соответствующую найденному значению  $h$ , соединяют с началом координат ( $h_x=0$  или  $R_x=0$ ) прямой линией, которую продолжают до пересечения со шкалами номограмм для зон А и Б (рис. 28 и 29), и таким образом определяют величину  $R_0$  (или  $h_0$ ).

Пользуясь номограммами, высоту  $h$  молниеотводов для зон А и Б определяют одновременным наложением линейки на три шкалы. При этом для установления третьего (неизвестного) параметра возможно решение задачи по двум из трех заданных переменных ( $h$ ,  $R_x$ ,  $h_x$  — для одиночных и  $h$ ,  $L$ ,  $h_c$  — для двойных молниеотводов) в любом их сочетании. Последовательность действий при нахождении неизвестных величин поясняется ключами, находящимися в каждой из номограмм.

Ниже даются примеры и для определения по номограммам параметров зон защиты типа А (1—2) и Б (3—4).

**Пример 1.** Одиночные молниеотводы. Дано:  $R_x=15$  м  $h_x=20$  м. По рис. 28,а находим  $h=38$  м,  $R_0=40$  м для стержневого и  $h=35$  м,  $h_0=30$  м для тросового молниеотводов.

**Пример 2.** Двойные молниеотводы. Дано:  $L=125$  м,  $h_c=39$  м для стержневого и  $h_c=35$  м для тросового молниеотводов. По рис. 28, б для стержневого и тросового молниеотводов находим  $h=60$  и 55 м соответственно.

**Пример 3.** Одиночные молниеотводы. Дано:  $R_x=40$  м,  $h_x=45$  м. По рис. 29,а находим  $h=75$  м,  $h_0=69$  м для стержневого и  $h=72,5$  м,  $R_0=123$  м для тросового молниеотводов.

**Пример 4.** Двойные молниеотводы. Дано:  $L=300$  м,  $h_c=75$  для стержневого и  $h_c=72,5$  м для тросового молниеотводов. По рис. 29,б находим  $h=103$  и 101,5 м соответственно для стержневого и тросового молниеотводов.

## 5. Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии

**Защита зданий и сооружений I категории.** Защиту от прямых ударов молнии выполняют отдельно стоящими или устанавливаемыми на здании (но изолированно от него на полное перенапряжение прямого удара) стержневыми или тросовыми молниеотводами (рис. 30). Тем самым резко снижаются перенапряжения между элементами здания и вероятность искрения. Молниеотводы должны обеспечивать зону защиты типа А. При ударе молнии в молниеотвод высокий потенциал приобретают все его части. При этом возникающие разности потенциалов могут оказаться недостаточными для пробоя изоляции между токоотводом и частями здания или пробоя в земле между заземлителем молниеотвода и подземными металлическими коммуникациями, связанными со зданием.

В связи с этим одним из основных элементов расчета молние-защиты здания I категории является определение минимально до-

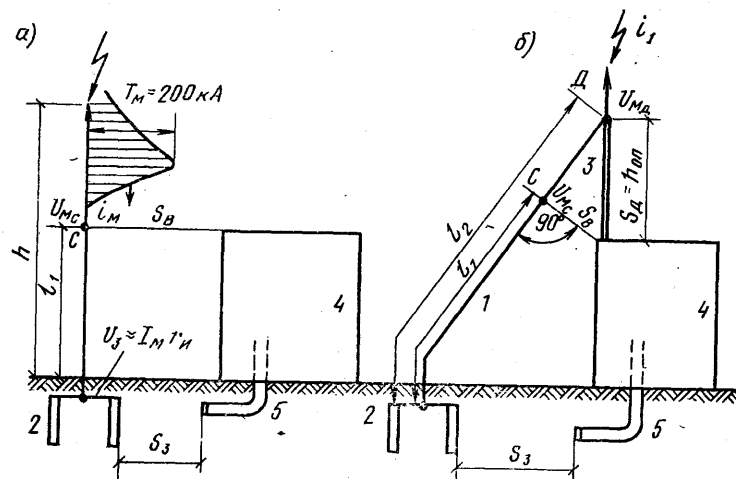


Рис. 30. Расчетные схемы для определения безопасных расстояний от молниеотвода до сооружения

а — отдельно стоящий стержневой молниеотвод; б — изолированный молниеотвод от здания; 1 — токоотвод; 2 — заземлитель; 3 — опора изолированного молниеотвода; 4 — сооружение I категории; 5 — металлическая коммуникация

пустых расстояний от молниеотвода до защищаемого здания. Они определяются по воздуху, дереву, стеклопластику, кирпичу или земле на основании расчета потенциалов в тех точках, где может произойти наиболее вероятное перекрытие на здание. Согласно рис. 30, такими точками могут быть *C* и *D*. Потенциал этих точек зависит от величины амплитуды и крутизны тока, индуктивного или волнового сопротивления токоотвода, от длины участков  $l_1$  и  $l_2$  и от сопротивления заземлителя  $r_{\text{н}}$  поскольку оно включено последовательно с этими участками.

*Допустимое расстояние в земле*  $S_3$ . При прямом ударе молнии в молниеотвод на заземлителе возникает потенциал с амплитудой

$$V_3 = I_{\text{м}} r_{\text{н}}. \quad (47)$$

Тогда минимальное допустимое значение  $S_3$ , при допустимой средней напряженности электрического поля в земле  $E_3 = 300$  кВ/м и амплитуде тока  $I_{\text{м}} = 200$  кА получается равным

$$S_3 > I_{\text{м}} r_{\text{н}} / E_3 = 200 r_{\text{н}} / 300 \geq 0,66 r_{\text{н}}. \quad (48)$$

Практически [2] же расстояние в земле  $S_3$  определяется по соотношениям (так как  $I_{\text{м}} = 200$  кА маловероятен):

$$S_3 > 0,5 r_{\text{н}} \text{ — для стержневых молниеотводов}; \quad (49)$$

$$S_3 > 0,3 r_{\text{н}} \text{ — для тросовых молниеотводов}. \quad (50)$$

Однако величину  $S_3$  нельзя брать менее 3 м, кроме случая, когда металлические подземные коммуникации не вводятся в защищаемое здание, а расстояние до места их ввода в соседние защищаемые здания I категории составляет более 50 м. Тогда  $S_3$  можно уменьшить до 1 м.

Для уменьшения перенапряжений импульсное сопротивление заземлителя для каждого отдельно стоящего или изолированного молниеотвода должно быть не более 10 Ом. В грунтах с удельным сопротивлением  $5 \cdot 10^2$  Ом·м и выше значение  $r_{\text{н}}$  может достигать 40 Ом, но при этом увеличивают  $S_3$ ,  $S_в$  и  $S_д$  [см. формулы (48), (49), (50), (53) и (55)].

*Допустимое расстояние по воздуху*  $S_в$  и *дереву*  $S_д$ . При прямом ударе молнии в молниеотвод максимальный потенциал  $V_l$ , кВ, в любой точке токоотвода (в точке *C*, рис. 30, а), расположенной на расстоянии  $l$  от заземлителя, будет составлять:

$$V_l = I_{\text{м}} r_{\text{н}} + L (di_{\text{м}}/dt)_{\text{макс}}. \quad (51)$$

где  $L$  — индуктивность участка токоотвода от заземлителя до рассматриваемой точки. Она равна  $L_0 l$ , где  $L_0$  — удельная индуктивность, которая для металлических молниеотводов решетчатой конструкции и отдельно проложенных токоотводов составляет в среднем  $L \approx 1,7$  мкГн/м.

Чтобы исключить перекрытие с молниеотвода на здание, расстояние  $S_в$  (см. рис. 30) между молниеотводом и зданием должно быть не менее

$$S_в > V_l / E_в, \quad (52)$$

где  $E_в$  — допустимая средняя напряженность электрического поля в воздухе, равна 500 кВ/м.

Если в формулу (52) подставить значения  $E_в$  и  $V_l$  из формулы (51), то при  $I_{\text{м}} = 200$  кА и  $(di_{\text{м}}/dt)_{\text{макс}} = 60$  кА/мкс получим искомое расстояние, м:

$$S_в > (200 r_{\text{н}} + 1,71 \cdot 60) / 500 = 0,4 r_{\text{н}} + 0,21. \quad (53)$$

Для случая когда изоляцией частей молниеотвода служит дерево, допустимое расстояние, например  $S_д$  (см. рис. 30, б), должно быть

$$S_д > V_l / E_д, \quad (54)$$

где  $E_д$  — допустимая средняя напряженность электрического поля в дереве, равная 250 кВ/м.

Если в формулу (54) подставить  $E_д$  и  $V_l$  из формулы (51), получим

$$S_д > (200 r_{\text{н}} + 1,71 \cdot 60) / 250 = 0,8 r_{\text{н}} + 0,41. \quad (55)$$

*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 [3], приведены в табл. 5.

Таблица 5. Зоны взрывоопасности у места выброса горючих паров и газов

Избыточное давление внутри установки, кПа	Плотность газа	Зоны взрывоопасности от обреза трубы, м
Не более 5	Тяжелее воздуха	По вертикали над колпаком — 1; по горизонтали во все стороны — 2
От 5 до 25	То же	По вертикали — 2,5; по горизонтали — 5
Не более 25	Легче воздуха	По вертикали — 2,5; по горизонтали — 5
От 25 до 50	Любой	По вертикали — 4; по горизонтали — 8

В табл. 5 зоны взрывоопасности от обреза трубы приведены при наличии конических колпаков над газоотводными или дыхательными трубами. Для газоотводных и дыхательных труб (независимо от наличия на них огнепреградителей), не оборудованных коническими колпаками или «гусаками», зоной взрывоопасности является пространство над их обрезом, определяемое по нормам [2]. 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 или факелами, поджигаемыми в момент выброса газов; при выбросе газов невзрывоопасной концентрации или при азотном дыхании технологических аппаратов; для вентиляционных шахт, предохранительных и аварийных клапанов.



Защиту от прямых ударов молнии выполняют отдельно стоящими или установленными на зданиях неизолированными стержневыми либо тросовыми молниеотводами, обеспечивающими тип зоны в зависимости от количества поражений  $N$  (см. гл. III). 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 здания. Их присоединяют к заземлителю с импульсным сопротивлением не более 10 Ом, а в грунтах с сопротивлением  $5 \cdot 10^2$  Ом·м и выше — не более 40 Ом.

В грунтах с удельным сопротивлением до  $5 \cdot 10^2$  Ом·м рекомендуется в качестве заземлителей использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений. Защита осуществляется при помощи молниеприемной сетки или с использованием в качестве молниеприемника металлической кровли. Молниеприемную сетку (с площадью ячеек не более  $36 \text{ м}^2$ ) укладывают непосредственно на кровлю или под несгораемый утеплитель. Металлические элементы, расположенные на крыше (трубы, вентиляционные устройства), соединяют с металлической кровлей или молниеприемной сеткой, а неметаллические части, возвышающиеся над крышей, оборудуют дополнительными молниеприемниками, присоединенными к крыше или сетке, узлы которой должны быть сварены.

Для токоотводов рекомендуется использовать металлические конструкции защищаемых зданий (за исключением напрягаемой арматуры): колонны, фермы, металлические направляющие лифтов и пр. Токоотводы, соединяющие молниеприемную сетку или металлическую кровлю с заземлителями, прокладываются через каждые 25 м по контуру здания. Разрешается во всех случаях объединять заземлители молниеотводов с заземлителями других назначений.

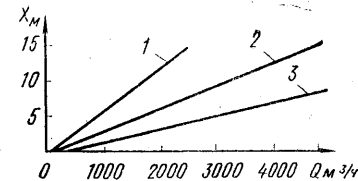
При защите отдельно стоящими молниеотводами допустимые расстояния от них до здания, а также до подземных коммуникаций не нормируются. На зданиях, в которых верхние плиты перекрытия уложены на металлические фермы и использованы негорючие утеплители, установки молниеприемников или наложения молниеприемной сетки не требуется. Нужно только соединить фермы токоотводами с заземлителями.

В здании шириной 100 м и более, защищаемом молниеотводами, установленными на самом здании, или молниеприемной сеткой, а также при помощи металлической кровли, кроме наружных заземлителей необходимо устанавливать дополнительные, выравнивающие потенциал внутри здания. Для этого используют стальные полосы сечением не менее  $100 \text{ мм}^2$ . Их укладывают не более чем через 60 м под полом в прунте на глубине 0,5 м. Эти полосы с двух сторон должны быть соединены с наружным контуром заземления и токоотводами молниеприемников. Для зданий, имеющих газоотводные трубы и сечи, молниеотводы проектируют с учетом зон взрывоопасности, как и для зданий I категории.

Защита наружных технологических установок и открытых складов 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 легковоспламеняющихся жидкостей или горючих газов и т. д. [2]. Так, для защиты

Рис. 31. Размеры взрывоопасных зон для стенок вертикальных резервуаров

1 — нестабильные бензины (для них  $Q$  — мощность выброса паров и газов); 2 — стабильные бензины при  $t=40^\circ\text{C}$ ; 3 — стабильные бензины при  $t=20^\circ\text{C}$  (для стабильных бензинов  $Q$  — производительность закачки)



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  $200 \text{ м}^3$  (независимо от толщины металла) достаточно заземлить корпус.

Технологические установки и резервуары при толщине металла крыши менее 4 мм защищают отдельно стоящими или устанавливаемыми на них молниеотводами. Установки класса В-Iг, корпус которых выполнен из железобетона или синтетических материалов, защищают любым молниеотводом или укладывают на крышу молниеприемную сетку, присоединяя ее к заземлителю. Она допускает-ся только при полной герметичности крыши.

Парк резервуаров со сжиженными газами при общем объеме более  $8 \text{ тыс. м}^3$ , а также парк резервуаров из любого материала с общим объемом более  $100 \text{ тыс. м}^3$  защищают от прямых ударов молнии предпочтительно отдельно стоящими молниеотводами, если это не приводит к значительному увеличению капитальных затрат по сравнению с установленными на самих резервуарах. При защите металлических резервуаров отдельно стоящими молниеотводами корпуса резервуаров присоединяют к заземлителю; к этим же заземлителям допускается присоединение токоотводов отдельно стоящих молниеотводов. Парки подземных железобетонных резервуаров (класса В-Iг), 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, а высота 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 так же, 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 класса В-Iг 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 тыс. до  $20 \text{ тыс. м}^3$  зависят в основном от мощности выброса паров и газов и скорости ветра. Эти зоны можно определить по графику (рис. 31) [5]. На нем размеры взрывоопасных зон  $X$  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 умень-

шены на 10% по сравнению с зонами для соответствующих бензинов. Для других наружных технологических установок класса В-Iг размеры взрывоопасных зон определяются по табл. 5 и нормам [2].

Импulseное сопротивление каждого заземлителя наружных установок должно быть не более 50 Ом. Число присоединений и соответственно количество заземлителей зависит от периметра основания установки. Необходимо, чтобы присоединения располагались не более чем через 50 м друг от друга, но число присоединений должно быть не менее двух.

**Защита зданий и сооружений III категории** обычно выполняется одним из способов, рекомендуемых для II категории. Отличием является лишь то, что площадь ячейки молниеприемной сетки допускается до 150 м<sup>2</sup>. Импulseное сопротивление каждого заземлителя не должно превышать 20 Ом, а для труб, башен и вышек — до 50 Ом. Наружные установки или отдельные резервуары (установки с зонами класса П-III по ПУЭ) с металлическими, железобетонными или синтетическими корпусами от прямых ударов молнии защищают аналогично установкам класса В-Iг, но над дыхательными и газоотводными трубами и клапанами зона взрывоопасности может не учитываться.

#### 6. Защита зданий и сооружений от вторичных воздействий молнии

Защите от вторичных воздействий молнии (электростатической и электромагнитной индукции) подлежат здания и сооружения I и II категории и некоторые виды наружных установок классов В-Iг и П-III. Она почти всегда сочетается с защитой от статического электричества.

**Защита зданий I категории** от электростатической индукции выполняется присоединением металлических корпусов всего оборудования и металлических конструкций здания к специальному заземлителю или защитному заземлению электроустановок. Общее сопротивление растеканию тока промышленной частоты специального заземлителя должно быть не более 10 Ом, а расстояние от этого заземлителя или защитного заземления электроустановок до заземлителя молниеотводов определяется по формулам (49) и (50).

Для защиты от искрения, порожденного электромагнитной индукцией, все трубопроводы и другие протяженные металлические предметы здания и оборудования на участке их взаимного сближения на 10 см и меньше необходимо электрически соединить перемычками через каждые 20 м. 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 зданий II категории** от электростатической индукции обеспечивается присоединением металлических корпусов всего оборудования к защитному заземлению электроустановок. Плавающие крыши (понтон) резервуаров в установках классов В-Iг и П-III 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 I категории, но перемычки устанавливаются через 25—30 м в местах опасного сближения. Перемычки в местах соединений (на фланцах) трубопроводов и других протяженных конструкций не требуются.

#### 7. Защита зданий от заноса высокого потенциала

**Защита зданий I категории.** Ввод воздушных линий любого назначения в здания не разрешается. Вместо них должны применяться подземные кабельные линии от центральных распределительных пунктов. Оболочки и броня кабелей необходимо присоединять у места ввода в здание к защитному заземлению электроустановок. Расстояние от подземных кабелей до заземлителей отдельно стоящих или изолированных молниеотводов выбирается по формулам (49) и (50). В месте перехода воздушной линии в кабельную вставку металлическая оболочка и броня кабеля, а также штыри или крючья изоляторов должны присоединяться к заземлителю с импulsiveным сопротивлением не более 10 Ом. В этом же месте между жилами кабеля и его металлической оболочкой следует установить закрытый воздушный искровой промежуток с межэлектродным расстоянием 2—3 мм или низковольтный вентиляльный разрядник. У следующей опоры воздушной линии устраивают заземлитель с импulsiveным сопротивлением до 20 Ом и присоединяют к нему штыри изоляторов.

Для защиты от заноса высоких потенциалов по подземным металлическим конструкциям (трубопроводы, кабели, в том числе проложенные в каналах, тоннелях) при вводе в здание или сооружение эти коммуникации присоединяют к заземлителям защиты от электростатической индукции или к защитному заземлению электроустановок. В здание можно вводить трубопроводы и кабели, монтируемые на эстакадах и идущие от цехов, технологически связанные с ним. У ввода в здание трубопроводы и металлические оболочки кабелей присоединяют к заземлителю защиты от электростатической индукции, а на двух ближайших опорах эстакады — к заземлителям с импulsiveным сопротивлением не более 10 Ом.

**Защита зданий II категории.** Ввод воздушных линий любого назначения непосредственно в здание не допускается. Необходимо прокладывать кабельную вставку от воздушных линий как и для зданий I категории. 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 и у ближайшей к зданию опоры следует подключить к самостоятельному заземлителю или заземлителю молниеотвода с импulsiveным сопротивлением не более 10 Ом.

**Защита зданий III категории.** Ввод воздушных линий напряжением до 1000 В в здания должен выполняться в соответствии с ПУЭ, а линии связи, сигнализации, радио — по указаниям соответствующих ведомств.

Для защиты от заноса высоких потенциалов трубопроводы и металлические оболочки кабелей, проложенные на эстакадах, следует присоединять на вводе в здание к заземлителю с импulsiveным сопротивлением не более 20 Ом. Такое присоединение допускается осуществлять к заземлителям молниеотводов или к защитному заземлению электроустановок. На ближайшей от здания опоре трубопроводы и кабели присоединяют к заземлителю с импulsiveным сопротивлением не более 20 Ом.

#### 8. Эксплуатация молниезащитных устройств

Нормальная организация эксплуатации молниезащитных устройств предусматривает наряду с текущим и предупредительными ремонтами периодические ревизии (осмотры). Цель ревизий: про-

верить надежность электрической связи между токоведущими элементами (в местах сварки, болтовых и прочих соединениях); выявить элементы в защитных устройствах, требующие замены или усиления из-за механических повреждений; определить степень разрушения коррозией отдельных элементов молниезащиты и принять меры по антикоррозионной защите и усилению элементов; проверить соответствие молниезащитных устройств категории здания или установки; измерить сопротивление всех заземлителей молниезащиты (не реже одного раза в два года), а при повышении их сопротивления более чем на 20% в сравнении с допустимым (расчетным) — принять меры по доведению до требуемых величин. На основании ревизий определяют объемы предупредительного ремонта устройств молниезащиты, который должен быть закончен к началу прозового сезона (март — для южных и апрель — для центральных районов СССР). Мелкие текущие ремонты молниезащитных устройств могут быть произведены во время грозового сезона, а капитальные ремонты — в негрозовое время года.

Недостаточно квалифицированный надзор за состоянием и осуществлением молниезащиты требованиям пожарной безопасности приводит к тому, что производимые строительно-монтажные и технологические изменения на объекте повышают степень его пожаро- и взрывоопасности, а молниезащитные устройства остаются без изменений. Высококвалифицированный надзор за молниезащитными устройствами может быть достигнут на тех объектах, где в составе электроцеха создана специальная группа или бригада, занимающаяся вопросами их эксплуатации. Главный энергетик или начальник электроцеха должны разработать инструкцию по эксплуатации указанных устройств, учитывающую все конкретные особенности объекта. Лица, проводящие такую ревизию, должны составить акт осмотра и проверки с указанием обнаруженных дефектов. Результаты проверочных испытаний заземляющих устройств и произведенных ремонтов заносятся в специальный эксплуатационный журнал.

### 9. Примеры расчета молниезащиты зданий и сооружений

Развитие нефтяной, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, снабжения нефтепродуктами промышленных, энергетических, транспортных и сельскохозяйственных предприятий повышает пожарную опасность. Резервуары и резервуарные парки с ЛВЖ по устройству молниезащиты относятся к сооружениям II категории и подлежат молниезащите на всей территории СССР, а молниеотводы предусматриваются с зонами типа Б (п. 3 табл. 1 [2]). Ожидаемое количество  $N$  поражений таких технологических устройств, не оборудованных молниезащитой, определяется по формуле (10).

Для отдельных резервуаров, их групп или резервуарного парка в целом за величины  $S$  и  $L$  следует принимать стороны прямоугольника, в который могут быть вписаны все резервуары. При этом расстояние между ними в пределах одной группы или между группами резервуаров по всей промышленной площадке принимается равным  $6H$  (рис. 32). Величина защитного уровня  $h_x$  для резервуарных парков с емкостями 10, 15 и 20 тыс. м<sup>3</sup> принимается с учетом наибольшей высоты резервуара ( $H$ ) и высоты зоны взрывоопасности над крышей, равной 5 м. Так, высота защитного уровня для резервуара РВС-20000 принимается равной 18 м ( $h_x = H + 5 = 12,94 +$

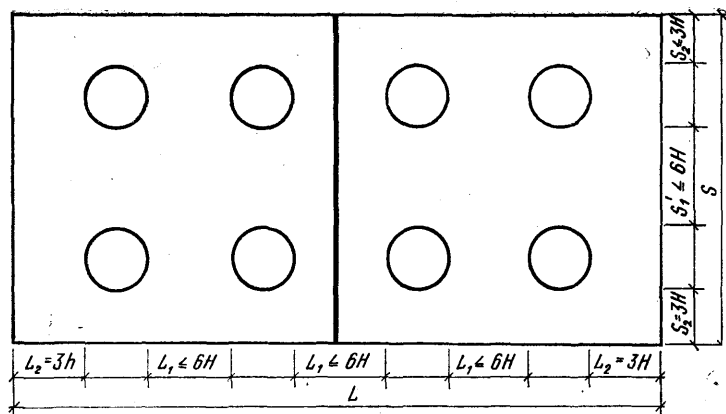


Рис. 32. Схема определения  $S$  и  $L$  [к формуле (10)]

$+5 = 17,94$  м). Защитный уровень  $h_x$  для резервуаров типа РВС-50000 — 24,4 м.

Количество опасных поражений молнией резервуаров, оборудованных молниезащитой. В п. 4.1 [2] приводятся степени надежности, которыми обладают зоны защиты молниеотводов. С учетом этого коэффициенты надежности для определения опасных поражений будут для зоны защиты типа А  $\beta_1 = 0,005$ , для зоны защиты типа Б  $\beta_2 = 0,05$ . Следовательно, количество опасных поражений  $N'$  для зданий и сооружений, требующих зону защиты типа А, будет равно:

$$N' = N\beta_1, \quad (56)$$

а для зданий и сооружений, требующих зону защиты типа Б:

$$N' = N\beta_2. \quad (57)$$

Вероятность поражения резервуаров молнией может быть определена по формуле Пуассона:

$$P = 1 - e^{-N'T} \quad (58)$$

где  $T$  — нормативный (20 лет) или промежуточный срок эксплуатации резервуара, в годах.

Примеры расчета вероятностей поражения молнией отдельно стоящих резервуаров и резервуарных парков с нефтью. Для отдельно стоящих резервуаров (рис. 33) принимаем:  $h_x = 18$  м;  $S = L = d = 45,6$  (для РВС-20000) и  $h_x = 24,4$  и  $S = L = d = 60,7$  м (для РВС-50000).

Подставляя эти данные в формулу (10) при усредненном значении  $n = 6$  (табл. 2), получим значения  $N$ : для РВС-20000  $N = 0,14$ , а для РВС-50000  $N = 0,257$ .

С учетом коэффициентов надежности зон защиты по формулам (56) и (57) получаем соответственные значения опасных поражений

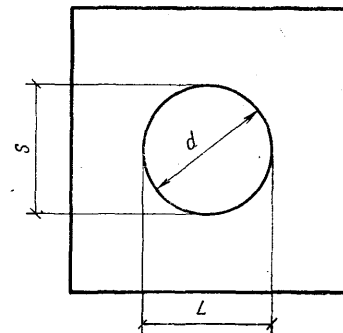


Рис. 33. Схема определения  $S$  и  $L$  [к формуле (10)] для одиночных резервуаров

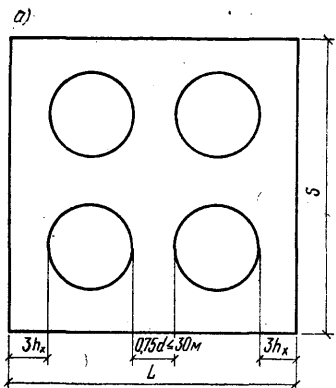


Рис. 34. Схема определения  $S$  и  $L$  [к формуле (10)] для резервуаров в пределах одной группы

$a$  — РВС-20000;  $б$  — РВС-50000

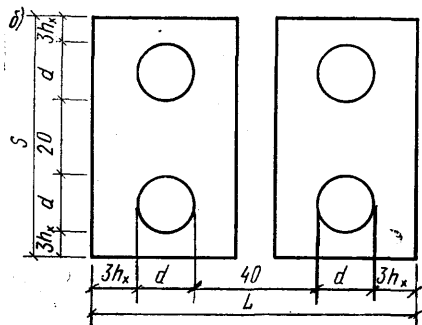
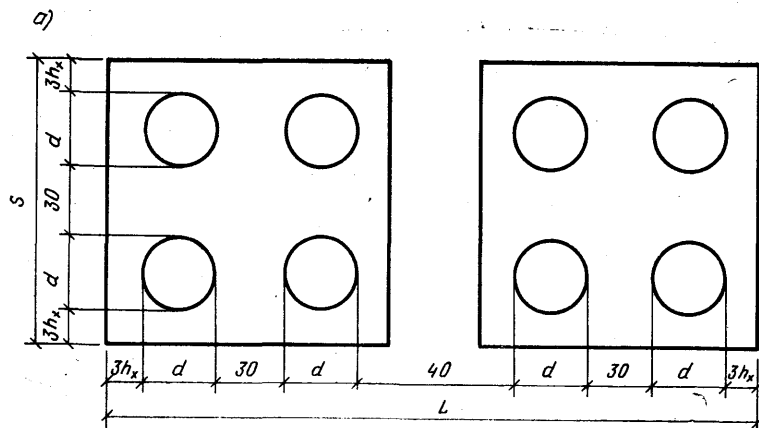
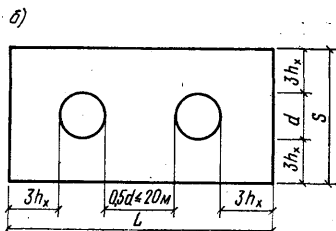


Рис. 35. Схема определения  $S$  и  $L$  [к формуле (10)] для резервуаров в пределах двух групп:

$a$  — РВС-20000;  $б$  — РВС-50000

$N'$ : для РВС-20000  $N'_A = 0,000707$  и  $N'_B = 0,007$ ; для РВС-50000  $N'_A = 0,00128$  и  $N'_B = 0,0128$ .

Вероятность поражения резервуаров молнией за один год и за 20 лет определяем по формуле (58): за один год для РВС-20000  $P_A = 0,0008$  и  $P_B = 0,008$ ; для РВС-50000  $P_A = 0,002$  и  $P_B = 0,013$ ; за 20 лет — для РВС-20000  $P_A = 0,015$  и  $P_B = 0,132$ ; для РВС-50000  $P_A = 0,026$ ,  $P_B = 0,226$ .

Результаты вышеприведенных вычислений, по определению вероятностей поражений резервуаров молнией и подобных вычислений для склада с резервуарами из одной группы (рис. 34) или двух групп (рис. 35), приводятся в табл. 6.

Таблица 6. Вероятность поражения прямым ударом молнии резервуаров

Варианты примеров расчета	Зона типа А		Зона типа Б		Номера рисунков
	1 год	за 20 лет	1 год	за 20 лет	
Отдельно стоящие резервуары: РВС-20000 РВС-50000	0,0008 0,002	0,015 0,026	0,008 0,0128	0,132 0,226	Рис. 33 Рис. 33
В пределах одной группы: РВС-20000 РВС-50000	0,004 0,005	0,066 0,088	0,0336 0,045	0,4944 0,602	Рис. 34, а Рис. 34, б
В пределах двух групп: РВС-20000 РВС-50000	0,0051 0,006	0,096 0,112	0,0492 0,058	0,6351 0,694	Рис. 35, а Рис. 35, б

Из данных табл. 6 видно, что вероятность поражения резервуаров прямыми ударами молнии при варианте с зонами защиты типа А на порядок ниже, чем при варианте с зонами защиты типа Б. Сравнительная оценка экономической целесообразности устройства молниезащиты с зонами защиты типа А и Б приведена в табл. 7.

Из табл. 7 видно, что при установке молниеприемников на резервуарах разница общих расходов на устройство молниезащиты с зонами типа А и Б незначительна. При их защите отдельно стоящими молниеотводами разница затрат на устройство молниезащиты с теми же зонами уже весьма значительна. Таким образом, учитывая статистику пожаров в резервуарных парках от прямых ударов молнии (8,93% общего их числа за 1968—1978 гг. по РСФСР) и данные табл. 6, можно сделать вывод, что предусмотренная нормами [2] молниезащита для них (типа РВС-10000, -20000 и -50000) молниеотводами с зонами типа Б недостаточно эффективна. Оценка капитальных вложений и затрат металла и

Таблица 7. Экономические показатели вариантов молниезащиты резервуаров

Емкость резервуаров и зоны защиты молниеотводов	Расход металла, кг	Разница в расходе металла, кг	Расход железобетона, м <sup>3</sup>	Общие затраты, руб.
Молниезащита резервуаров РВС-20000 молниеприемниками, установленными на резервуарах (парк из 4-х резервуаров и 6-ю молниеприемниками на каждом) при зоне:				
типа А	2958,3	—	—	911
» Б	2517,5	440,8	—	833
То же, при защите отдельно стоящими молниеотводами (4 молниеотвода) при зоне:				
типа А	22640,9	—	79,2	16 380
» Б	14378,2	8262,7	79,2	13 324
Молниезащита резервуаров РВС-50000 молниеприемниками, установленными на резервуарах (парк из 4-х резервуаров и 4-мя молниеприемниками на каждом) при зоне:				
типа А	2519,6	—	—	705
» Б	1895,5	624,1	—	599
То же, при защите отдельно стоящими молниеотводами (6 молниеотводов) при зоне:				
типа А	38307,5	—	118,8	26 184
» Б	27691,5	10 616	118,8	22 356

железобетона на сооружение молниеотводов с зонами защиты типа А и Б (табл. 7) позволяет сделать следующие выводы:

расход металла и железобетона и общие затраты при выполнении молниезащиты отдельно стоящими молниеотводами превышают такие же затраты при устройстве молниеприемников на самих резервуарах, соответственно в 5—15 раз для РВС-20000 и в 15—37 раз для РВС-50000;

стоимость и затраты металла (при отсутствии затрат железобетона) при варианте молниезащиты молниеприемниками, установленными на самих резервуарах, для зон защиты типа А и Б отличаются весьма незначительно;

в проектной практике молниезащиту резервуаров типа РВС-10000—50000 целесообразно предусматривать молниеотводами с зонами типа А, расположенными на резервуарах, что позволит повысить надежность молниезащиты на порядок и более, чем при молниеотводах с зонами типа Б с несущественной разницей экономических затрат (табл. 6 и 7);

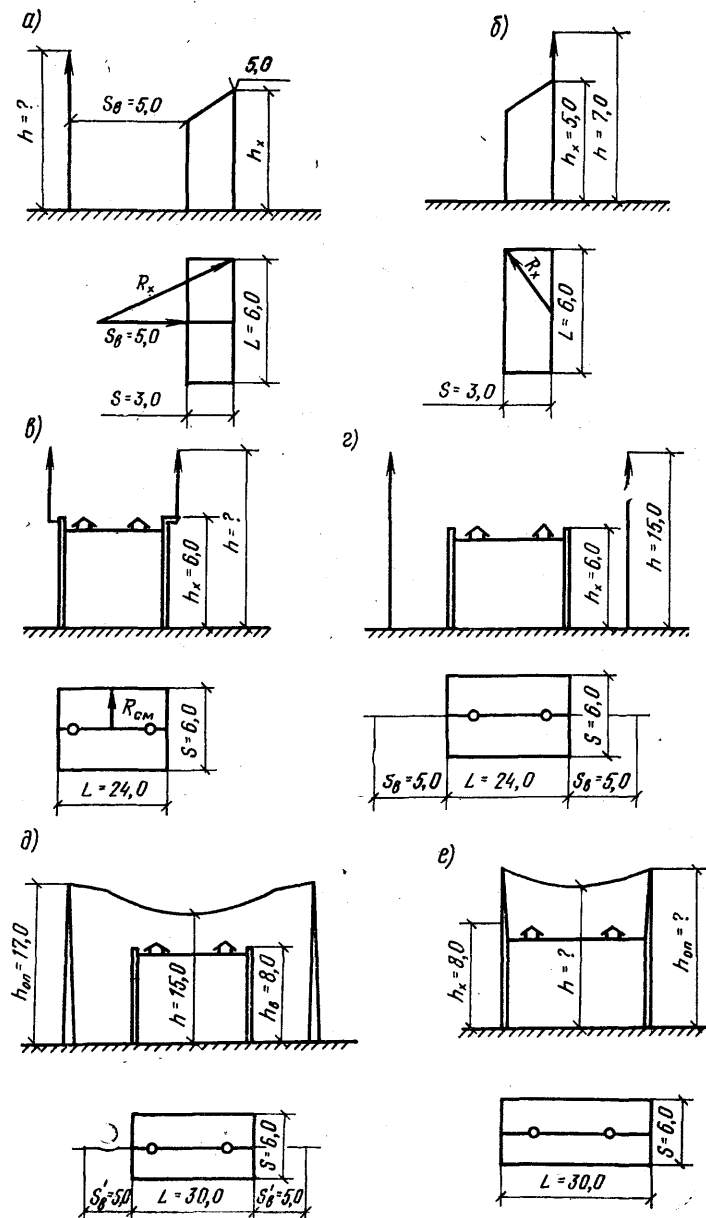


Рис. 36. Схемы вариантов молниезащиты зданий

в особо ответственных случаях (при соответствующем обосновании) еще большая степень надежности молниезащиты резервуарных парков может быть достигнута отдельно стоящими молниеотводами с зонами типа А, хотя экономические затраты при этом могут существенно повышаться по сравнению с вариантом расположения молниеприемников на резервуарах (табл. 7).

**Пример 1.** Дать рекомендацию о необходимой высоте  $h$  отдельно стоящего стержневого молниеотвода для защиты здания газораспределительного пункта природного газа. Местоположение молниеотвода и размеры здания даны на рис. 36. Здание находится в местности с грозовой деятельностью 60—80 ч в год.

**Решение.** 1. Определяем категорию здания газораспределительного пункта. Так как класс зоны по ПУЭ-76 В-1а, то категория здания — II (п. 2 табл. 1 [2]).

2. Определяем тип зоны защиты молниеотвода, учитывая, что при  $N > 1$  — зона типа А, а при  $N \leq 1$  — зона типа Б; по формуле (10) определяем  $N = (3+6 \cdot 5)(6+6 \cdot 5)9 \cdot 10^{-6} = 0,0107 < 1$ ; так как  $N = 0,0107 < 1$ , то зона защиты молниеотвода должна быть типа Б.

3. Необходимую высоту молниеотвода определяем по формуле (26):

$$h = (8,54 + 1,63 \cdot 5) / 1,5 = 11,13 \text{ м,}$$

т. е. принимаем  $h = 12 \text{ м}$

$$R_x = \sqrt{(5+3)^2 + 3^2} = 8,54 \text{ м; } h_x = 5 \text{ м.}$$

**Пример 2.** Дать заключение о соответствии защиты здания газораспределительного пункта природного газа молниеотводом расположенным на здании (рис. 36,б). Размеры здания и грозовая деятельность те же, что и в примере 1.

**Решение.** Категория здания II, тип зоны защиты молниеотвода — Б (по данным пп. 1 и примера 1).

Требуемую высоту молниеотвода получим равной  $h = (4,24 + 1,63 \cdot 5) / 1,5 = 8,26 \text{ м; } R_x = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4,24 \text{ м.}$

Сравнивая требуемую высоту молниеотвода (8,26 м) с фактической (7 м), делаем вывод, что высота молниеотвода принята недостаточной.

**Пример 3.** Дать рекомендацию по необходимой высоте двойного стержневого молниеотвода для защиты здания насосной станции сырой нефти. Станция находится в местности с грозовой деятельностью 40—60 ч в год. Размеры здания и расположение молниеприемников даны на рис. 36,в.

**Решение.** 1. Согласно ПУЭ-76, здания насосных с сырой нефтью относятся к зонам класса В-1а. Следовательно, по молниезащитным устройствам здание должно быть II категории (п. 2 табл. 1 [2]).

2. Тип зоны защиты молниеотвода определяется в зависимости от значения  $N$ . По формуле (10)  $N = (6+6 \cdot 6)(24+6 \cdot 6)6 \cdot 10^{-6} = 0,015$ .

При  $N = 0,015 < 1$  зона защиты молниеотводов должна быть типа Б.

3. Необходимая высота молниеотвода определяется подбором при условии, что  $S/2 = 3 \text{ м} \leq R_{cx}$ . Примем  $h = 10 \text{ м}$ .

По формуле (30):

$$R_{cx} = R_0 [(h_c - h_x) / h_c] = 15[(7,94 - 6) / 7,94] = 3,66 \text{ м;}$$

$$R_0 = 1,5h = 1,5 \cdot 10 = 15 \text{ м [см формулу (24)];}$$

$$h_x = 6 \text{ м (см. рис. 36, в); } h_c = h_0 - 0,14(L - 1,5h) = 9,2 - 0,14(24 - 1,5 \cdot 10) = 7,94 \text{ м}$$

$$\text{[см. формулу (32)]; } h_0 = 0,92h = 0,92 \cdot 10 = 9,2 \text{ м}$$

[см. формулу (23)].

Так как  $R_{cx} = 3,66 > S/2 = 3$  (на защитном уровне  $h_x = 6 \text{ м}$ ), то высота молниеотвода ( $h_x = 10 \text{ м}$ ) подобрана правильно.

**Пример 4.** Сделать вывод о соответствии [2] молниезащиты (предусмотренной двойным стержневым молниеотводом) здания насосной станции сырой нефти. Размеры здания и грозовая деятельность те же, что и в примере 3. Двойной стержневой молниеотвод ( $h = 15 \text{ м}$ ) принят отдельно стоящим, расположен по оси здания на расстоянии 5 м от торцевых частей здания (рис. 36,з).

**Решение.** 1. По пп. 1 и 2 примера 3 категория II, тип зоны защиты молниеотвода Б.

2. Требуемая высота молниеотвода определяется с учетом следующего условия:  $S/2 = 3 \text{ м} \leq R_{cx}$ .

По формуле (17):

$$R_{cx} = 22,5[(12,19 - 6) / 12,19] = 11,42 \text{ м;}$$

$$R_0 = 1,5h = 1,5 \cdot 15 = 22,5 \text{ м [(см. формулу (24))]$$

$$h_c = 13,8 - 0,14(34 - 1,5 \cdot 15) = 12,19 \text{ м [см. формулу (32)];}$$

$$h_0 = 0,92 \cdot 15 = 13,8 \text{ м [см. формулу (23)].}$$

Так как  $R_{cx} = 11,42 > S/2 = 3 \text{ м}$  (на  $h_x = 6 \text{ м}$ ), то высота молниеотвода ( $h = 15 \text{ м}$ ) соответствует требованиям [2].

**Пример 5.** Сделать вывод о соответствии требованиям [2] молниезащиты (предусмотренной отдельно стоящим тросовым молниеотводом), здания газокomppressorной станции водорода (рис. 36,д). Размеры здания  $30 \times 6 \text{ м}$ , высота 8 м. Размеры тросового молниеотвода приведены на рис. 36,д. Грозовая деятельность более 80 ч.

**Решение.** 1. По табл. 1 п. 2 [2], здание газокomppressorной станции водорода относится ко II категории.

2. Тип зоны защиты молниеотвода определяется в зависимости от значения  $N$ .

По формуле (10)  $N = (6+6 \cdot 8)(30+6 \cdot 8)12 \cdot 10^{-6} = 0,05$ . При  $N = 0,05 < 1$  зона защиты молниеотвода должна быть типа Б.

3. Требуемая высота молниеотвода (при известных по условию примера  $h_x = 8 \text{ м}$  и  $R_x = S/2 = 3 \text{ м}$ ) определяется по формуле (41):

$$h = (R_x + 1,85h_x) / 1,7 = (3 + 1,85 \cdot 8) / 1,7 = 10,47 \text{ м.}$$

4. Сравнивая требуемую высоту молниеотвода ( $h = 10,47 \text{ м}$ ) с фактической ( $h = 15 \text{ м}$ ), приходим к выводу, что молниеотвод соответствует даже с учетом возможной стрелы провеса, равной 2 м (см. п. 4.6 [2]).

**Пример 6.** Для защиты газокomppressorной станции водорода запроектировать тросовый молниеотвод, опоры которого расположены в торцевых частях здания по оси его симметрии. Размеры здания и грозовая деятельность те же, что и в примере 5. Дополнительно следует учесть наличие на крыше здания газоотводных труб (рис. 36,е).

**Решение.** 1. Требуемая высота молниеотвода (без учета зоны взрывоопасности около газоотводных труб) может быть определена по формуле (41):

$$h = (3 + 1,85 \cdot 8) / 1,7 = 10,47 \text{ м.}$$

2. Необходимая высота молниеотвода с учетом зоны взрывоопасности около газоотводных труб определяется следующим образом: по п. 2.6 [2] размеры взрывоопасной зоны принимаются по высоте 2,5 м, по горизонтали 5 м от места выброса. Следовательно, высота защитного уровня принимается равной:  $h_x = 8 + 2,5 = 10,5$  м; радиус зоны защиты на этой высоте  $R_x = 5$  м; по формуле (41)

$$h = (5 + 1,85 \cdot 10,5) / 1,7 = 14,36 \text{ м.}$$

3. С учетом стрелы провеса (п. 4.6 [2]) высоту стоек (при расположении их на торцевых стенах) для подвески троса следует принять такой, чтобы удовлетворялось равенство  $h = h_{оп} - 2$  м, откуда  $h_{оп} = h + 2 = 14,36 + 2 = 16,36$  м.

## Глава II

### ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Некоторые производственные процессы сопровождаются статической электризацией, т. е. возникновением и разделением положительных и отрицательных зарядов. Иногда они быстро стекают в землю, рассеиваются или нейтрализуются. В других случаях они накапливаются и создают поле с высокой электрической напряженностью, обуславливающее электрические разряды (пробои воздуха или среды). В производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, газов, искровые разряды статического электричества могут вызвать взрыв и пожар. В ряде производств статическое электричество вызывает брак продукции, препятствует увеличению скорости работы машин и аппаратов и, следовательно, повышению производительности труда. При определенных условиях разряды статического электричества причиняют травмы обслуживающему персоналу.

#### 1. Возникновение зарядов

Возникновение статического электричества — очень сложный процесс, зависящий от множества факторов, и в настоящее время нет еще единой теории, объясняющей это явление. Существует лишь ряд гипотез, но общим элементом его является возникновение двойного электрического слоя, который и служит непосредственным источником статических зарядов. 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. 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 поверхностных загрязнений, различной температуры. Находясь 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.

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 различна 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 поверхностями может достигать десятков и сотен 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:

В кинофотоплочной промышленности	15 кВ и выше
На предприятиях резиновой промышленности и искусственной кожи	10—15 кВ
В производствах, связанных с размолотом, тонким добавлением и т. д.	10—15 кВ
При разбрызгивании красок	10 кВ
При трении целлулоида	40 кВ
При движении резиновой ленты транспортера (со скоростью 4 м/с)	45 кВ
При фильтрации смеси бензина с асфальтом через шелк	335 кВ

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 пропорциональным скорости течения бензина. Статическое электричество может накапливаться и на людях (обувь с не проводящими электричество подошвами, одежда и белье из шерсти, шелка и искусственного волокна) при движении по токонепроводящему полу, и 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. Таким образом, при статической электризации могут наблюдаться процессы, которые пока еще изучены недостаточно, поэтому для борьбы с ней в конкретных условиях требуются предварительные экспериментальные исследования и проверка предложенных защитных мер.

## 2. Воспламеняющая способность искры статического электричества и его физиологическое воздействие

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

$$U = Q/C. \quad (59)$$

Напряжение получается в В, если  $C$  берут в Ф, а заряд в Кл. Энергия искры, способной возникнуть под действием этого напряжения (или напряжения между пластиной и каким-либо заземленным предметом), может быть оценена по запасенной конденсатором энергии  $W = 0,5CU^2$  (60), поэтому воспламеняющую способность искровых разрядов характеризуют в основном их энергией. Однако формула (60) не может быть использована для расчета энергии разряда между заряженными поверхностями, так как только часть накопленного заряда на диэлектрике может быть перенесена в разряде.

Энергия  $dW_u$ , рассеиваемая при переносе бесконечно малого заряда  $dq$  с заряженной поверхности, при разряде равна

$$dW_u = Udq, \quad (61)$$

а полная энергия определяется

$$W_u = U \int_0^q dq. \quad (62)$$

Определение этой 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.

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

$$W_u > W_{\text{мин-воспл}}, \quad (63)$$

где  $W_{\text{мин-воспл}}$  — минимальная энергия, необходимая для воспламенения взрывоопасной смеси при ее оптимальной концентрации (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  $W_{\text{мин-воспл}}$  составляет 0,009—2 мДж, а для пылевоздушных 10—250 мДж. Примеры минимальных энергий приводятся в [6] и в табл. 2 и 3 приложения. 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  $4 \cdot 10^2$ — $5 \cdot 10^2$  кВ/м для резко неоднородного,  $1,5 \cdot 10^2$ — $20 \cdot 10^2$  кВ/м для слабонеоднородного и до  $30 \cdot 10^2$  кВ/м для однородного электрического поля. Следует иметь в виду и то, что степень электризации предмета (машины, аппарата) или вещества является безопасной, если измеренная поверхностная плотность заряда  $\sigma$ , напряженность поля  $E$  или потенциал  $V$  на любом участке этой поверхности не превосходят допустимых значений в данной среде. При этом допустимыми считаются такие значения  $\sigma$ ,  $E$  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 паров горючих жидкостей с воздухом).

Таким образом, статическое электричество может вызвать воспламенение взрывоопасной смеси при совокупности следующих условий: наличие источника статических электрических зарядов; накопление значительных зарядов на контактирующих поверхностях; достаточная разность потенциалов для электрического пробоя среды; наличие достаточной запасенной электрической энергии; возможность возникновения электрических разрядов. Отсутствие любого из них исключает опасность статического электричества.

Условие безопасности от статического электричества может быть выражено неравенством:

$$W_u < 0,4W_{\text{мин-воспл}}. \quad (64)$$

В пожаро- и взрывоопасных производствах реальную опасность представляет «контактная» электризация людей, работающих с движущимися диэлектрическими материалами (при прорезинивании тканей, обрезинивании кордов на каландрах, обработке синтетических тканей и нитей, полимерных пленок). На человеке накапливается статическое электричество, которое при соприкосновении его 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. Сила тока при этом незначительна, поэтому такие разряды непосредственную опасность для человека не представляют.

Но известны случаи с тяжелым исходом, когда искра, проскакивающая между телом человека и заряженным объектом, вызвала испуг, сопровождавшийся нескоординированными движениями, что приводило к соприкосновению с неогороженными вращающимися частями машин, падению с высоты. Длительное воздействие статического электричества является причиной ряда заболеваний. Расчетная зависимость, показывающая, при каком значении потенциала будет существовать опасность физиологического воздействия на человека и возникнет опасность воспламенения горючих смесей, представлена на рис. 37. Границы зон видов физиологического воз-



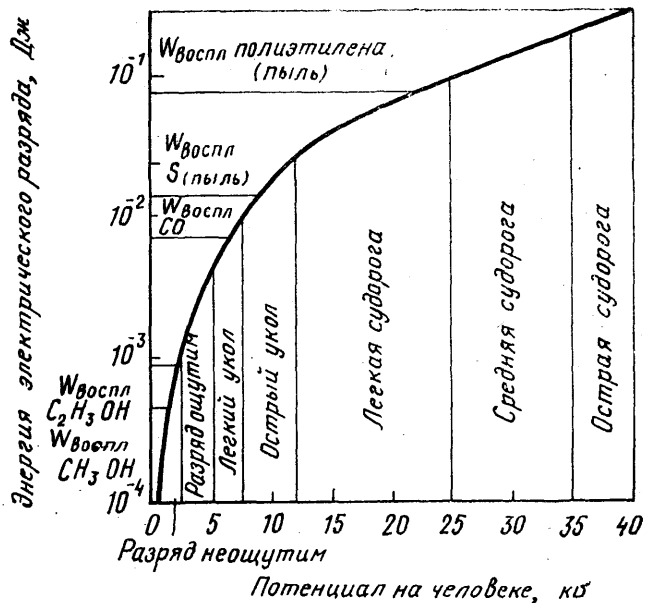


Рис. 37. Зависимость энергии электрического разряда с тела человека и физиологического воздействия от потенциала зарядов статического электричества

действия условны, так как оно зависит от особенностей человеческого организма и специфики производства, поэтому допустимым потенциалом на человеке по физиологическому воздействию считают  $U_{\text{доп}} = 4-6$  кВ. Он же по пожаро- и взрывоопасности для некоторых сред определяется непосредственно по кривой (рис. 37).

### 3. Приборы для измерения параметров статического электричества

Электрические измерения необходимы для изучения причин и условий электризации и постоянного контроля разности потенциалов  $U$  между заряженным телом и землей или заземленными предметами, поверхностной плотности электрических зарядов  $\sigma$  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 двух электродов, кулоновское взаимодействие которых фиксируется различными методами.

Принцип действия квадрантных электрометров положен в основу электростатических вольтметров. Электростатический заряд воздействует на подвижный секторный электрод, который под действием 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. 8. Время успокоения

Таблица 8. Характеристики электростатических вольтметров

Тип прибора	Конечное значение рабочей части шкалы, кВ	Входная емкость, пФ	Тип прибора	Конечное значение рабочей части шкалы, кВ	Входная емкость, пФ
1	2	3	1	2	3
C50/1	0,03	10	C50/6	1,0	4
C50/2	0,075	7	C50/7	1,5	4
C50/3	0,15	7	C50/8	3,0	4
C50/4	0,3	7	C50/9	0,45	4
C50/5	0,6	4	C196	7,5—15—30	12

у всех 6 с, класс точности I. Электронные электрометры позволяют измерять электростатические величины без непосредственного контакта с заряженным телом.

В статических индукционных электрометрах с преобразованием сходного сигнала удаленный от заряженного диэлектрика конец

Таблица 9. Характеристика приборов по измерению параметров статического электричества

Название прибора	Характеристика прибора и измерения
Индикатор статических зарядов ИСПИ-4	Потенциал заряженной поверхности до 50 кВ. Питание батарейное. Взрывозащищенный
То же, МИЭП-1 и МИЭП-2	Потенциал до 40 кВ. Без питания. Взрывозащищенные
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Напряжение 0,03—3 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный
Электрометр электронный ПК-2-3А	Потенциал поверхности и тела человека до 50 кВ; поверхностный заряд 0,2—20 мк·Кл/м <sup>2</sup>
То же, П2-1	Напряженность электрического поля до 50 кВ/м. Питание 3—127—220 В
То же, П2-2	Напряжение до 2,5 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный
То же, ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до 2600 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
То же, ИНЭП-1	Напряженность электрического поля 4—2500 кВ/м. Питание 127/220 В
То же, ПЗСЭ-73	Напряжение до 15 кВ. Питание 220 В. Сжатый воздух 4 атм

проводника-датчика соединен с сеткой электрометрической лампы или полевого транзистора, поэтому индуцированный на нем заряд определяет ток анода лампы (ток транзистора). Приборы С53 класса точности 0,5 выпускаются той же модификации, что и приборы С50. По такому принципу работает прибор ПК2-ЗА, созданный Всесоюзным научно-исследовательским институтом охраны труда. Он проградуирован в единицах поверхностного потенциала и плотности заряда. Диапазон 0,1—50 кВ (0,2—20 мкКл/м<sup>2</sup>) имеет три предела: 0,1—1 кВ; 0,5—10 кВ; 1,0—50 кВ. Переход с одного предела на другой производится сменными насадками с дисковыми диафрагмами цилиндрической части прибора, где находится электрометрическая лампа в герметичном стальном экране. Прибор не может применяться во взрывоопасных зонах.

Характеристики некоторых приборов приведены в табл. 9.

По условиям пожаро- и взрывобезопасности приборы для электростатических измерений во взрывоопасных зонах должны быть соответствующего уровня и вида взрывозащиты, а их датчики (в частности, у переносных приборов) должны отвечать 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 разрядов минимум в 2,5 раза меньше энергии воспламенения смеси).

Датчик прибора ИСПИ-4 с отклонением электронного потока в вакууме покрыт толстым слоем диэлектрика (фторопласт), что обеспечивает электростатическую искробезопасность. В приборе СМ-2/С-59 взрывозащита достигнута путем заключения электростатического вольтметра С-59 во взрывонепроницаемый корпус, а специальное покрытие датчика (фторопласт) обеспечивает его электростатическую искробезопасность. Взрывобезопасность процесса измерения достигается и в том случае, если во взрывоопасной зоне применяется искробезопасный датчик, а сам прибор (статический вольтметр любого типа) устанавливается в невзрывоопасной зоне.

#### 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 В-I, В-Ia, В-Iб, В-II, В-IIa, II-I и II-II, где применяются и вырабатываются вещества с удельным объемным электрическим сопротивлением более  $10^9$  Ом·м. В остальных случаях защита осуществляется лишь там, где 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 частоты 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.

Прибегают и к дополнительным способам, дающим в конкретных случаях нужный эффект при операциях с жидкими, газообразными и сыпучими материалами и веществами: предотвращение взрывоопасных концентраций, ограничение скорости движения жидкости, замена ЛВЖ на негорючие растворители. Практически способ устранения опасности от статического электричества выбирается с учетом эффективности и экономической целесообразности.

**Заземление.** Все проводящие части оборудования и электропроводные неметаллические предметы подлежат обязательному заземлению, независимо от того, применяются ли другие способы защиты от статического электричества. 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 из непроводящих веществ (смолы, пленки), то заземление становится неэффективным и небезопасным. 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 внутренней и внешней 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  $\tau$  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. Из этих соображений рассчитаны максимально допустимые значения заземляющих сопротивлений, приведенные в табл. 10 [7].

Таблица 10. Максимально допустимые заземляющие сопротивления

Среда	Сопротивление $r$ , Ом, при емкости предмета $C$ , Ф	
	10—11	10—10
Взрывоопасная ( $\tau = 10^{-3}$ с)	$10^8$	$10^7$
Невзрывоопасная ( $\tau = 10^{-1}$ с)	$10^{10}$	$10^9$

Трубопроводы наружных установок (на эстакадах или в каналах), оборудование и трубопроводы в цехах должны представлять 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 и установка специальных параллельных перемычек не требуется.

Каждая система аппаратов и трубопроводов в пределах цеха должна быть заземлена минимум в двух местах. Все резервуары и емкости более 50 м<sup>3</sup> и диаметром более 2,5 м заземляют не менее чем в двух противоположных точках. На поверхности горючих жидкостей в них не должно быть плавающих предметов. Наливные стояки эстакад для заполнения железнодорожных цистерн и рельсы железнодорожных путей в пределах сливно-наливного фронта должны быть электрически соединены между собой и заземлены. Автоцистерны, наливные суда, самолеты, находящиеся под наливом или сливом горючих жидкостей и сжиженных газов, также заземляются. Контактные устройства для присоединения заземляющих проводников должны быть установлены за пределами взрывоопасной зоны, при этом проводники вначале присоединяются к корпусу объекта заземления, а затем к заземляющему устройству.

Учитывая малые разрядные токи при статической электризации, допускается сопротивление заземляющего устройства до 100 Ом. Допустимое сопротивление заземления может составлять 10<sup>7</sup> Ом. При таком сопротивлении удаляются заряды, накапливающиеся со скоростью 100 мк-Кл/с. Обычно же скорость накопления зарядов (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), сопротивление заземлителя растеканию тока промышленной частоты должно быть не более 10 Ом (как это принято для сооружений I и II категории по устройству молниезащиты).

Если для защиты от статической электризации проводящего неметаллического оборудования с проводящей футеровкой применяется заземление, то к нему предъявляются те же требования, что и для 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 далеко не всегда решает проблему защиты от статического электричества. Например, заземление резервуара, заполняемого наэлектризованной жидкостью, лишь исключает накопление заряда, натекающего из объема жидкости, на его стенках, не ускоряя процесс рассеивания его в жидкости. Но заземление резервуара все же играет важную роль, исключая возможность появления потенциала на стенках и развитие разрядов с него на землю.

Уменьшение удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления. Снижением объемного и поверхностного сопротивлений обеспечивается соответствующая электропроводность и способность диэлектрика отводить заряды статического электричества. Устранение опасности от 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). Согласно наблюдениям, большинство пожаров от искр статического электричества происходит обычно зимой, когда относительная влажность воздуха низка. Если она выше 65—70%, то, согласно исследованиям и заводской практике, число вспышек и загораний незначительно.

Ускорение стекания электростатических зарядов с диэлектриков при высокой влажности воздуха связывают с тем, что на поверх-

ности гидрофильных диэлектриков адсорбируется тонкая пленка влаги, обычно с большим количеством ионов из загрязнений, за счет которых обеспечивается поверхностная электропроводность электролитического характера, поэтому поверхностное сопротивление диэлектрика уменьшается. Однако если материал находится при более высокой температуре, чем та, при которой пленка может удержаться 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) если скорость ее перемещения больше, чем скорость образования поверхностной пленки, поэтому способ увлажнения воздуха не всегда эффективен.

На практике увеличение влажности воздуха достигается распылением водяного пара (воды), циркуляцией влажного воздуха, иногда свободным испарением с большой поверхности воды. В некоторых случаях желаемый эффект достигается местным увлажнением паром или охлаждением электризуемой поверхности на 10 °С ниже температуры окружающей среды. Зависимость удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  от относительной влажности воздуха  $B$  для некоторых материалов приводится в табл. 11 [6].

Таблица 11. Величина удельного поверхностного сопротивления в зависимости от влажности воздуха

Материал	Твердость по шкале Мооса	Удельное поверхностное сопротивление $\rho_s$ , Ом	
		$B = 0\%$	$B = 98\%$
Политетрафторэтилен	1—2	$5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{17}$
Полистирол	2	$5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{16}$
Пресс-порошок на основе фенолформальдегидной смолы К-221-34	2—3	$7 \cdot 10^{16}$	$7 \cdot 10^{14}$
Аминопласт	3	$6 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$
Ультрафарфор	4—5	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{13}$
Плавленный кварц	7	$1 \cdot 10^{17}$	$6,5 \cdot 10^{10}$

Как следует из таблицы, влияние влажности на удельное сопротивление тем выше, чем больше твердость материала.

Снижение удельного поверхностного сопротивления полимерных материалов может быть достигнуто химической обработкой поверхности кислотами (серной или хлорсульфоновой). В результате этого поверхность полимера (полистирол, полиэтиленовые и полиэфирные пленки) окисляется (сульфируется), при этом  $\rho_s$  снижается до 10<sup>6</sup> 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. Следует заметить, что методы химической обработки эффективны, но требуют точного соблюдения технологических условий. Иногда необходимый эффект достигается нанесением на диэлектрик поверхностной хорошо про-

водящей пленки. Например, металлические тонкие пленки получают распылением, разбрызгиванием, испарением в вакууме или наклеиванием металлической фольги. Пленки на углеродной основе получают распылением порошка (частицы меньше 1 мкм) или коллоидного углерода в жидкой среде.

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 по трубе слой находящийся на поверхности жидкости зарядов уносится ее потоком, а заряды противоположного знака остаются на трубе, и если она заземлена, стекают в землю. Изолированный металлический трубопровод (или из диэлектрических материалов) 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 (коррозия), диэлектрических свойств, вязкости и плотности жидкости, скорости ее движения, диаметра и длины трубопровода. Присутствие 0,001% механических примесей превращает инертное углеводородное топливо в электризуемое до опасных пределов.

Один из наиболее эффективных методов устранения электризации нефтепродуктов — введение специальных антистатических веществ (присадок). Добавление их в сотых и тысячных 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 «Сигбол» и другие вещества. 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 растворимые в них антистатические присадки, например соли металлов переменной валентности высших карбоновых и синтетических кислот. Положительные результаты достигаются при использовании антистатических веществ на предприятиях по переработке синтетических волокон. Установлено, что наиболее важным свойством этих веществ является их способность увеличивать ионную проводимость и тем самым снижать электрическое сопротивление волокнистых материалов. Обработку их антистатическими веществами производят до или непосредственно в процессе технологии.

Есть несколько главных групп химических препаратов, применяемых для приготовления антистатических материалов, которые

влияют на электрические свойства волокон: углеводороды парафинового ряда, жиры и масла, гигроскопические и поверхностно-активные вещества (ПАВ). Углеводороды парафинового ряда, жиры и масла влияют на электрический контакт волокна с 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. ПАВ при добавлении в воду снижают ее поверхностное натяжение. В результате улучшаются смачивающие, 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 этими добавками производится как при поверхностном нанесении, так и при внутреннем введении в расплавленную массу. В качестве антистатических добавок применяют, например, некоторые образцы ионогенных ПАВ. Удельное поверхностное сопротивление полимеров при этом снижается на 5—8 порядков, но срок эффективного действия незначителен (до одного месяца). Внутреннее введение 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 (полиэтилена низкой и высокой плотности) привело к созданию полупроводящих полимерных композиций путем введения наполнителей (ацетиленовая сажа, алюминиевая пудра, графит, цинковая пыль). Лучшим наполнителем — ацетиленовая сажа, хорошо распределяемая в полимере и снижающая сопротивление на 10—11 порядков даже при 20% веса полимера. Оптимальная весовая 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, что связано с опасностью статической электризации. Чтобы получить электропроводные или антистатические резины, в них вводят электропроводящие наполнители — порошкообразный графит, различные сажи (например, липецкую, ацетиленовую сажу), мелкодисперсные металлы. В таких резинах образуется текопроводящая 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 у антистатической резины достигает  $10^6$  Ом·м, а у проводящей — до  $5 \cdot 10^2$  Ом·м.

Антистатическими резинами марок 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 использо-

ваннем бутадиен-нитрильных 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 наливке ЛВЖ в авто- и железнодорожные цистерны и другие емкости, исключают применение специальных устройств для заземления запра-вочных воронок и наконечников.

До последнего времени электропроводящие слои создавали вакуумным напылением или катодным нанесением металла на поверхность диэлектрика. Но этот способ не всегда приемлем. Эффективнее оказались специальные лакокрасочные покрытия, основанные на образовании в полимерном связующем цепочных структур наполнителя. Образованные контактирующими частицами проводящего наполнителя, они обеспечивают покрытию 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% — 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 марок ХС-928 и АК-562. Кистью или пульверизатором их наносят на поверхность в два слоя, и они дают пленку черного цвета, устойчивую к температуре, давлению, вакууму, агрессивным средам и радиационному облучению. Электропроводными эмалью окрашивают заземляющие 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.

Если во взрывоопасных производствах работают ременные передатки и ленточные транспортеры, то заряды статического электричества и потенциал ремней и лент достигают нескольких десятков киловольт. Эффективное снижение его 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 дает увеличение влажности воздуха и снижение линейной скорости ремня и ленты.

**Ионизация воздуха.** Сущность этого способа заключается в нейтрализации или компенсации поверхностных электрических зарядов ионами разного знака, которые создают специальные приборы, называемые нейтрализаторами, и осуществляется в настоящее время электрическим полем с высокой напряженностью  $E$  и радиоактивным излучением. Принцип работы нейтрализаторов сводится к тому, 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 (рис. 38). Они бывают с острьями и проволочные. В первом из них (рис. 38,а) на деревянном или металлическом стержне

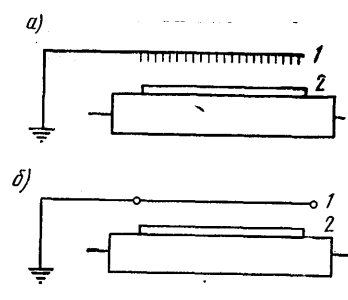


Рис. 38. Схема индукционного нейтрализатора  
а — с острьями; б — проволочно-го; 1 — острия и проволока; 2 — заряженная поверхность

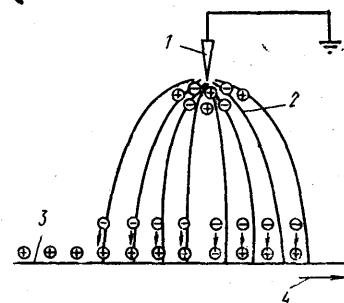


Рис. 39. Схема нейтрализации зарядов индукционным нейтрализатором  
1 — разрядный электрод; 2 — зона ударной ионизации; 3 — наэлектризованный диэлектрик; 4 — направление движения диэлектрика

укреплены заземленные острия, тонкие проволочки или фольга. Во втором (рис. 38,б) применена тонкая стальная проволочка, натянутая поперек движущегося заряженного материала. 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. 39). Для увеличения эффективности его действия следует стремиться к сокращению расстояния между кончиками игл и нейтрализуемой поверхностью до 5—20 мм. Нейтрализаторы монтируются непосредственно перед мостом, где заряды создают технологические помехи, или вблизи от места генерации. 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 достигнет нескольких киловольт.

**Высоковольтные нейтрализаторы** включают три типа: работающие на переменном токе, постоянном и токе высокой частоты. Они состоят из трансформатора с высоким выходным напряжением и игольчатого разрядника (рис. 40). В нейтрализатор на постоянном токе входит и высоковольтный выпрямитель. Принцип действия всех трех типов, 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. Общее достоинство их — достаточное ионизирующее действие и при низких потенциалах тела. Особенно полезны нейтрализаторы там, где не соблюдаются температурно-влажностные условия и относительная влажность воздуха может быть ниже 50%. Недостатки высоковольтных нейтрализаторов состоят в наличии источника тока и большой энергии возникающих искр, способных воспламенить любые взрывоопасные смеси, поэтому для взрыво-

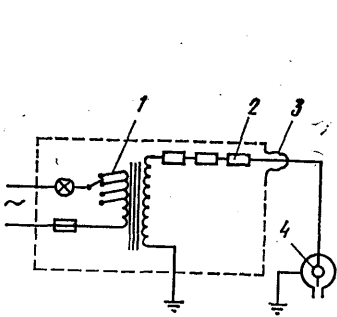


Рис. 40 Высоковольтный нейтрализатор переменного напряжения

1 — трансформатор; 2 — защитное сопротивление; 3 — проходной изолятор; 4 — игольчатый разрядник

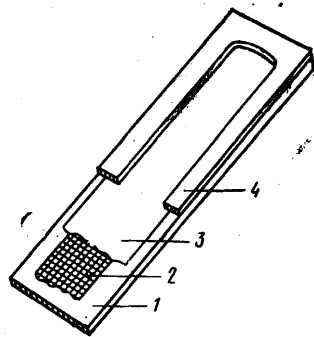


Рис. 41. Радиоактивный нейтрализатор в виде полосы

1 — основание; 2 — радиоактивная фольга; 3 — защитная алюминиевая фольга; 4 — пластина, удерживающая фольгу

опасных зон они изготавливаются только во взрывозащищенном исполнении.

Радиоактивные нейтрализаторы очень просты по устройству, не требуют источника питания, достаточно эффективны и безопасны при использовании в пожаро- и взрывоопасных средах, широко применяются в химической, резинотехнической, текстильной, бумажной, полиграфической и других отраслях промышленности. При их использовании необходимо предусматривать надежную защиту людей, оборудования и выпускаемой продукции от радиоактивного излучения. Чаще всего они имеют вид длинных плоских пластинок (рис. 41) или маленьких дисков. Одна сторона их содержит вещество, создающее радиоактивное излучение, ионизирующее воздух. Чтобы не загрязнить воздух, продукцию и оборудование, радиоактивное вещество покрывают тонким защитным слоем из специальной эмали или фольги. Для защиты от механических повреждений

Таблица 12. Ионизационная способность частиц радиоактивного излучения

Излучение	Число пар ионов, создаваемых в 1 мм <sup>3</sup> воздуха	Проникающая способность частиц в воздухе, м
α-частицы или ядра гелия (радий-226, полоний-208 и -210, плутоний-238, -239 и -240)	6000	0,1
β-частицы или электроны (таллий-204, стронций-90, сера-35, протий-147, криптон-85 и др.)	6 0,1	10 600
γ-лучи		

Таблица 13. Характеристика радиоактивных нейтрализаторов

Тип нейтрализатора	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	$1,2 \cdot 10^{-7}$
НИР-1	Радиоактивно-индукционный	140	$5 \cdot 10^{-5}$
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	$(0,6-0,9)10^{-7}$
НР-8-НР-14	То же	1000	$(0,3-0,6)10^{-7}$
НСЭ-140АТ-1	»	140	$0,6 \cdot 10^{-7}$
НСЭ-3500АТ-1	»	350	$0,6 \cdot 10^{-7}$
НСЭ-200А	»	200	$0,5 \cdot 10^{-7}$
НСЭ-1000Б	α-излучение, протий-147	1000	$(0,2-0,4)10^{-7}$
Тритиевые	β-излучение, тритий	—	$(0,5-1,2)10^{-7}$

нейтрализатор помещают в металлический кожух, который создает нужное направление ионизированного воздуха.

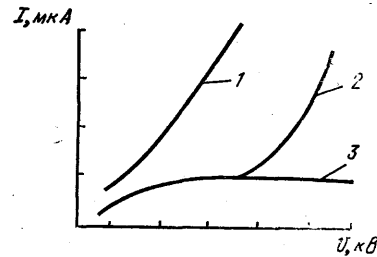
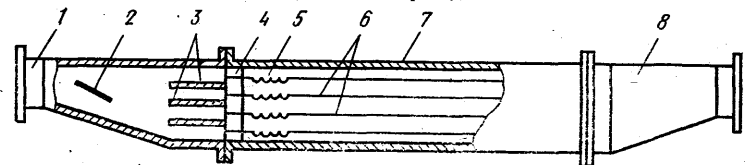


Рис. 42. Рабочие характеристики нейтрализаторов различных типов  
1 — высоковольтный; 2 — индукционный; 3 — радиоактивный

Рис. 43. 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 — входной конический переход



Радиоактивные вещества выбирают с учетом типа энергии частиц излучения, длины пробега, действия на людей и т. д. В табл. 12 приведены данные о проникающей и ионизирующей способности всех трех видов излучений. Наиболее эффективны и безопасны радиоактивные вещества с  $\alpha$ -распадом. 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  $\beta$ -излучатели. Среди  $\beta$ -излучателей широко распространены тритиевые источники. Подножки у них изготавливают из молибдена, нержавеющей стали или меди; на подножки наносят слой титана, насыщаемый тритием. Радиоактивные вещества с  $\gamma$ -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. 13. Основным недостатком является малый ионизационный ток по сравнению с другими типами нейтрализаторов.

Могут использоваться и комбинированные нейтрализаторы, например сочетание высоковольтного и радиоактивного или радиоактивного и индукционного. Такие комбинации позволяют улучшить их рабочие характеристики и увеличить эффективность. Они (типа НРИ) также выпускаются промышленностью (табл. 13). Эффективность различных типов нейтрализаторов сравнивают по рабочим характеристикам (рис. 42), выражающим зависимость разряжающего ионизационного тока от величины потенциала заряженного тела.

**Дополнительные способы уменьшения опасности от статической электризации.** Рассмотренные способы уменьшения опасности статической электризации могут оказаться иногда малоэффективными или неприемлемыми во взрывоопасных производствах, поэтому необходимо создать условия, исключающие 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, автоматическое включение аварийной вентиляции.

Иногда удовлетворительные результаты дает подбор контактных пар, изменение отдельных операций или замена горючих растворителей на негорючие. Опасность статической электризации легковоспламеняющихся и горючих жидкостей может быть значительно снижена или даже устранена уменьшением их скорости  $v$ . 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 трубах с шероховатой поверхностью.

Рекомендуются следующие скорости  $v$  диэлектрических жидкостей: при удельном электрическом сопротивлении  $\rho \leq 10^5$  Ом·м принимают  $v \leq 10$  м/с и при  $\rho > 10^5$  Ом·м  $v \leq 5$  м/с. Для жидкостей с  $\rho > 10^9$  Ом·м скорость транспортировки и истечения устанавливается отдельно для каждой жидкости. Безопасной для них является скорость движения или истечения 1,2 м/с. Для транспортировки жидкостей с  $\rho > 10^{11} \div 10^{12}$  Ом·м со скоростью  $v_t$  более 1,5 м/с

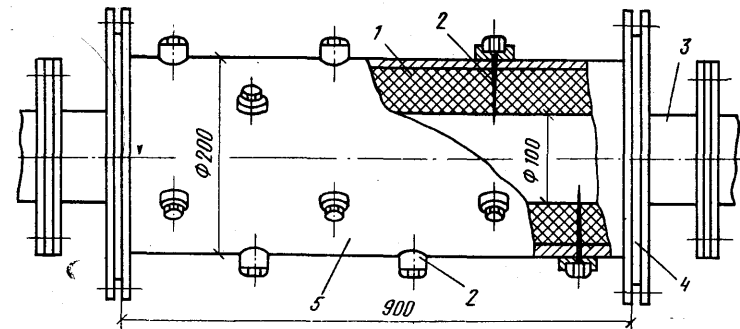


Рис. 44. Схема нейтрализатора с иглами

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

рекомендуется применять релаксационные емкости (горизонтальные участки трубы увеличенного диаметра) непосредственно у входа в приемный резервуар. Необходимый диаметр  $D_p$  этого участка в метрах определяется по формуле

$$D_p = 1,4 D_T \sqrt{v_t}, \quad (65)$$

а длина релаксационной емкости в метрах должна быть равна:

$$L \geq 2,2 \cdot 10^{-11} \epsilon \rho, \quad (66)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость жидкости.

При заполнении резервуара жидкостью с  $\rho > 10^5$  Ом·м до момента затопления загрузочной трубы рекомендуется подавать ее не более  $v_t = 1$  м/с, а затем со скоростью, соответствующей удельному сопротивлению, как было указано выше. При использовании релаксационных емкостей в современных крупнотоннажных производствах необходимо иногда увеличить скорость жидкости в трубопроводе до  $v_t = 4 \div 5$  м/с. Диаметр, рассчитанный по формуле (65), оказывается непомерно большим, поэтому для увеличения эффективности релаксационных емкостей рекомендуется применять релаксаторы со струнами (рис. 43) или с иглами (рис. 44), что позволяет использовать известный эффект увеличения электропроводности органических жидкостей в сильном электрическом поле.

В первом случае внутри релаксатора и вдоль его оси натягиваются заземленные струны, что более чем на 50% уменьшает ток электризации. Тот же эффект используется в аналогичном устройстве, называемом нейтрализатором (рис. 44), когда в поток жидкости вводят заземленные острия, чтобы отвести из него заряды. Нейтрализатор состоит из толстостенной изоляционной трубы (полиэтилен, фторопласт) с установленными на ней заземленными игльчатыми 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 нейтрализатора), и напряженность его у острия может значительно превысить 30 000 кВ/м, что приводит к резкому возрастанию удельной электропроводности.

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

$$v_T^2 D_T \leq 0,64, \quad (67)$$

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, что плотность заряда в резервуаре не превышает  $30 \text{ мк} \cdot \text{Кл} / \text{м}^3$  при электропроводности жидкости  $0,5 \text{ пк} \cdot \text{См}$ . Следует исключать возможность загрязнения диэлектрических жидкостей коллоидными частицами. При сливе жидкости нельзя перемешивать, распылять или разбрызгивать; при наливке ее в резервуары, цистерны и тару сливная труба должна опускаться почти до дна приемного сосуда, а свободно падающая струя вообще не допускается. Жидкости должны поступать в резервуар ниже уровня имеющегося в нем остатка.

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

Хороший эффект по условиям пожаро- и взрывобезопасности достигается путем замены растворителей из ЛВЖ на негорючие. При такой замене процессы промывки и химического обезжиривания поверхностей деталей и продукции становятся безопасными, ввиду

Таблица 14. Характеристика негорючих обезжиривателей

Компоненты	Содержание компонентов, г на 1 л воды						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
	для черных металлов		для меди и ее сплавов		для алюминия и его сплавов		
NaOH и KOH	80—100	100—150	20—30	—	—	—	3—5
Фосфорно-кислый натрий	30—40	—	70—80	30—35	80—100	20—25	2—4
Трехзамещенный натрий	—	30—50	—	20—25	—	20—25	40—50
Углекислый	—	3—5	5—8	5—10	10—15	—	20—30
Жидкое стекло	—	—	—	—	—	—	—

исключения взрывоопасной среды. Характеристика некоторых специальных негорючих составов, приводится в табл. 14.

### 5. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества

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 электротехнического оборудования. Заземляющие устройства при помощи приборов нужно контролировать не реже одного раза в год. Результаты ревизии и ремонтов 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».

Установка и эксплуатация радиоактивных нейтрализаторов Всесоюзного объединения «Изотоп» должны производиться в соответствии с инструкциями на них. Радиоактивные нейтрализаторы иных конструкций допускаются к применению при условии соответствия «Санитарным правилам по устройству и эксплуатации радиоизотопных нейтрализаторов статического электричества с эмалевыми источниками альфа- и бета-излучения И 879-71», «Основным санитарным правилам работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений № ОСП-72» и «Нормам радиационной безопасности НРБ-69».

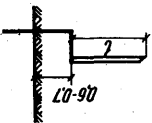
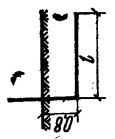
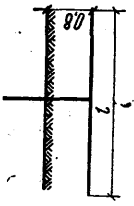
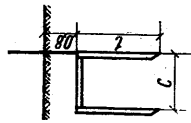
Профилактические осмотры и ремонты радиоактивных нейтрализаторов целесообразнее выполнять, прибегая к услугам специализированных организаций, например специализированного управления по монтажу и наладке радиационной техники. При расширении или реконструкции производства следует проверить наличие, достаточность и эффективность действующих устройств защиты от статического электричества и при необходимости внести соответствующие изменения.

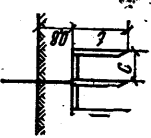
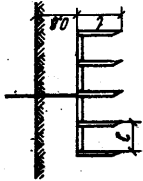
#### Список литературы

1. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. И. Физические и инженерные основы молниезащиты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.
2. Инструкция по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений. СН 305-77. М.: Стройиздат, 1978.
3. Черкасов В. Н. Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества. М.: Стройиздат, 1973.
4. Вейко П. М. Графический способ определения высот молниевыводов. — Промышленная энергетика, 1980, № 5.
5. Кузмин В. Г., Варлатавили В. Г. Исследование закономерностей рассеивания примесей от вертикального наземного резервуара. — В кн.: Труды ВНИИПО МВД СССР, вып. 2. М., 1977.
6. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1973.
7. Максимов Б. К., Обух А. А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. М.: Энергия, 1978.



Таблица 1. Типовые конструкции заземлителей и значения их сопротивления растеканию тока промышленной частоты

Тип	Материал	Значение сопротивления растеканию тока промышленной частоты при различных удельных сопротивлениях грунта, Ом·м					
		50	100	500	1000		
1	2	3	4	5	6		
Вертикальный стержневой 	Уголок 30×40×4 мм: l = 2 м l = 3 м	19 14	38 28	190 140	380 280		
	Сталь круглая d = 10÷20 мм: l = 2 м l = 3 м l = 5 м	24 17 14	48 34 28	240 170 140	480 340 280		
Горизонтальный полосовой 	Полоса 4×40 мм: l = 2 м l = 5 м l = 10 м	22 12 7	44 24 14	220 120 70	440 240 140		
Горизонтальный полосовой с вводом тока в середину 	Полоса 4×40 мм: l = 5 м l = 10 м l = 12 м l = 24 м l = 32 м l = 40 м	9,5 5,85 5,4 3,1 Не применяются То же	19 12 11 6,2 Не применяются То же	95 60 54 31 24 20	190 120 110 62 48 40		
Комбинированный двухстержневой 	Уголок 40×40×4 мм, полоса 4×40 мм: c = 3 м; l = 2,5 м c = 3 м; l = 3 м c = 6 м; l = 2,5 м c = 6 м; l = 3 м Круглая сталь d = 10 ÷ 20 мм, полоса 4×40 мм: c = 3 м; l = 2,5 м c = 3 м; l = 3 м c = 5 м; l = 2,5 м c = 5 м; l = 3 м c = 3 м; l = 5 м c = 5 м; l = 5 м	7 6 5,5 4,5 7,5 6,8 6 5,5 5,5 4	14 12 11 9,1 15 14 12 11 11 8	70 60 55 45 75 70 60 55 55 40	140 120 110 90 150 140 120 110 110 80		

1	2	3	4	5	6
Комбинированный трехстержневой	Уголок $40 \times 40 \times 4$ мм, полоса $4 \times 40$ мм: с = 3 м; l = 2,5 м с = 6 м; l = 2,5 м с = 7 м; l = 3 м Круглая сталь d = 10 ÷ 20 мм, полоса $4 \times 40$ мм: с = 2,5 м l = 2,5 м с = 2,5 м l = 3 м с = 5 м l = 2,5 м с = 5 м l = 3 м с = 6 м l = 5 м Уголок $40 \times 0 \times 4$ мм, полоса $4 \times 40$ мм: с = 5 м; l = 2 м с = 5 м; l = 3 м с = 7,5 м; l = 2 м с = 7,5 м; l = 3 м Круглая сталь d = = 10 ÷ 20 мм, полоса $4 \times 40$ мм: с = 5 м; l = 2 м с = 5 м; l = 3 м с = 7,5 м; l = 2 м с = 7,5 м; l = 3 м	4 3 2,7  4,8 4,4 3,5 3,3 2,7  2,2 1,9 1,8 1,6  2,4 2 2 1,7	8 6 5,4  9,7 8,9 7,1 6,6 5,4  4,4 3,8 3,7 3,2  4,8 4,1 4,1 3,5	40 30 27  50 45 36 33 27  22 19 18,5 16  24 20,5 20 17,5	80 60 55  100 90 70 65 55  44 3,8 3,7 3,2  48 41 40 35
Комбинированный пятистержневой					
					

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Молниезащита	4
1. Молния и ее характеристики	4
2. Пожаро- и взрывоопасность воздействия молнии	9
3. Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты	17
4. Молниеотводы	21
5. Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии	43
6. Защита зданий и сооружений от вторичных воздействий молнии	48
7. Защита зданий от заноса высокого потенциала	49
8. Эксплуатация молниезащитных устройств	49
9. Примеры расчета молниезащиты зданий и сооружений	50
Глава II. Защита взрывоопасных производств от разрядов статического электричества	58
1. Возникновение зарядов	58
2. Воспламеняющая способность искры статического электричества и его физиологическое воздействие	60
3. Приборы для измерения параметров статического электричества	62
4. Способы устранения опасности статического электричества	64
5. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества	77
Приложение	78
Список литературы	83