

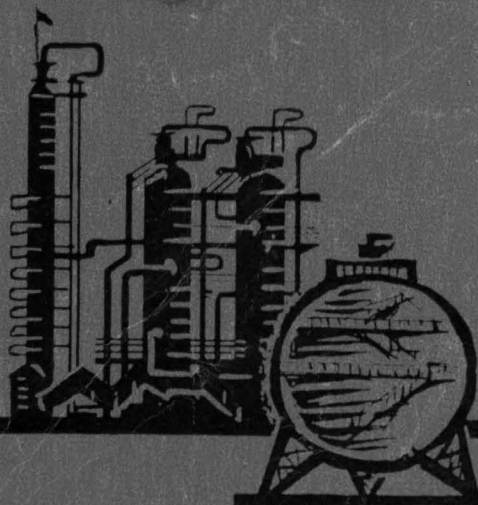
П1:31  
4-48

архив

**В.Н. ЧЕРКАСОВ**

# **З а щ и т а взрывоопасных сооружений**

**от молнии  
и статического  
электричества**



П.1:31  
4-48

В. Н. ЧЕРКАСОВ

З А Щ И Т А  
ВЗРЫВООПАСНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ  
О Т М О Л Н И И  
И СТАТИЧЕСКОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

579864

БИБЛИОТЕКА  
ФИПТ и Б  
Высшей школы  
МООН РСФСР

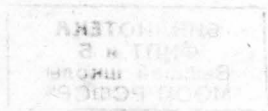


ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛИТЕРАТУРЫ  
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ  
МОСКВА 1965

В книге обобщены исследования, литературные и нормативные источники, опыт проектирования и эксплуатации молниезащиты взрывоопасных сооружений; рассматриваются методы устранения опасности искрений от статического электричества.

Книга предназначена для инженерно-технических работников пожарной охраны и лиц, работающих в области проектирования и эксплуатации молниезащитных устройств. Она может быть также полезна слушателям и курсантам пожарнотехнических учебных заведений.

218912



ОТДЕЛЕНИЕ  
ИЗДАТЕЛЬСТВА  
МОСКОВСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

## ВВЕДЕНИЕ

В Программе Коммунистической партии Советского Союза, принятой на XXII съезде, намечены основные направления создания материально-технической базы коммунизма. Одной из крупнейших задач является всемерное развитие химической промышленности и полное использование во всех отраслях народного хозяйства достижений современной химии. За 20 лет продукция химической промышленности возрастет примерно в 17 раз, а производство отдельных видов продукции, как, например, синтетических смол и пластических масс, будет увеличено примерно в 60 раз.

Растущие темпы развития химической и нефтегазовой промышленности, особые условия технологических процессов и применение горючих и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и газов создают на этих предприятиях повышенную пожаро- и взрывоопасность. Это требует дальнейшего совершенствования и разработки новых нормативных и проектно-эксплуатационных решений, исключающих возможность возникновения пожаров или взрывов на объектах нефтехимии от любых причин, в том числе и от поражения разрядами молнии.

Во многих районах Советского Союза в летнее время наблюдается интенсивная грозовая деятельность, в результате чего от разрядов молнии возникают многочисленные пожары. Только прямые убытки от единичных пожаров и взрывов, вызванные поражениями промышленных взрывоопасных сооружений молнией, составляют миллионы рублей.

Взрывоопасные здания и наружные взрывоопасные установки подвергаются поражениям молнии, как правило, из-за отсутствия молниезащитных устройств. Но имеются случаи поражения сооружений и при наличии



молниезащиты, что указывает на недостатки в нормировании, проектировании, монтаже и эксплуатации молниезащитных устройств.

Вместе с тем анализу причин поражения сооружений молнией в технической литературе уделяется мало внимания, а в имеющихся ведомственных нормативах некоторые вопросы молниезащиты обоснованы недостаточно или даны в общем виде. Так, например, не обоснованы экспериментальными исследованиями рекомендуемые зоны взрывоопасности при молниезащите взрывоопасных зданий и наружных установок с имеющимися на них устройствами для выброса в атмосферу горючих смесей паров и газов (дыхательные трубы и клапаны, свечи и вентиляционные устройства и т. д.). Отсутствуют также экспериментальные данные по исследованию величин энергии, рассеиваемой в искрах, и по нагреву плохих контактов, вызванных вторичными воздействиями токов молнии. Эти данные важны для оценки воспламеняющей способности искр и нагрева, а следовательно, для оценки пожаро- и взрывоопасности вторичных воздействий молнии и обоснования рекомендаций по борьбе с ними и т. д. В литературе недостаточно обобщается и опыт проектирования и эксплуатации молниезащитных устройств.

В данной книге на основе имеющихся исследований, литературных и нормативных источников, опыта проектирования и эксплуатации молниезащиты и некоторых исследований, проведенных автором, сделана попытка обобщить вопросы молниезащиты взрывоопасных сооружений. Кроме того, в книге рассматриваются методы устранения искрений от статического электричества, которое очень часто возникает в самых разнообразных технологических процессах и представляет большую опасность для взрывоопасных сооружений.

# **I. МОЛНИЯ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ**

## **1. МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ МОЛНИИ**

Молния — это электрический разряд в атмосфере между разноименно заряженными частями облаков или между облаком и землей. Длина канала молнии обычно достигает нескольких километров (в среднем 5 км), причем значительная часть его находится внутри грозового облака.

Предшествующий разряду молнии процесс разделения и накопления электрических зарядов в облаках связан с возникновением в них мощных восходящих воздушных потоков, с интенсивной конденсацией водяных паров и разбрызгиванием водяных капель. Образующаяся при разбрызгивании мельчайшая водяная пыль заряжена отрицательно, а тяжелые капли заряжены положительно. Ветер разносит отрицательно заряженную водяную пыль на значительные расстояния, образуя основной массив грозового облака. Положительно заряженные капли выпадают в виде дождя на землю или удерживаются во взвешенном состоянии, образуя в грозовом облаке местное скопление положительных зарядов. В результате этих процессов в различных частях грозового облака происходит сосредоточение значительных униполярных зарядов. В большинстве случаев нижняя часть грозового облака оказывается заряженной отрицательно, а само облако образует гигантский конденсатор, второй «обкладкой» которого является земля; на поверхности последней индуктируются положительные заряды. По мере концентрации зарядов увеличивается напряженность электрического поля вблизи облака и, когда она достигает критической величины (порядка 30 кВ/см), создаются все условия для развития молнии.

Разряд молнии между облаком и землей разделяется на две основные стадии: лидерную (начальную) и главный (обратный) разряд. Разряд обычно начинается с прорастания от облака к земле слабосветящегося канала — лидера (рис. 1), движущегося толчкообразно (ступеня-

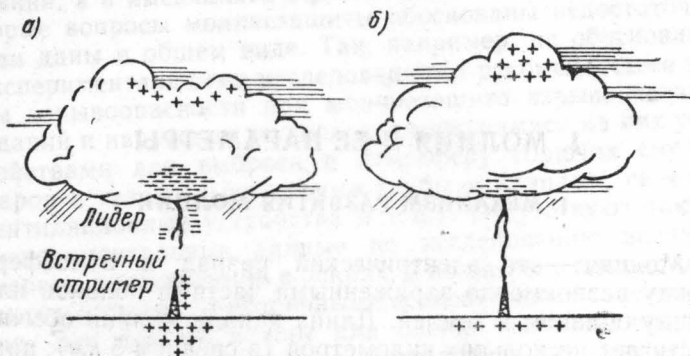


Рис. 1. Развитие разряда молнии

а — лидерная (начальная) стадия; б — главный (обратный) разряд

ми) со средней скоростью  $1,5 \cdot 10^7$  см/сек. Средняя длина ступени лидера составляет приблизительно 50 м. Пауза между отдельными толчками длится 30—90 мксек. Лидерный канал окружен достаточно обширной зоной ионизации, которая заполнена зарядами, стекающими из облака.

По мере продвижения канала лидера под действием электрического поля в земле происходит смещение зарядов, причем положительные заряды скапливаются на поверхности земли и на вершине возвышающихся над поверхностью земли объектов (в частности, металлической мачты, рис. 1, а) непосредственно под развивающимся лидерным каналом.

Напряженность поля на вершине возвышающегося объекта постепенно увеличивается и в конце концов превышает критическую; с объекта может начать развиваться встречный канал разряда (встречный стример). Зона ионизации встречного стримера заполняется стекающими с вершины мачты зарядами.

Встречный стример может иметь значительную длину, которая возрастает с увеличением высоты объекта. Например, длина встречного стримера с объекта высотой до

100 м имеет величину до 40 м. При высоте объекта в несколько сот метров разряд начинается прорастанием лидерного канала от объекта к облаку, причем опускающийся ступенчатый лидер в этом случае может вовсе отсутствовать.

Когда головки ступенчатого лидера и встречного стримера соприкасаются, начинается стадия главного (обрат-

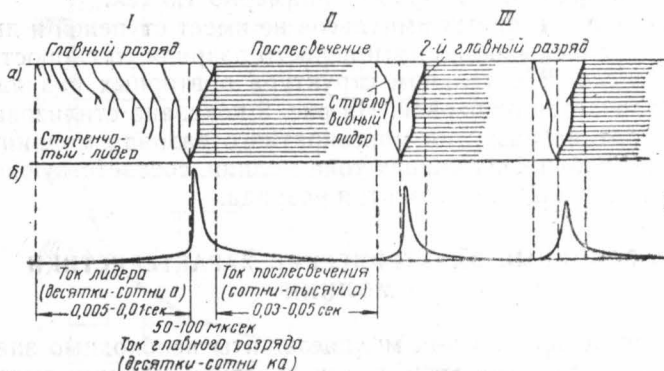


Рис. 2. Схема развития молнии

а — оптическая картина; б — токовая картина; I, II и III — соответственно 1-, 2- и 3-й разряды

ного) разряда, воспринимаемая нами как, собственно, разряд молнии (рис. 1, б). Во время этой стадии происходит нейтрализация зарядов в основном в зоне ионизации лидера. Этот процесс сопровождается интенсивным свечением и распространяется в направлении от земли к облаку со скоростью 15—150 м/мксек. По мере удаления от земли интенсивность свечения и скорость продвижения главного разряда снижаются. Главный разряд завершается, когда волна интенсивного свечения достигает облака. По каналу главного разряда в течение очень малого времени (до 100 мксек) протекает весьма большой ток, разогревающий канал до температуры порядка 20 000° С. При этом канал быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, имеющей на своем фронте высокое давление. Эта волна воспринимается нами как гром.

В последующей стадии яркость канала главного разряда резко уменьшается, но так называемое послесвече-

ние длится еще тысячные и даже сотые доли секунды, после чего стадией послесвечения завершается разряд.

Часто по одному и тому же каналу происходит несколько разрядов молнии. Примерно в 50% случаев молния имеет многократный характер и состоит в среднем из трех-четырех разрядов. Иногда число разрядов достигает нескольких десятков, а общая длительность многократной молнии составляет примерно 1,5 сек.

Лидер повторных импульсов не имеет ступеней и движется непрерывно по пути первого разряда со скоростью  $10^8$  см/сек. В остальном структура повторных разрядов не отличается от первой. На рис. 2 показана стилизованная картина развития многократного разряда молнии, а также изображена кривая тока молнии, соответствующая оптической картине развития разряда.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛНИИ

Для осуществления молниезащиты необходимо знать основные электрические характеристики молнии: амплитуду и максимальную крутизну тока, длину фронта и длину волны тока.

Амплитудой тока молнии ( $I_m$ ) называется максимальное значение тока, протекающего во время стадии главного разряда. Значения амплитуд токов молнии колеблются в широких пределах, достигая в большинстве случаев величину, равную примерно 20 ка; зарегистрированные максимальные амплитуды составляют 200—230 ка. Чтобы судить о вероятности возникновения молний с той или иной амплитудой тока, пользуются кривой вероятности токов молнии, построенной по результатам многочисленных измерений (рис. 3). Эта кривая показывает, что токи больше 100 ка возникают очень редко: примерно 2% общего числа разрядов молнии. Однако при расчетах молниезащиты взрывоопасных зданий и наружных установок для надежности принимают амплитуду тока молнии, равную 200 ка.

Кроме амплитуд токов молнии, при расчетах молниезащитных устройств необходимо знать возможные скорости нарастания этих токов, т. е. крутизны фронта токов молнии ( $K = \frac{di_m}{dt}$ ). Этот важный параметр разряда молнии определяет индуктивные падения напряжения при

протекании тока молнии по протяженным проводникам и обуславливает появление электродвижущих сил и разностей потенциалов на конструкциях, трубопроводах, проводах электросетей и т. д. как внутри зданий, так и на наружных установках, не подвергающихся непосредственному поражению.

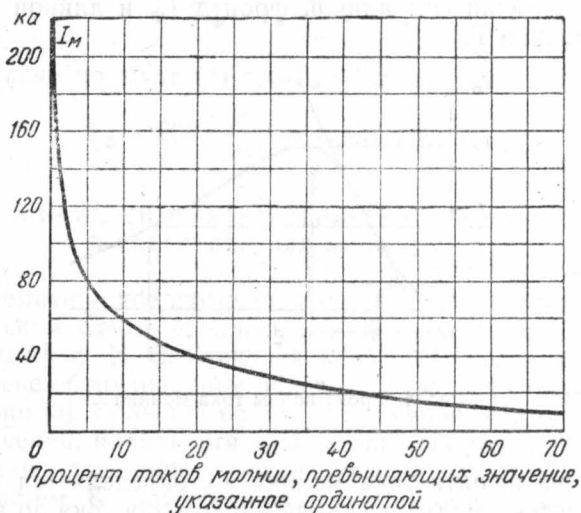


Рис. 3. Кривая вероятности токов молнии для районов с высотами над уровнем моря до 500 м

На основании измерений установлено, что крутизны фронта токов молнии также изменяются в широких пределах. Чаще всего ток молнии имеет среднюю крутизну порядка 5—10 кА/мксек, достигая иногда максимальной величины 50 кА/мксек [1]. В другом источнике [5] приводится пример регистрации максимальной крутизны 80 кА/мксек. В качестве расчетной крутизну тока молнии принимают равной 60 кА/мксек. Максимальная крутизна тока молнии характеризуется тангенсом угла  $\alpha$  (рис. 4).

Для практических целей часто бывает недостаточно знать в отдельности вероятность крутизны и амплитуды тока молнии, необходимо также иметь сведения о связи этих величин друг с другом. Однозначная связь между этими параметрами отсутствует [6]. При каждом значении амплитуды крутизна фронта может принимать самые раз-

нообразные значения, однако наблюдается тенденция увеличения крутизны с увеличением амплитуды тока молнии. Так, например, при  $I_M = 0 \div 10$  кА  $K_{ср} = 9$  кА/мксек; при  $I_M = 10 \div 20$  кА  $K_{ср} = 12$  кА/мксек; при  $I_M = 20 \div 30$  кА  $K_{ср} = 17$  кА/мксек.

Волна тока молнии (см. рис. 4) характеризуется еще двумя величинами: длиной фронта  $T_\phi$  и длиной волны тока молнии  $T$ .

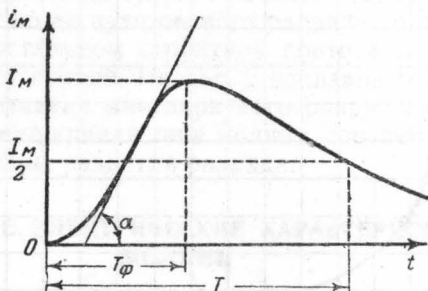


Рис. 4. Фронт волны тока молнии

Длина фронта тока молнии  $T_\phi$  определяется временем, протекающим от начала нарастания тока до амплитуды. Обычно это время находится в пределах 1,5—10 мксек.

За длину волны тока молнии  $T$  условно принимается время, протекающее от начала нарастания тока до момента спада его до половины амплитуды. Значение  $T$  колеблется в пределах от 20 до 100 мксек; в качестве расчетной может быть принята величина  $T$ , равная 50 мксек.

В литературе и нормах [14, 17] рекомендуется следующая расчетная форма кривой фронта волны тока молнии: фронт волны (время от 0 до  $T_\phi$ )

$$i_M = \frac{I_M}{2} (1 - \cos \omega t); \quad (1)$$

спад волны, начиная от момента  $T_\phi$ ;

$$i_M = I_M e^{-\frac{0,69}{T} t_1}, \quad (2)$$

где  $i_M$  — мгновенное значение тока молнии в произвольный момент  $t$ ;

$I_m$  — амплитудное значение тока молнии;  
 $\omega = 2 \frac{K}{I_m}$  — угловая частота;  
 $t_1 = t - T_\phi$  — значение времени после  $T_\phi$ .

Длина фронта волны может быть рассчитана как

$$T_\phi = I_m \frac{\pi}{2K}. \quad (3)$$

Согласно формуле (3) при  $I_m = 200$  ка

$$T_\phi = 200 \frac{\pi}{2 \cdot 60} = 1,66\pi \text{ мксек.}$$

### 3. ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛНИИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Систематическое изучение молнии и ее характеристик в Советском Союзе началось в 1935 г., когда под руководством проф. И. С. Стекольниковы были организованы специально оборудованные плевые, а позднее горные лаборатории [3]. Большая работа по измерению амплитудных значений, полярности и крутизны фронта волны тока молнии проводилась также в высоковольтных сетях энергосистем. К сбору материалов и их обработке были привлечены районные энергоуправления и ряд лабораторий и институтов (в Москве, Харькове, Тбилиси и др.), которые способствовали составлению карт и графиков, характеризующих грозовую деятельность в различных частях СССР.

Значительная работа по исследованию молнии и ее воздействий и разработке практических рекомендаций по защите объектов народного хозяйства от поражения их молнией проведена в ВЭИ им. В. И. Ленина и ЭНИН им. Г. М. Кржижановского.

Исследования параметров молнии и ее воздействий не потеряли свою актуальность и в настоящее время. Они являются важными и необходимыми для решения практических задач молниезащиты зданий и сооружений, особенно взрывоопасных.

Большое значение для обоснования пожаро- и взрывоопасности вторичных воздействий молнии и для разработки защитных мероприятий от них приобретают измерения величины токов в различного рода замкнутых токопроводящих контурах и напряжений в местах их раз-



10

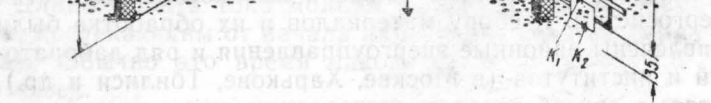


Рис. 5. Схема полевой установки

Амплитуду тока молнии  $I_m$  измеряли при помощи

Регистраторы в количестве 3 шт. помещали в гнезде уста-

новочного деревянного бруска 4, укрепленного с помощью бандаж и оттяжки из капронового шнура к токоотводу 5. При протекании в тресе тока молнии регистраторы намагничивались, после чего по остаточной намагниченности  $B_0$  регистраторов с помощью специальных градуировочных кривых устанавливали амплитуду тока молнии. Принцип метода ферромагнитных регистраторов подробно описан в литературе [2, 3].

Максимальную крутизну волн токов молнии измеряли клидонографами  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , которые включаются в контур — рамки 1 и 2, расположенные на определенном расстоянии от токоотвода 5. Клидонографы, регистрирующие максимальные напряжения в рамках, представляют собой две свинчивающиеся пластмассовые крышки с вделанными в них игольчатым и пластинчатым электродами, между которыми закладывается фотопластинка, обращенная эмульсией в сторону острия. Действие клидонографа основано на том, что разность потенциалов между его электродами вызывает ионизацию и образует на эмульсии фотопластинки фигуру, вырисовывающуюся после проявления. Формы фигур определяются полярностью напряжения, размеры же их зависят от величины приложенного напряжения. С помощью специальных градуировочных кривых по размерам радиусов полученных фигур определяют максимальное напряжение в рамке, а затем по формуле (5) подсчитывают максимальную крутизну тока молнии.

Этот способ регистрации крутизны токов молнии, подробно описанный в литературе [2, 3, 9], основан на принципе индуцирования в рамке напряжения током, протекающим по заземленному токоотводу.

Ток молнии  $i_m$  (см. рис. 5), протекающий в токоотводе, создает переменный магнитный поток, индуцирующий в рамках 1, 2 и 3 электродвижущую силу  $U_p$ , пропорциональную крутизне тока  $\frac{di_m}{dt}$  и коэффициенту взаимной индукции  $M$  рамок и токоотвода, т. е.

$$U_p = M \frac{di_m}{dt}. \quad (4)$$

Из формулы (4) находится искомая величина крутизны токов молнии

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{U_p}{M}, \quad (5)$$

где  $M = 2c \ln \frac{a+b}{a} \cdot 10^{-9}$  гн — коэффициент взаимои-

дукции для случая, когда плоскости рамок 1 и 3 (см. рис. 5) совпадают с осью токоотвода 5 (углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны нулю);

$a$  — расстояние от токоотвода до рамки в см;

$b$  и  $c$  — размеры рамки в см;

$\alpha$  и  $\beta$  — углы, определяющие взаимное расположение токоотвода и рамки.

Так как под действием ветра токоотвод мог отклониться от рамки (угол  $\alpha$ ), выходя из ее плоскости, или изменить угол наклона к рамке (угол  $\beta$ ) в ее плоскости, то влияние этих отклонений на величину коэффициента  $M$  было исследовано на модели полевой установки в лабораторных условиях, а также расчетным путем.

При помощи рамок 1 и 2 и клидонографов определяли величины напряжений на концах разомкнутых контуров.

Для измерения величин токов, индуцируемых разрядами молнии в замкнутом контуре, использовали рамку 3 (см. рис. 5) с включенным в нее калиброванным безындуктивным сопротивлением ( $r = 1$  ом). К концам сопротивления был подключен клидонограф  $K_4$ . Амплитуду тока в рамке  $I_r$  определяли по величине амплитуды напряжения  $U_r$  на известном сопротивлении.

Величину энергии, выделяемой в калиброванном сопротивлении, определяли по формуле (6):

$$W_r = \int_0^t \frac{u_r^2}{r} dt. \quad (6)$$

Примерная форма кривой э. д. с., индуцируемой током молнии в рамке 3, имеет вид, приведенный на рис. 6 [14], отсюда  $u_r \approx U_r \sin \omega t$ . Тогда энергия, выделяемая в сопротивлении, обусловленная фронтом тока молнии, т. е. в интервале времени от 0 до  $T_\phi$ , получается равной

$$W_r = \frac{U_r^2 T_\phi}{2r}. \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7)  $U_r \approx 2,5 \cdot 10^8$  в,  $r=1$  ом и принимая среднюю величину  $T_\phi=4$  мксек, получаем энергию  $W_r=12,5$  дж.

Результаты измерений в полевых условиях приводятся в табл. 1 [19]. Из таблицы видно, что при полученных величинах тока и напряжений в контурах возможны ис-

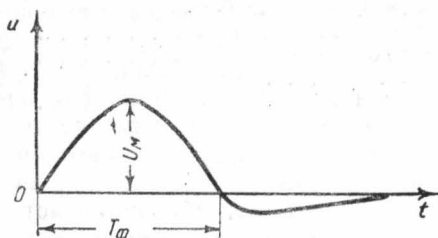


Рис. 6. Примерная форма кривой э. д. с. электромагнитной индукции тока молнии

крения, которые во взрывоопасных зданиях и установках могут послужить причиной воспламенения и взрыва горючих смесей.

Таблица 1

Результаты измерений параметров молнии и напряжений на концах разомкнутого контура

№ опыта	$I_m$ ср в ка	Полярность разряда	$U_{P_1}$ в кв	Взаимное расположение рамки $I$ и токоотвода 5 (см. рис. 5)	$M \cdot 10^{-6}$ гн	$\frac{dI_m}{dt}$ в ка/мксек
1	33,3	+	21,5	$a=150$ см; $\alpha=0$ ; $\beta=45^\circ$	0,467	46
2	10/2,5	+/-*	7,8	$a=250$ см; $\alpha=0$ ; $\beta=30^\circ$	0,321	24,4
3	7,16	-	3,6	$a=250$ см; $\alpha=0$ ; $\beta=45^\circ$	0,39	9,3

\* Имелось два разряда разной полярности.

Ниже приведены результаты измерений параметров молнии и тока в замкнутом контуре (опыт № 1).

$I_{м.ср}$ в <i>ка</i> . . . . .	33,3
$\frac{di_m}{dt}$ в <i>ка/мксек</i> . . . . .	46
Полярность разряда . . . . .	+
Калиброванное сопротивление $r$ в рам- ке $Z$ в <i>ом</i> (см. рис. 5) . . . . .	1
$U_r$ на сопротивлении в <i>кв</i> . . . . .	2,5
$I_r$ в <i>ка</i> . . . . .	2,5
$W_r$ в <i>дж</i> . . . . .	12,5

## II. ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЛНИИ

Известно, что воздействия разрядов молнии могут быть двух видов. Во-первых, молния может поражать здания и установки непосредственно, такое поражение называется воздействием прямого удара молнии (первичным воздействием). Во-вторых, молния может оказывать вторичные воздействия, объясняемые явлениями электростатической и электромагнитной индукций.

Кроме того, при разрядах молнии высокий потенциал может заноситься в здания по воздушным линиям и металлическим надземным и подземным коммуникациям. Воздействия разрядов молнии являются причиной образования искр, которые могут вызвать, в свою очередь, взрыв или пожар.

### 1. ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ПРЯМОГО УДАРА МОЛНИИ

Пожар или взрыв возникает при наличии и совпадении по времени двух факторов: горючей среды и источника воспламенения. Оба фактора могут быть при поражении взрывоопасных зданий и наружных взрывоопасных установок прямыми ударами молнии.

Под источником воспламенения понимают любой тепловой источник, в том числе и тепловое действие тока молнии, являющееся главной причиной пожаров и взрывов при прямых ударах молнии. Канал молнии имеет вы-

сокую температуру (20 000° С и выше) и запас тепловой энергии, достаточный для нагревания горючей среды до температуры воспламенения. Поэтому соприкосновение канала молнии с горючими и легковоспламеняющимися жидкостями и материалами или с взрывоопасными смесями горючих газов, паров, пылей и волокон вызывает, как правило, их воспламенение или взрыв.

В связи с этим особую опасность при прямом ударе молнии представляют здания и наружные установки, в которых по условиям технологического процесса могут образовываться взрывоопасные смеси. Однако здания, в которых постоянно находятся взрывоопасные смеси, встречаются редко, чаще взрывоопасные смеси образуются при нарушении технологических процессов, при авариях технологического оборудования и вентиляции и т. д.

57867  
Опасность поражения прямым ударом молнии некоторых наружных взрывоопасных установок бывает вызвана возможностью проплавления молнией металлических поверхностей, перегревом внутренних стенок этих поверхностей или воспламенением взрывоопасных смесей паров и газов, выделяющихся через дыхательные и предохранительные клапаны, газоотводные трубы, свечи и т. д. К таким установкам относятся металлические резервуары для хранения нефтепродуктов, газгольдеры и резервуары со сжиженными горючими газами, отдельные аппараты наружных технологических установок нефтеперерабатывающих, химических и других заводов.

Тепловые процессы в месте контакта молнии с металлом поддаются расчету при условии, что процесс тепловыделения в зоне контакта такой же, как и в электрической дуге. Расчетами и лабораторными экспериментами [10] доказано, что проплавление листового металла установок током молнии возможно лишь в том случае, если толщина листа окажется меньше 4 мм.

Проплавление током молнии металлических поверхностей может привести к взрыву и разрушениям, если внутри установки будет содержаться взрывоопасная концентрация горючих газов и паров. Однако с учетом коррозии за минимальную толщину металла, способную сохранить герметичность установки (при отсутствии высоких давлений), обычно следует считать 5 мм. Необходимо учитывать и то обстоятельство, что внутренняя часть стенки установки (даже при толщине ее 5 мм и более) в

месте удара молнии приобретает повышенную температуру, которая может оказаться критической для продукта, содержащегося в установке, и вызвать взрыв.

Для объяснения такого исхода поражения молнией наружной установки по аналогии можно воспользоваться в упрощенной трактовке теорией воспламенения горючих смесей от действия накаливаемых тел [20].

Пораженный участок стенки установки примем за накаливаемое тело с температурой  $T_1$ . Если среда в аппарате, соприкасающаяся с этим участком, будет инертной, то распределение температуры в ней около этого участка изобразится кривой  $T_1A_1$  (рис. 7, а). Если же среда представляет горючую смесь, то в силу дополнительного выделения тепла реакции распределение температур в ней будет иным и изобразится пунктирной линией  $T_1A'_1$ .

Повышение начальной температуры стенки до  $T_2$  приведет к тому, что в инертной среде распределение температуры будет подобно прежнему, только с более резким снижением (рис. 7, б, кривая  $T_2A_2$ ). В горючей же смеси, где с повышением температуры увеличивается выделение тепла, кривая распределения температуры будет снижаться значительно медленнее, чем  $T_2A_2$ . При определенной температуре  $T_2$  понижения температуры в горючей среде (вблизи накаливаемого участка стенки) не произойдет, а распределение температуры изобразится пунктирной линией  $T_2A'_2$ . Такое расположение кривой показывает, что температура горючей смеси за счет выделения тепла реакции поддерживается равной температуре накаливаемого участка стенки и, следовательно, последний больше не участвует в процессе нагрева смеси (поток тепла от участка стенки равен нулю).

Если температура стенки повысится до  $T_3$ , то на некотором удалении от нее температура горючей смеси будет расти до тех пор, пока не возникнет горение. Это изменение температуры в горючей смеси изобразится кривой  $T_3A'_3$  (рис. 7, в).

Таким образом, температура накаливаемого участка стенки  $T_2$  является предельной, при которой количество тепла, выделяемого реакцией, равняется отводимому. Если немного повысить температуру участков стенки (до  $T_3$ ), то скорость выделения тепла превысит скорость теплоотвода и смесь получит возможность разогреться до воспламенения. Следовательно, температура  $T_2$  есть не



что иное, как температура самовоспламенения. В случае возникновения горения от действия местного источника критическая температура должна быть выше температуры самовоспламенения (например,  $T_3$ ). При этом, чем меньше размеры накаливаемого участка стенки, тем выше будет критическая температура.

Влияние размеров накаливаемого тела на температуру самовоспламенения исследовал Сильвер и позже Патерсон [20]. На рис. 8 приведены результаты этих опытов,

из которых видно, что чем меньше диаметр шарика, тем выше температура самовоспламенения газовой смеси светильного газа с воздухом.

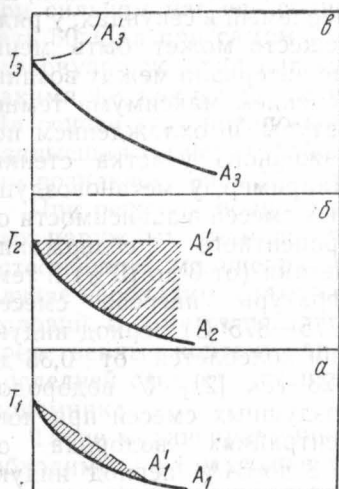


Рис. 7. Схема, поясняющая принцип зажигания накаливаемым телом

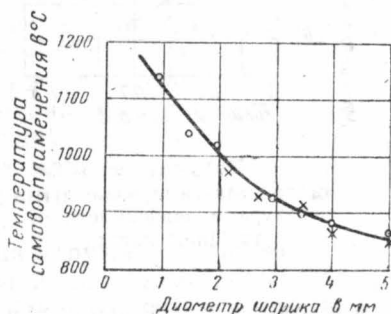


Рис. 8. Температура самовоспламенения в зависимости от диаметра шарика (по Сильверу)

хом, причем размер шариков изменяется от 0,11 до 0,5 см, а скорость движения — величина постоянная и равна 0,4 м/сек. Размер диаметра накаливаемого участка в месте прямого удара молнии можно предположить равным 10 см.

При объяснении возможности воспламенения горючей смеси в аппарате, пораженном молнией, необходимо учитывать и то, что горючие смеси имеют период индукции, или время запаздывания самовоспламенения. Воспламенения смеси не произойдет, если период индукции у горючих смесей окажется больше времени охлаждения накаливаемого участка стенки аппарата до величины ниже температуры самовоспламенения. Если же период индук-



ции будет меньше времени охлаждения накаливаемого участка стенки, то горючая смесь воспламенится.

По данным В. С. Комелькова [10], нагрев и охлаждение пораженного молнией места в стальном листе происходит за время от 0,1 до 10 сек. Максимум температуры нагрева возникает через 1—2 сек от начала нагрева и



Рис. 9. Выбор толщины металла. Максимальная температура в зависимости от толщины листа

уменьшается пропорционально росту толщины листа. Период же индукции, измеряемый в секундах, у ряда веществ может быть меньше интервала между возникновением максимума температуры и охлаждением пораженного участка стенки. Например, у метановоздушных смесей в зависимости от процентного содержания метана (от 6 до 10%) и температуры нагрева смесей (775—875°С) период индукции колеблется от 0,35 до 1,23 сек [21]. У водородовоздушных смесей при концентрациях водорода от 27,8 до 34% период индукции составляет 3 мсек, а у ацетиленовоздушных смесей при концентрации ацетилена от 10 до 18% — 4—14 мсек [22]. Период индукции у пыли битуминозного угля составляет примерно 40 мсек, а у алюминиевой пыли практически отсутствует [23]. Из приведенных примеров видно, что установки с наличием водорода или ацетилена более опасны, чем установки с наличием метана; весьма опасны также сооружения с наличием пыли алюминия.

Представленная на рис. 9 кривая  $t_{\text{макс}} = f(\delta)$  [10] позволяет выбрать допустимую толщину металла для наружных взрывоопасных установок. Там, где допустимо повышение температуры внутренней стенки до 800—1200°С (с учетом всех пожаро- и взрывоопасных свойств горючей среды) и нет высоких давлений, можно ограничиться толщиной стенки в 4—5 мм. В установках, содержащих газ или жидкость под давлением, толщина стенок должна быть не меньше 5,5—6 мм, в противном случае силой давления разогретый металл разорвется или вспучится, а

проникновение горючего газа или жидкости через разрыв может привести к пожару или взрыву.

Термическое действие удара молнии в крыши металлических резервуаров исследовалось также на моделях и в Польской Народной Республике [12] (на стальных листах толщиной 10 мм). Температура на внутренней поверхности листа за 2,5 сек повышалась до 108°С. При этом учитывалось, что температура крыши резервуара при сильном нагреве солнечными лучами может достигать 50°С, а при самом мощном ударе молнии в крышу резервуара условия нагрева ее и охлаждения являются такими же, как и в проведенных испытаниях на моделях. На основе этих предпосылок можно сделать вывод, что наивысшая температура на внутренней поверхности крыши возникает через 2,5 сек и равняется 140°С.

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, чтобы исключить непосредственный контакт канала молнии с установкой, на последней следует устанавливать специальный молниеприемник.

Такие молниеприемники на наружных установках необходимы и в том случае, если на них имеются дыхательные или предохранительные клапаны, газоотводные трубы, свечи и т. д. Причем молниеприемники должны располагаться на таком расстоянии от устройств (через которые могут выделяться способные к воспламенению смеси) и с таким превышением над ними, чтобы контакт канала молнии с молниеприемником происходил вне взрывоопасной зоны распространения этих смесей. Такие же условия нужно соблюдать и при установке молниеотводов для защиты взрывоопасных зданий с имеющимися на них газоотводными трубами, свечами, вентиляционными шахтами и другими устройствами, через которые также выделяются горючие смеси, способные к воспламенению при контакте с каналом молнии [19]\*.

Большинство промышленных зданий и наружных установок представляет сложную сеть металлических конструкций, трубопроводов и т. д., по которым в момент

---

\* О зонах взрывоопасности около устройств для выброса горючих паров и газов в атмосферу см. IV настоящей книги.

прямого удара молнии (например, при отсутствии или неправильном устройстве молниезащиты) растекается ток молнии. При отсутствии контакта между отдельными частями конструкций в местах сближения металлических частей может возникнуть мощная искра, которая явится источником воспламенения горючей среды.

Пожар или взрыв от прямого удара молнии во взрывоопасном здании может произойти и при наличии молниезащиты, если токоотводы имеют значительную протяженность и не будут приняты меры по выравниванию потенциалов между токоотводом и металлическими конструкциями здания или технологического оборудования. В этом случае между токоотводом и элементами здания, сохраняющими потенциал, близкий к потенциалу земли, возникнет искра, которая может вызвать взрыв или пожар.

К пожару может привести также нарушение целостности токоотвода, проложенного по мягкой кровле и сгораемому утеплителю покрытия здания. В этом случае при протекании по токоотводу тока молнии в месте разрыва возникает мощная искра.

## **2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ МОЛНИИ НА ПРОВОДНИКИ**

Прямой удар молнии в металлические проводники вызывает не только оплавление металла, но и нагревание проводников, по которым протекает ток молнии. При этом в проводниках может выделяться такое количество тепла, которое при недостаточном сечении металла может его расплавить или даже испарить.

При расчете минимальных сечений токоотводов исходят из условия, что вся тепловая энергия, выделяемая током молнии, идет на нагрев металла токоотвода. Потерей тепла в окружающую среду из-за кратковременности процесса нагревания пренебрегают.

Расчетами определено, что минимальное сечение стальных токоотводов, исключающее расплавление, составляет  $16 \text{ мм}^2$ , а медных —  $6 \text{ мм}^2$ . Однако, учитывая коррозию металлов, минимальные сечения токоотводов следует увеличивать. Так, в практике имелись случаи, когда от действия тока молнии токоотводы распадались на куски длиной в несколько сантиметров. Это объясняется, по-видимому, не только тепловыми, но и электроди-

намическими усилиями, возникающими в проводниках при протекании токов молнии. Таким образом, в целях повышения механической прочности и увеличения срока службы рекомендуется применять стальные токоотводы сечением не менее 35 мм<sup>2</sup>.

### 3. МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРЯМОГО УДАРА МОЛНИИ. ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ

При поражении молнией сооружений из твердого негорючего материала (камня, кирпича, бетона и т. д.) наблюдаются местные разрушения. Если между пораженным молнией участком объекта и землей нет токопроводящих путей, то потенциал этого участка по отношению к земле достигает высоких значений и в результате 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 в узких каналах достигает значительных величин, что приводит, как правило, к разрыву или расщеплению токонепроводящих частей объекта, подверженных воздействию тока молнии. По этой причине происходит, например, расщепление деревянных сооружений и деревьев (когда из них вырываются щепы длиной до нескольких метров), разрушение незащищенных кирпичных дымовых труб, башен и т. д.

Известны также случаи частичного или даже полного разрушения железобетонных сооружений. Это можно, очевидно, объяснить тем, что в местах соединений стальной арматуры встречаются плохие контакты. При наличии же надежных контактов между частями арматуры железобетонных сооружений последняя может служить хорошим токоотводом для молнии, так как имеет большое общее сечение, исключаяющее опасные повышения температуры даже при самых больших токах молнии.

Молния опасна и тем, что ее удар в незащищенное или неправильно защищенное от молнии здание может вызвать поражение людей, находящихся как внутри здания, так и около него. Эти поражения могут произойти в результате воздействия высоких потенциалов, возникающих на отдельных частях здания и оборудования, через напряжения прикосновения и шаговые напряжения.

#### 4. ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЛНИИ

Под вторичными воздействиями молнии подразумеваются все те явления во время разрядов молнии, которые сопровождаются появлением разностей потенциалов на конструкциях, трубопроводах и проводах внутри помещений и сооружений, не подвергающихся непосредственному прямому удару.

Вторичные воздействия молнии возникают в результате электростатической и электромагнитной индукций. Ко вторичному воздействию молнии можно отнести также и появление разностей потенциалов внутри помещений вследствие заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации (трубопроводы, кабели, воздушные линии и т. п.).

**Электростатическая индукция.** Как уже указывалось, накопление каких-либо зарядов в грозовом облаке и частичное перемещение их в формирующийся канал молнии в ее начальной стадии вызывает скопление связанных зарядов противоположного знака на поверхности земли и наземных объектах. 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. Возникающие разности потенциалов, даже при ударах молнии на расстоянии 100 м от здания, могут достигать десятков киловольт и способны вызвать искры в воздушных промежутках. Несмотря на малую энергию таких искр, они могут быть причиной взрывов в помещениях со взрывоопасными концентрациями горючих смесей газов, паров, пылей и т. д.

На таких устройствах, как, например, провода воздушных линий (электрических, линий связи и т. д.), освободившиеся заряды распространяются в виде волн и создают напряжения по отношению к земле в десятки и сотни киловольт. Такие высокие потенциалы, будучи занесенными по проводам воздушных линий в связанные с ни-

ми здания и сооружения, способны вызвать в них мощные искровые разряды.

**Электромагнитная индукция.** Разряд молнии сопровождается появлением в пространстве быстро изменяющегося магнитного поля, индуцирующего э. д. с., способную вызвать искрообразование в контурах, образованных внутри здания из различных протяженных металлических предметов (трубопроводов, воздухопроводов, проводов, кабелей и т. д.).

Если контур полностью замкнут, то индуцированная э. д. с. вызовет в нем электрический ток и небольшое нагревание элементов контура, как правило, не представляющее какой-либо опасности.

Контур могут быть незамкнутыми или иметь плохие контакты в местах соединений (например, во фланцах трубопроводов). Вот в таких незамкнутых контурах, в местах сближений отдельных элементов, э. д. с. и может вызвать искру. В современных цехах предприятий, перерабатывающих пожаро- и взрывоопасные вещества, количество различных металлических контуров обычно бывает значительным, поэтому вероятность появления искр в таких цехах велика.

Каких-либо данных о величинах энергии, рассеиваемой в таких искрах, в нормативных и литературных источниках не приводится. Имеются лишь упоминания о том, что даже в контурах с относительно малыми размерами выделяющаяся при искрении энергия в сотни и тысячи раз больше минимальной величины, достаточной для взрыва и воспламенения горючей смеси [4].

В литературе [24] указывается, что значительное число пожаров нефтяных цистерн, резервуаров и складских емкостей обусловлено вторичными (или индуцированными) проявлениями, а не прямым ударом молнии. Эти пожары являются результатом искр, генерированных в емкостях, где находятся горючие паровоздушные смеси.

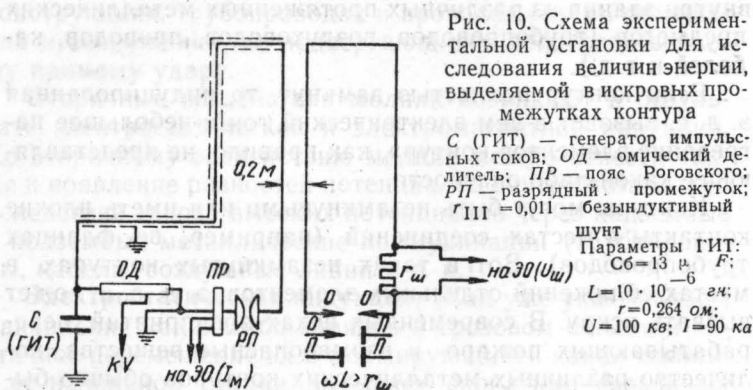
Для оценки пожаро- и взрывоопасности вторичных воздействий молнии были проведены некоторые исследования воспламеняющей способности электрических искр и нагрева мест плохих контактов, обуславливаемых вторичными воздействиями молнии. Исследования проводились как в полевых, так и в лабораторных условиях.

В лабораторных условиях, используя генератор импульсных токов (ГИТ), проводили исследования величин энергии, рассеиваемой в искрах, возникающих в искровом



промежутке вторичного контура, а также характера искрений и нагрева во фланцевых соединениях вторичных контуров при протекании по ним импульсных токов.

Схема ГИТ и его разрядной петли дана на рис. 10; там же указаны параметры ГИТ.



Экспериментальный контур представлял собой рамку размером  $1 \times 3 \text{ м}$ , изготовленную из стальных труб  $\frac{3}{4}$ ". В рамке путем замены электродов создавались искровые промежутки «острие — острие» (О—О), «острие — плоскость» (О—П) и «плоскость — плоскость» (П—П).

Цель рассматриваемого эксперимента заключалась в получении энергии в искровом промежутке при минимальных, но соответствующих наибольшей вероятности параметрах тока молнии, имитируемых разрядом ГИТ. Важнейшим из них для целей рассматриваемого эксперимента является крутизна фронта волны тока молнии  $\left( \frac{di_m}{dt} \right)$ , которая обуславливает появление э. д. с. индукции в контурах, не подвергающихся непосредственному поражению молнией. Вариации этого параметра молнии весьма велики, но так как ток молнии часто имеет крутизну фронта  $5 \text{ кА/мксек}$ , то эксперименты проводили при крутизне фронта тока в разрядной петле ГИТ, близкой по величине к указанной.

Для определения энергии, выделяемой в искровых промежутках контура, производили осциллографирование амплитуды напряжения  $U_m$  на безындуктивном шун-

те ( $r_{ш} = 0,011 \text{ ом}$ ), включенном последовательно с искровым промежутком. По известным величинам  $U_m$  и  $r_{ш}$  вычисляли амплитуду тока искры  $I_{м.и}$ .

Осциллографирования напряжения на искровом промежутке не производили, а для определения энергии искры на основании имеющихся исследований [25, 26] принимали минимальное напряжение  $U_{и.д}$ , равное 50 в и характерное для дуговой стадии искры.

Вычисление энергии в искровых промежутках производили по формулам (8) и (9):

$$W_{и} = \int_0^t i_{и} U_{и.д} dt. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) значение

$$i_{и} = I_{м.и} \sin \omega t$$

и вычисляя интеграл в пределах от  $t=0$  до  $t = \frac{T}{4}$ , получим

$$|W_{и}| = I_{м.и} U_{и.д} \frac{T}{2\pi}. \quad (9)$$

Результаты определения энергии в искровых промежутках контура приводятся в табл. 2.

Таблица 2  
Величина энергии в искровых промежутках контура

Вид искрового промежутка	Период тока $T$ в мксек	$r_{ш}$ в см	$U_m$ в в	$I_{м.и}$ в а	$U_{и.д}$ в в	$W_{и} \cdot 10^{-3}$ дж
О—О	69	0,011	28	2545	50	1400
О—П			29,7	2700		1490
П—П			28	2545		1400

Из табл. 2 видно, что конструкция электродов искрового промежутка существенного влияния на величину энергии, выделяемой в промежутках, не оказывает.

Сравнение величин энергии, выделяемой в искровых промежутках экспериментального контура, с минимальной энергией электрических искр, достаточной для воспламенения более 50 различных паро-, газо- и пылевоздушных взрывоопасных смесей (см. приложение I, табл. I



и 2), показало, что энергия, выделяемая в искрах, значительно (в 5,6—14 раз) превышает величины минимальной энергии, достаточной для воспламенения даже трудновоспламеняемых пылевоздушных взрывоопасных смесей. Если же взять паро- и газовоздушные взрывоопасные смеси, то превышение будет еще более значительным (в  $10^2$ — $10^5$  раз), причем это превышение должно быть еще больше, поскольку параметры разряда молнии могут значительно превышать те, которые имитировались разрядом ГИТ. Необходимо учитывать и то, что размеры токопроводящих контуров могут также значительно превышать размеры экспериментального контура.

При исследовании нагрева и искрообразования во фланцевых соединениях токопроводящих контуров при протекании по ним токов молнии или тока, обусловливаемого э. д. с. индукции, были проведены два вида опытов. В обоих случаях опыты проводились как на чистых, так и на подвергшихся сильной коррозии фланцевых соединениях.

Экспериментальная установка (рис. 11) состояла из генератора импульсных токов и экспериментального фланцевого соединения, которое включалось 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 такого фланцевого 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.

Количество нормально затянутых болтов изменялось в опытах от 1 до 5, величина амплитуды разрядного тока ГИТ колебалась в пределах 10,7—48,2 ка. Опыты проводились как одиночными разрядами, так и серией разрядов, следующих друг за другом.

Такие же опыты были проведены и при сильно корродированном (ржавом) фланцевом соединении с диаметром соединительных болтов 6 и 8 мм. Величина переходного сопротивления у этого фланцевого соединения 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. Результаты про-

веденных экспериментов, а также расчеты показывают, что как чистые, так и ржавые фланцевые соединения (с точки зрения возможности их опасного нагрева при протекании по ним токов молнии, а тем более токов, обус-

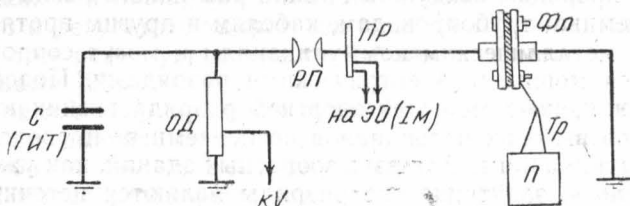


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для исследования нагрева и искрообразований во фланцевых соединениях

С (ГИТ) — генератор импульсных токов; РП — разрядный промежуток; ПР — пояс Роговского; ФЛ — экспериментальный фланец; Тр — термопара; П — потенциометр типа ПП

ловливаемых э. д. с. индукции) для взрывоопасных сред никакой опасности не представляют.

Исследование искрообразований проводили на тех же фланцевых соединениях и при тех же параметрах разрядного тока ГИТ, что и при опытах по исследованию нагрева.

Опыты с чистым фланцевым соединением показали, что при трех, четырех и пяти болтах искрений во фланцевом соединении при протекании по нему тока даже с амплитудой 48,2 ка не наблюдается. При одном или двух болтах замечается 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). А при больших величинах тока искрение происходило также и между фланцами.

Опыты показали, что ржавые фланцевые соединения с точки зрения искрообразований в них представляют большую опасность. Следовательно, в зданиях со взрывоопасной и одновременно химически активной средой, где надлежащий контакт с допустимой величиной переходного сопротивления (0,03 ом) не может быть обеспе-

чен, необходима установка перемычек из стальной проволоки или иных шунтирующих устройств.

**Занос высоких потенциалов.** Заносы высоких потенциалов в здания возможны по рельсовым путям, эстакадам, проводам воздушных линий различного назначения, подземным трубопроводам, кабелям и другим протяженным металлическим коммуникациям и могут сопровождаться мощными электрическими разрядами. Подобные явления, но с меньшей энергией разряда возникают от заноса высоких потенциалов по подземным проводящим коммуникациям. Для взрывоопасных зданий, как уже отмечалось, электрические разряды являются источником возникновения взрыва.

Таким образом, пожаро- и взрывоопасность вторичных воздействий молнии обуславливается главным образом возможностью искрообразования и выделением в них достаточных энергий, способных воспламенить взрывоопасные смеси горючих веществ.

#### **5. СТАТИСТИКА И АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ ОТ РАЗРЯДОВ МОЛНИИ**

За 1947—1958 гг. в СССР пожары от разрядов молнии составили в среднем 6,6% по отношению к общему их числу. Наибольшее число пожаров от молнии, составившее 7,7%, было в 1954 г. Особенно много пожаров за этот период произошло в Белорусской ССР (16,4%), Литовской ССР (12,1%) и Украинской ССР (10,8%).

Согласно американским данным, за 1943—1952 гг. в США пожары от молнии составили 8,61%. По данным 51 организации страхования от огня, убытки от пожаров по причине поражения объектов молнией составили в США в 1953 г. 10,84%.

В Польской Народной Республике за 1950—1958 гг. от молнии возникло 14 720 пожаров, убытки которых при поражении объектов молнией составили: в 1957 г. 52,6 млн. злотых, а 1958 г. 68,6 млн. злотых.

Пожары от разрядов молнии в основном происходят в сельской местности. Однако в ряде случаев пожары, а иногда и взрывы возникают в результате поражения молнией промышленных взрывоопасных зданий и наружных установок, что приводит к уничтожению материальных ценностей, нарушению технологических процессов производств, сокращению выпуска продукции и т. д.

Многочисленные наблюдения показывают, что осо-

бенно большой процент пожаров от разрядов молнии приходится на нефтяную промышленность. Так, за 1905—1925 гг. в США произошло 304 пожара нефти, во время которых сгорело 416 резервуаров. Изучение причин, вызвавших эти пожары, показало, что 55% пожаров возникло в результате ударов молнии. Из 230 пораженных при этом резервуаров только 6 были с герметическими крышами [27].

Прямой удар молнии в наземный негерметичный резервуар вызвал крупный пожар на одной из наших нефтебаз в 1941 г. Быстрому распространению пожара на соседние резервуары способствовали следующие обстоятельства: отсутствовали нормативные разрывы между резервуарами, погрузочные и разгрузочные трубопроводы были расположены на поверхности земли, отсутствовало обвалование.

На одной из перевалочных нефтебаз возник крупный пожар от прямого удара молнии в резервуар с сырой нефтью, быстро распространившийся на всю нефтебазу: в процессе горения произошел большой силы выброс нефти из горящего резервуара, в результате чего пять резервуаров были полностью разрушены, а два резервуара сильно повреждены.

На нефтескладе от прямого удара молнии в резервуар с сырой нефтью произошел взрыв, которым была сорвана крыша резервуара и выброшено около 1 т нефти. Воспламенившаяся выброшенная нефть создала сплошное огненное кольцо вокруг резервуара. Все резервуары нефтесклада были металлическими сварными с толщиной листов кровли 2,5 мм и оборудованы необходимой по нормам арматурой.

На одной из нефтебаз от разряда молнии возник пожар подземного резервуара с нефтепродуктами. Подземный железобетонный резервуар представлял собой прямоугольную конструкцию  $50 \times 130$  м, глубиной 5,5 м, емкостью 30 000 т. На перекрытии резервуара были установлены 10 вентиляционных металлических труб высотой 1 м. В самом резервуаре хранилась ловушечная эмульсия (смесь воды, нефти и механических примесей).

В приведенных примерах пожаров резервуарные парки не имели молниезащиты. Поражениям молнией подвергались также и такие взрывоопасные объекты, как спиртохранилища спиртовых и ликеро-водочных заводов. Например, от прямого удара молнии в крышу спирто-

хранилища произошел взрыв и возник пожар в главном корпусе спиртозавода. Во время тушения пожара на территории завода и вблизи него произошло еще несколько разрядов молнии. Главный корпус завода имел молниезащиту, но она была выполнена неправильно<sup>1</sup>. Пожаром и взрывами были уничтожены: спиртоприемное отделение с оборудованием, семь емкостей, в которых находилась готовая продукция, покрытие и чердачное перекры-

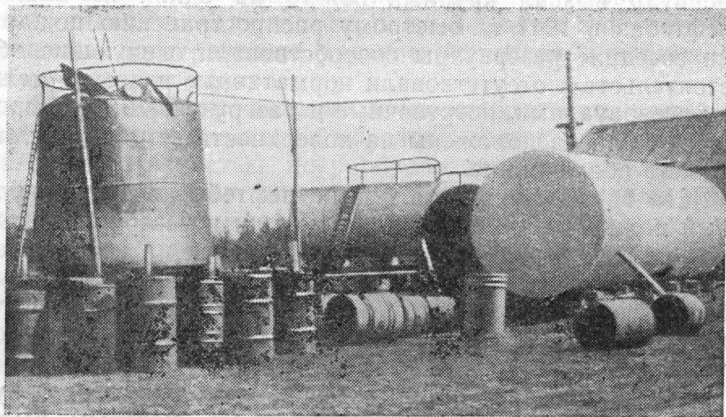


Рис. 12. Общий вид спиртохранилища. Разряд молнии указан стрелкой

тие над спиртохранилищем и бродильным отделением и др.

На спиртовой базе от прямого удара молнии в резервуар со спиртом произошел взрыв. В результате взрыва часть крыши резервуара была сорвана (рис. 12) и загорелся спирт, а в нижней части резервуара образовались два отверстия: одно размером  $30 \times 5$  см, а второе  $2 \times 5$  см, через которые спирт вытекал на землю. Герметичный резервуар с замкнутым циклом дыхания через газовую трубу (в верхней части), соединенную с мерниками в насосной, был заземлен при помощи газовой и наполнительной труб, которые подсоединялись к контуру заземления насосной станции. Кроме того, имелось заземление через металлическую лестницу резервуара.

<sup>1</sup> Анализ молниезащиты в этом и других случаях см. V,1.

При обследовании резервуара после пожара было обнаружено, что примерно в 2 м от лестничной площадки сохранились характерные следы оплавления и разрыва металла длиной 12—15 см. Сопротивление заземления резервуара и насосной составляло 8 ом.

В другом случае в результате прямого удара молнии в крышу спиртохранилища загорелась деревянная обрешетка кровли, а спустя 4—5 мин произошел взрыв установленного внутри металлического резервуара емкостью 47,5 м<sup>3</sup>. Взрывом сорвало часть крыши резервуара, и спирт воспламенился. В качестве защиты главного корпуса и склада спирта от разрядов молнии использовали металлическую заземленную дымовую трубу высотой 33 м, однако склад оказался вне зоны защиты.

Значительные разрушения произошли от пожара и взрыва, вызванных поражением молнией спиртохранилища одного из ликеро-водочных заводов. Спиртохранилище размером 31×9×9 м находилось на расстоянии 7 м от главного корпуса. Внутри спиртохранилища размещались четыре закрытых резервуара диаметром 6 м и емкостью по 180 м<sup>3</sup> спирта каждый. Была предусмотрена защита завода молниеотводом, установленным на заводской трубе, однако спиртохранилище в зону защиты не попало. Спирт интенсивно горел во всех четырех резервуарах, причем в одном из резервуаров разорвало днище, и спирт из отверстия начал выливаться на пол. Примерно через 1 ч в подвальном помещении главного корпуса произошел взрыв, пов-

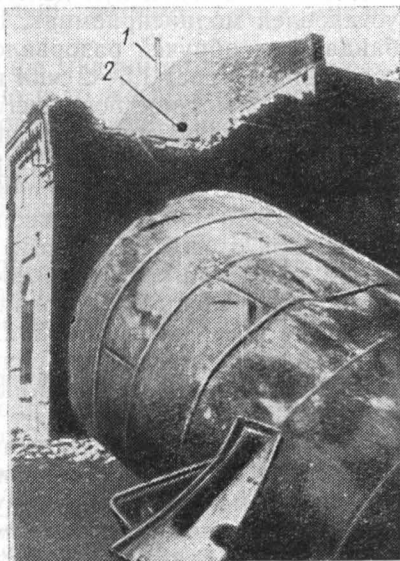


Рис. 13. Разрушенное покрытие спиртохранилища и выброшенный резервуар

1 — молниеотвод; 2 — примерное место удара молнии



лекший за собой большие разрушения. Так, в результате пожара и взрыва было уничтожено 700 м<sup>3</sup> спирта, разрушены ликерный и очистительные цехи главного корпуса, вышли из строя моечный цех, механическая мастерская и другие подсобные помещения. В самом спиртохранилище сгорело покрытие и деформировались все резервуары. По подсчетам, строительные конструкции были повреждены на 30 %, оборудование — на 25 %.

От удара молнии загорелась обрешетка кровли спиртохранилища одного из ликеро-водочных заводов и произошел взрыв резервуара, наполненного на  $\frac{1}{3}$  спиртом. Через несколько минут взорвался другой резервуар, наполненный на  $\frac{1}{4}$  спиртом, при этом резервуар был выброшен через крышу наружу на расстояние 5 м от спиртохранилища (рис. 13). Затем взорвался третий резервуар. Этими тремя последовательными взрывами покрытие спиртохранилища было сброшено на землю.

По утверждению очевидцев, вначале произошел разряд молнии в заводскую дымовую трубу, на которой был установлен молниеприемник. При этом один из верхних бандажных обручей разорвался и нарушил целостность токоотвода. Через 1,5—2 мин в эту же трубу последовал второй удар молнии, после чего молния ударила в металлическую кровлю спиртохранилища. При осмотре места пожара был обнаружен лист кровли со следами проплавлений. Здание спиртохранилища было одноэтажное размером 20×15×10 м, противопожарная стена разделяла его на два отсека, в которых находились по три резервуара общей емкостью 53 264 дл спирта. Резервуары были установлены на основании, состоящем из железобетонных и деревянных балок. Соединение с землей было неполным. На здании спиртохранилища также был установлен молниеотвод, но высота его была недостаточной.

Летом 1960 г. возник пожар в трех ливневых ловушках одного из нефтехимических комбинатов от прямого попадания молнии. Нефтеловушки представляли собой открытые бассейны с бетонными стенками и основанием, по периметру они имели ограждение высотой 1 м, изготовленное из металлической решетки. Молниезащита отсутствовала. В результате пожара сгорело 150 т нефтепродуктов и были повреждены электродвигатели, осветительная арматура, металлоконструкции надземной части и железобетонные конструкции на общей площади 320 м<sup>2</sup>.

Значительный интерес представляют случаи загорания газов (выходящих из аппаратов наружных технологических установок) от разрядов молний на нефтеперерабатывающих и химических заводах.

Так, например, на одном объекте загорелись газы, стравливаемые из склада сжиженных газов через свечу.

В другом случае произошло загорание одновременно на двух установках: газа, выходящего из емкостей аварийного сброса установки алкилирования, и паров нефтепродукта, вышедших через неплотности фланцевого соединения трубопровода вблизи ректификационной колонны. На этих же объектах произошло загорание паров нефтепродуктов, выходящих из газосепаратора атмосферно-вакуумных трубчаток.

Во всех этих случаях загораний аппараты специальных молниезащитных устройств не имели, кроме заземления. Расположены они были по отметке значительно ниже ректификационных колонн, которые также имели заземление.

В 1963 г. от серии разрядов молнии на двух смежных промыслах, примерно в одно и то же время, произошли два случая загорания природного газа. В первом случае загорелся газ, выходящий через газоотводные трубы сальников компрессоров компрессорной станции. Газоотводные трубы находились примерно в 20 м от здания компрессорной станции и в 20—50 м от стальных вышек высотой 20—22 м. На втором промысле воспламенился затрубный газ у устья скважины буровой, причем очаги воспламенения газа находились примерно в 500 м друг от друга.

В этом же году на территории нефтесборника одного из промыслов от разряда молнии произошло одновременное воспламенение газа, который выходил через свечу лобковой установки, и газа, выбрасываемого через сборную газоотводную трубу, располагавшуюся за территорией пункта на расстоянии 200 м.

Приведенные примеры еще раз подтверждают важность и актуальность вопроса о зонах взрывоопасности около наружных взрывоопасных установок.

Интересен случай взрыва, происшедшего в июле 1960 г. от заноса высокого потенциала по проводам воздушной линии. Разряд молнии пришелся в металлическую траверсу для крепления проводов воздушной линии,



и высокий потенциал по проводам был занесен на распределительный щиток, расположенный в здании бензозаправочной станции. От искрения на щитке произошел взрыв горючей смеси паров бензина с воздухом. Взрывной волной были выбиты оконные переплеты, двери,

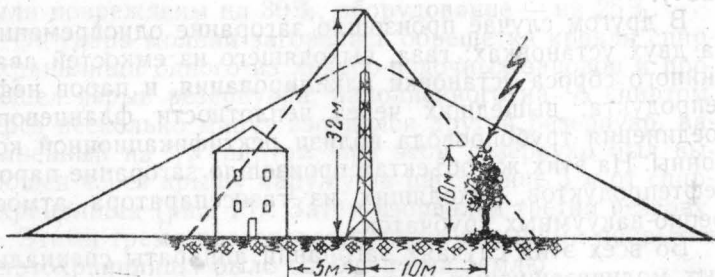


Рис. 14. Пример защиты взрывоопасного здания и поражения дерева, находящегося в зоне защиты молниеотвода

сильно разрушены стены и покрытие. Высота здания была 3 м, молниезащита отсутствовала.

В августе 1961 г. возник пожар от разряда молнии в аккумуляторном отделении ремонтных мастерских одного совхоза. Удар молнии произошел в опору на вводе воздушной электрической линии, провода которой были подключены к щитку в аккумуляторной. На рубильнике щитка возникла электрическая дуга, что и послужило причиной пожара. Здание мастерских имело три стержневых молниеотвода, однако опора на вводе электропроводов и отделение аккумуляторной мастерской не входили в зону защиты молниеотводов.

В 1945 г. во время удара молнии в дерево (рис. 14) в помещениях взрывоопасного здания было замечено искрение во фланцевых соединениях металлических труб [28]. Этот случай характерен как с точки зрения вторичных воздействий молнии, так и тем, что пораженное дерево находилось в зоне защиты отдельно стоящего молниеотвода — произошел прорыв молнии в зону защиты.

В апреле 1958 г. возник пожар склада в цехе подготовки сырья одной швейной фабрики. По заключению

технической экспертизы пожар произошел при следующих обстоятельствах. Рядом со зданием цеха находилась дымовая металлическая труба котельной высотой 24 м, установленная на кирпичном основании и закрепленная тремя металлическими оттяжками. Одна из металлических оттяжек была закреплена на двухметровом куске



Рис. 15. Схема молниезащиты дымовой трубы и склада — цеха

лось острие 4, оставшееся при незаконченной обработке плиты строганием. Это острие было отогнуто от плиты в сторону трубы и находилось от нее на расстоянии 10—15 мм. В качестве молниеприемника дымовой металлической трубы был использован круглый стальной стержень диаметром 22 мм, высотой 1,2 м, соединенный со стальной полосой сечением 25×6 мм. Отдельные полосы заземляющего спуска по трубе были соединены между

собой болтами. Величина сопротивления растеканию тока заземляющего контура составляла 5,5 ом.

При прямом попадании молнии в дымовую трубу произошло оплавление молниеприемника, плиты крепления рельса, оттяжки, острия и трубы центрального водяного отопления. Занос высокого потенциала по оттяжке и наличие воздушного промежутка между острием плиты и хорошо заземленной трубой отопления вызвали сильное искрение и оплавление металла, расплавленные частицы попали на кипы материала, что и явилось причиной пожара.

Приведенные примеры показывают, что повреждения, пожары и взрывы от разрядов молнии при ее первичном или вторичном воздействии происходят либо при отсутствии молниезащиты, либо при ее неисправности или неправильном выполнении. В последнем случае прямыми ударами молнии поражаются части зданий и сооружений, не вошедшие в зону защиты молниеотводов, или же с частей молниеотвода молния переходит на элементы сооружения или электропроводку.

### **III. ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ МОЛНИИ**

Разработка практических мероприятий по молниезащите во многих случаях опережала работы по исследованию молнии и ее воздействий на здания и сооружения, поэтому некоторые рекомендации по молниезащите базировались на недостаточно обоснованных, приближенных, а иногда и неправильных представлениях.

За последние десятилетия (1930—1963 гг.) по вопросам молниезащиты зданий и сооружений было проведено много исследований экспериментального и теоретического характера и достигнуты значительные успехи [1—11, 19].

В 1940 г. Энергетическим институтом Академии наук СССР был издан проект «Руководящих указаний по грозозащите промышленных и других сооружений», который явился первым опубликованным материалом, широко освещавшим вопросы научного анализа и инженерного проектирования молниезащиты для сооружений различ-

ных назначений. За последующие два десятилетия различными ведомствами был издан ряд нормативных материалов по вопросам молниезащиты [14—17].

Однако и в литературе, и в нормативных материалах по некоторым вопросам встречаются противоречивые указания, что затрудняет правильное решение вопросов молниезащиты с точки зрения их надежности и экономичности. При рассмотрении проектов молниезащиты и обследовании объектов автору приходилось сталкиваться с такими положениями, когда на одинаковых по характеру и степени опасности производствах (и даже в филиалах одного и того же проектного института) вопросы молниезащиты решались по-разному.

Рассмотрим некоторые вопросы молниезащиты взрывоопасных зданий и наружных установок, правильное решение которых является важным звеном в обеспечении пожаро- и взрывобезопасности таких объектов.

## **1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ МОЛНИЕЙ**

В основу классификации зданий и сооружений по степени опасности поражения их молнией и выбора необходимых мер молниезащиты положена вероятность возникновения взрыва или пожара, а также масштабы возможных разрушений. На основе этих положений все здания и сооружения подразделяются на три категории.

**К 1-й категории** относятся здания и сооружения, в которых длительно сохраняются или систематически возникают взрывоопасные смеси газов, паров и пыли с воздухом или другими окислителями; перерабатываются или хранятся взрывчатые вещества в неметаллических укупорках или в открытом виде. Взрыв таких зданий или сооружений иногда сопровождается значительными разрушениями и человеческими жертвами.

К этой категории относятся здания и сооружения, которые по классификации «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) причисляются к взрывоопасным — классов В-I и В-II.

**К 2-й категории** относятся здания и сооружения, в которых взрывоопасные смеси газов, паров и пыли с воздухом или другими окислителями возникают исключительно в момент производственных аварий или неис-

правностей или же взрывчатые вещества хранятся в прочной металлической укупорке.

К этой категории относятся здания и сооружения, которые по ПУЭ причисляются к взрывоопасным — классов В-Ia, В-Iб и В-IIa.

Определение категории здания или сооружения по рассмотренной классификации является ответственным моментом во всем комплексе молниезащиты взрывоопасных объектов. От правильного решения этого вопроса зависит не только соответствующая степень надежности средств молниезащиты, но также и их экономическая целесообразность.

Степень взрывоопасности здания зависит от ряда условий, однако общим для взрывоопасных зданий является то, что в подавляющем большинстве случаев при нормальных условиях технологии в них отсутствуют взрывоопасные смеси, а появляться они могут только в результате аварий или неисправностей технологического оборудования, вентиляции и т. д. Поэтому в большинстве случаев взрывоопасные здания и сооружения на нефте- и газоперерабатывающих, химических, металлургических и других предприятиях относятся по рассмотренной классификации к объектам 2-й категории.

При выполнении некоторых мероприятий допускается снижать категорию здания (например, с 1-й на 2-ю), а следовательно, снижать и жесткость требований к молниезащите этих зданий. К таким мероприятиям, позволяющим снизить класс взрывоопасности помещений (например, с признаками В-I и В-II на одну ступень, а следовательно, считать здания с такими помещениями 2-й категории), относятся следующие.

1. Устройство системы вентиляции, основанной на установке нескольких вентиляционных агрегатов, постоянно находящихся в работе. При аварийной остановке одного из агрегатов остальные должны полностью обеспечивать поддержание на надлежащем уровне кратности обмена воздуха, а также достаточную равномерность действия вентиляции по всему объему помещения, включая подвалы, каналы и их повороты.

2. Установка резервного вентиляционного агрегата, автоматически включающегося при остановке рабочего агрегата.

3. Устройство автоматической сигнализации, действующей при возникновении в любом пункте помещения

концентрации газов или паров, не превышающей 50% минимальной взрывоопасной. Число сигнальных приборов и их расположение, а также система резервирования должны обеспечивать безотказное действие сигнализации. В качестве автоматически действующих сигнализаторов, определяющих наличие взрывоопасных концентраций газов и паров в помещениях, могут применяться сигнализаторы типов СГГ-В2Б, СГГ-В3Г, СГГ-В4А, СГГ2-В2Б, СГГ2-В4А и др., которые калибруются на метан, коксовый газ, дивинил, пары этилового спирта и другие среды.

**К 3-й категории** относятся здания и сооружения, в которых прямой удар молнии может вызвать пожар, механические разрушения и поражения людей.

К этой категории относятся такие здания и сооружения, которые по ПУЭ причисляются к пожароопасным — классов П-I, П-II и П-IIa, а по строительным нормам и правилам (СНиП II-M.2-62) — к категориям В, Г и Д. К 3-й категории следует отнести также жилые и общественные здания и такие сооружения, как дымовые трубы, водонапорные башни и т. д.

Особенность рассматриваемой категории заключается в том, что к 3-й категории отнесены также наружные установки, которые по ПУЭ причисляются к взрывоопасным — класса В-Iг (резервуары, газгольдеры, технологические установки и т. д. с горючими и легковоспламеняющимися жидкостями и газами).

## 2. ОЦЕНКА ГРОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ СССР И ВОПРОСЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

Вероятность поражения молнией какого-либо сооружения зависит от частоты гроз (интенсивности грозовой деятельности) в районе его расположения, высоты и площади сооружения и некоторых других факторов.

В настоящее время интенсивность грозовой деятельности в данной местности принято характеризовать средним числом грозовых часов в году ( $n_{\text{ч}}$ ), а не числом грозовых дней ( $n_{\text{д}}$ ). Между этими характеристиками существует приближенная связь:  $n_{\text{ч}} \approx 1,5n_{\text{д}}$  — при интенсивности грозовой деятельности примерно до 30 дней и  $n_{\text{ч}} \approx 2n_{\text{д}}$  — при интенсивности более 30 грозовых дней в году.

Для ориентировочной оценки грозовой деятельности

в различных районах СССР составлена карта [16] распределения среднего числа грозových часов в году, на которой нанесены линии равной продолжительности гроз. Эта карта показывает, что грозовая деятельность на территории СССР весьма различна, даже в пределах одной области отдельные районы могут значительно отличаться друг от друга по количеству грозových часов в году. Так, например, грозовая деятельность характеризуется 10—15 грозowymi часами в год (7—10 грозových дней) для северной части страны (районы Заполярья и близкие к ним) и 100—120 грозowymi часами в год для отдельных районов юга (Южный Урал, Донбасс, Кавказ и др.). При этом можно считать, что в районах с грозовой деятельностью 40—80 ч (20—40 грозových дней) среднее число ударов молний на  $1 \text{ км}^2$  поверхности земли в год составляет примерно 2,5—5.

Здания и сооружения 1-й категории подлежат обязательной молниезащите от прямых ударов молнии, вторичных ее воздействий и заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации независимо от их месторасположения на территории СССР [16]. Это объясняется тем, что, несмотря на малую вероятность поражений зданий этой категории (например, в районах с 10—15 грозowymi часами в год), опасность и материальный ущерб при их взрыве столь велики, что затраты на сооружение молниезащиты будут вполне оправданы.

Здания и сооружения 2-й категории подлежат обязательной молниезащите от прямых ударов молнии, вторичных ее воздействий и заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации только в местностях со средней грозовой деятельностью 10 и более грозových часов в году.

Мероприятия по молниезащите для сооружений 3-й категории обязательны в местностях на территории СССР, расположенных южнее 65-й параллели со средней грозовой деятельностью 20 и более грозových часов в год и при ожидаемом количестве поражений молнией сооружения в год не менее 0,05.

Молниезащита для наружных установок класса В-Iг должна выполняться при тех же условиях, но без учета количества поражений в год. Здания и сооружения 3-й категории должны быть защищены от прямых ударов молнии и от заноса высоких потенциалов через надзем-



ные проводящие коммуникации (воздушные электрические линии, металлические трубопроводы).

Обоснованием для решения об устройстве или отказе от молниезащиты зданий и сооружений 2-й и 3-й категорий является справка местной метеорологической станции о средней интенсивности грозовой деятельности в месте расположения рассматриваемого объекта.

### **3. ЗАЩИТА ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ**

#### **а) Молниеотводы и их зоны защиты**

Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов различных систем. Любой молниеотвод состоит из трех основных частей: молниеприемника, непосредственно воспринимающего удар молнии; токоотвода (спуска), 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.

Защитное действие молниеотвода основано на свойстве молнии поражать наиболее высокие и хорошо заземленные металлические сооружения. Благодаря этому защищаемое здание, более низкое по высоте, практически не будет поражаться молнией, если всеми своими частями оно будет входить в зону защиты молниеотвода. Зоной защиты молниеотвода называется часть пространства, примыкающая к молниеотводу, обеспечивающая защиту сооружений от прямых ударов молнии с достаточной степенью надежности (99%).

По виду молниеотводы разделяются на стержневые и тросовые, по количеству совместно действующих молниеотводов — на одиночные, двойные и многократные. Кроме того, молниеотводы делятся на отдельно стоящие, изолированные и не изолированные от защищаемого здания. Стержневые молниеотводы изготавливают в виде стержней, возвышающихся над защищаемым сооружением, а тросовые — в виде горизонтальных тросов (проводов), закрепленных на опорах, по каждой из которых прокладывается токоотвод.

Для защиты зданий и сооружений наиболее часто применяют стержневые молниеотводы, в то время как

тросовые молниеотводы используют в основном для защиты длинных и узких сооружений, а также в тех случаях, когда из-за густой сети подземных коммуникаций нельзя установить большое число стержневых молниеотводов. Следует отметить, что стержневые и тросовые молниеотводы обеспечивают одинаковую надежность защиты.

Защитное действие молниеотвода в виде сетки, накладываемой на защищаемое сооружение, аналогично действию обычного молниеотвода. Однако из-за сложности устройства и эксплуатации такого молниеотвода и значительного расхода металла он находит применение только в тех случаях, когда стержневые и тросовые молниеотводы использовать нельзя.

Выбор той или иной системы молниеотвода определяется условиями, обеспечивающими достаточную защиту сооружения и экономию средств, затрачиваемых на сооружение, монтаж и эксплуатацию молниезащиты, а также конструктивными и архитектурными особенностями защищаемого здания.

При разработке конструкции молниезащитных устройств, в частности молниеотводов, прежде всего следует использовать особенности самого защищаемого здания. В качестве молниеприемников и токоотводов можно использовать выступающие металлические конструктивные элементы здания (металлические трубы, парапеты, лестницы), а также высоту самого защищаемого сооружения, устанавливая, когда это возможно, молниеотводы непосредственно на кровле, дымовых и вентиляционных трубах, стенах здания и т. д.

При разработке системы молниезащиты следует также использовать зоны защиты, образуемые близкорасположенными высотными сооружениями, имеющими молниезащиту (дымовые трубы, водонапорные башни и т. д.), или зоны защиты, образуемые высотными наружными технологическими установками (колонны, этажерки и т. д.).

**Одиночный стержневой молниеотвод.** Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h \leq 60$  м [4, 15, 16] представляет собой конус с образующей в виде ломаной линии (рис. 16, а). Основанием конуса является окружность радиусом  $r = 1,5 h$ . Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте  $h_x$  от уровня земли представляет собой круг радиуса  $r_x$ , где  $r_x$  — радиус защиты.

Для графического построения образующей зоны защиты нужно соединить вершину молниеотвода с точкой, расположенной на уровне земли и отстоящей от основания молниеотвода на  $\frac{r}{2} = 0,75h$ , а точку, расположенную на молниеотводе на высоте  $0,8h$ , соединить с точкой на уровне земли, находящейся на расстоянии  $r = 1,5h$  от основания молниеотвода.

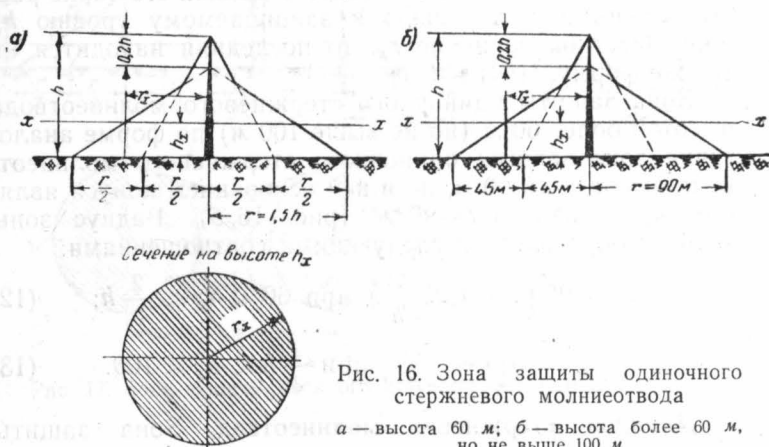


Рис. 16. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

а — высота 60 м; б — высота более 60 м, но не выше 100 м

Радиус зоны защиты определяется следующими соотношениями:

$$r_x = 1,25K_3(h - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (10)$$

$$r_x = 0,625K_3(h - h_x) \text{ при } \frac{2}{3}h \leq h_x \leq h. \quad (11)$$

Для стержневых молниеотводов коэффициент  $K_3 = 1,2$ . По формулам (10 и 11) определяется радиус зоны защиты на защищаемом уровне  $h_x$  в том случае, когда задаются высотой типовых конструкций молниеотводов (например, молниеотводов, принимаемых по нормали Э-898 Гипротяжпромэлектропроекта) или же когда в качестве молниеотводов используют дымовые трубы, высотные металлические колонны технологических наружных установок и т. д.

Формула (10) применяется для случаев, когда здание или сооружение имеет меньшую по сравнению с другими размерами (длиной, шириной) высоту, а формула (11) — для сооружений или установок, у которых высота больше других размеров (трубы, колонны, башни и т. д.), т. е. при отношении  $\frac{h_x}{r_x} \geq 2,67$ .

Если же по каким-либо соображениям необходимо определить высоту молниеотвода в данной его точке расположения по отношению к защищаемому уровню  $h_x$  при известной величине  $r_x$ , то последняя находится из тех же формул (10) и (11).

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой более 60 м (но не выше 100 м) по форме аналогична зоне защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 60 м, но в ней основанием конуса является круг радиуса  $r = 90$  м (рис. 16, б). Радиус зоны защиты определяется следующими соотношениями:

$$r_x = 90 \left( 1 - 1,25 \frac{h_x}{h} \right) \text{ при } 60 \leq h_x \leq \frac{2}{3} h; \quad (12)$$

$$r_x = 45 \left( 1 - \frac{h_x}{h} \right) \text{ при } \frac{2}{3} h \leq h_x \leq 100. \quad (13)$$

**Двойной стержневой молниеотвод.** Зона защиты двойного стержневого молниеотвода, равного или меньшего 60 м, при расстоянии между молниеотводами, равном  $a$ , изображена на рис. 17. Торцовые части зоны защиты определяются как для одиночных молниеотводов. Граница зоны защиты между молниеотводами описывается сверху дугой окружности, проходящей через вершины молниеотводов и определяющей графически наименьшую высоту зоны защиты  $h_0$  посередине между молниеотводами. Очертания зоны защиты в сечении плоскостью по 0—0 (рис. 17) определяются по правилам и формулам, принятым для одиночных стержневых молниеотводов, при этом вместо значений  $h$ ,  $r$  и  $r_x$  вводятся соответственно  $h_0$ ,  $r_0$ ,  $r_{0x}$ . Молниеотвод считается двойным при  $a \leq 5h$  (так как  $h_0 > 0$ ). При  $a > 5h$  молниеотводы следует рассматривать как одиночные.

Наименьшая высота зоны защиты в средней части между молниеотводами при известных  $h$  и  $a$  может быть вычислена по формуле

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 + 0,25a^2}. \quad (14)$$

Высоту молниеотвода можно определить при известных  $h_0$  и  $a$  по формуле

$$h = 0,571h_0 + \sqrt{0,183h_0^2 + 0,0357a^2}. \quad (15)$$

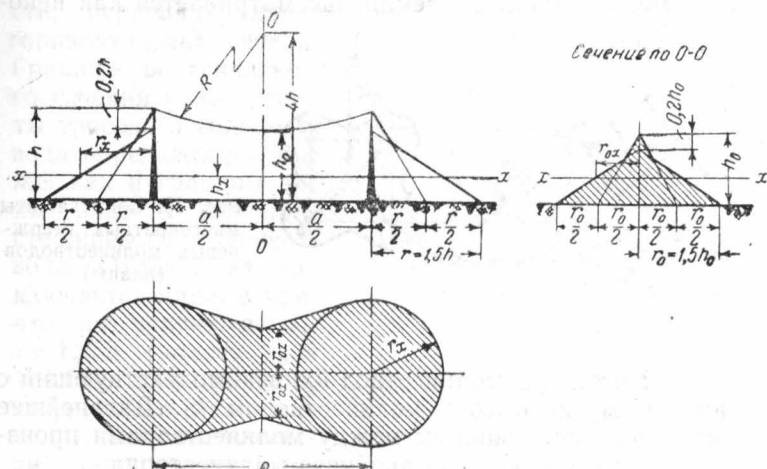


Рис. 17. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

**Двойной стержневой молниеотвод разной высоты.**  
В практике молниезащиты встречаются случаи, когда применяют двойные стержневые молниеотводы разной высоты. Зона защиты такого молниеотвода высотой не более 60 м изображена на рис. 18. Зону защиты для мол-

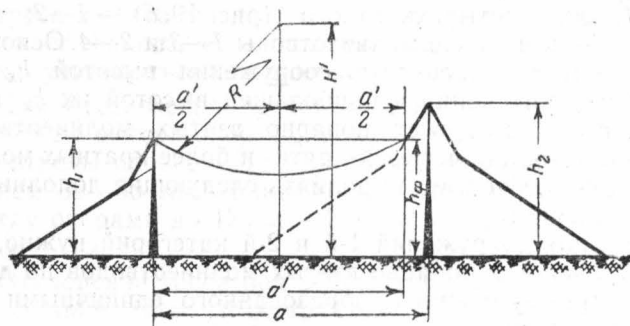


Рис. 18. Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты

ниеотвода большей высоты ( $h_2$ ) строят как для одиночного; через вершину молниеотвода меньшей высоты ( $h_1$ ) проводят горизонтальную прямую. При этом расстояние от точки пересечения этой прямой с зоной защиты большего молниеотвода до земли рассматривается как неко-

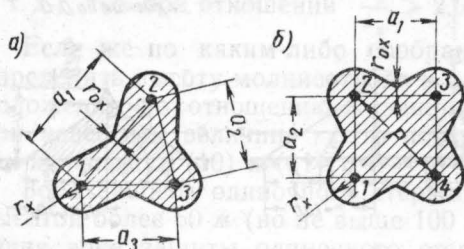


Рис. 19. Зона защиты многократных стержневых молниеотводов (планы)

торый фиктивный молниеотвод  $h_{\phi}$ , взаимодействующий с равным ему по высоте молниеотводом  $h_1$ . Дальнейшее построение зоны защиты между молниеотводами производят так же, как и для двойного молниеотвода.

Таким же образом можно построить зону защиты двух стержневых молниеотводов, один из которых может быть высотой до 100 м (с соответствующей зоной), а другой — до 60 м.

**Многократный стержневой молниеотвод.** Зоны защиты трех- и четырехкратных стержневых молниеотводов определяют с помощью построения, принятого для двуйных молниеотводов. Для трехкратного молниеотвода (рис. 19, а) берут попарно молниеотводы 1—2; 2—3; 3—1; для четырехкратного (рис. 19, б) — 1—2; 2—3; 3—4; 4—1, а также молниеотводы 1—3 и 2—4. Основным условием защищенности сооружения высотой  $h_x$  или группы сооружений с наибольшей высотой их  $h_x$  является  $r_{ox} > 0$  для всех попарно взятых молниеотводов. Кроме того, для четырех-, пяти- и более кратных молниеотводов необходимо выполнять следующие дополнительные условия:

а) для сооружений 1-й и 2-й категорий нужно, чтобы  $h_0 \geq h_x$  для попарно взятых молниеотводов по диагонали многоугольника, образованного единичными молниеотводами;

б) для сооружений 3-й категории достаточно, чтобы  $p \leq 5 h$  (рис. 19, б), где  $p$  — длина диагоналей много-

угольника, образованного единичными молниеотводами.

**Одиночный тросовый молниеотвод.** Зона защиты одиночного тросового молниеотвода высотой  $h \leq 60$  м изображена на рис. 20. Вертикальное сечение в плоскости, перпендикулярной тросу, показано на рис. 20, а, горизонтальное сечение на высоте  $h_x$  — на рис. 20, б.

Границы вертикального сечения зоны защиты тросового молниеотвода определяются так же, как и границы зоны защиты двойного стержневого молниеотвода. Отличие их заключается лишь в том, что на уровне земли  $r = 1,25h$  (вместо  $r_0 = 1,5h_0$ , для двойного стержневого молниеотвода). Ширина площади, защищенной одиночным тросовым молниеотводом на уровне земли ( $h_x = 0$ ), равна  $2 \times 1,25h$ . При расчетах зоны защиты можно пользоваться формулами (10) и (11), приняв коэффициент  $K = 1$ .

Защищаемое здание должно находиться в зоне защиты троса и тогда, когда трос (вследствие нагрева летом) занимает наинизшее положение. Обязательно должно также учитываться отклонение троса ветром.

Для обеспечения расчетной высоты тросового молниеотвода высота опор  $h_{оп}$  должна быть выбрана с учетом стрелы провеса. Последняя для стального троса сечением 35—50 мм<sup>2</sup> может быть принята: для пролетов между опорами до 120 м — 2 м; для пролетов от 120 до 150 м — 3 м.

Отклонение троса под действием ветра от осевой линии здания (при симметричном расположении троса) учитывается тем, что за величину  $r_x$  принимается половина ширины здания с добавлением к ней от 0,5 до 2 м, в зависимости от длины пролета.

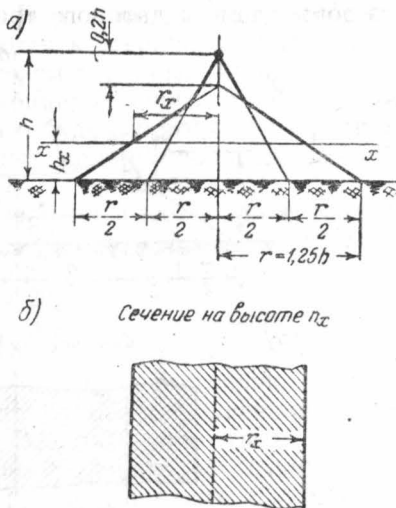


Рис. 20. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода



Таким образом, по заданной величине  $r_x$  и высоте защитного уровня  $h_x$  по формулам (10) и (11) определяется минимальная высота  $h$  расположения троса в месте его максимального провеса. Высота опор тросового молниеотвода  $h_{оп}$  будет складываться из расчетной высоты молниеотвода и принятой величины стрелы провеса троса.

**Двойной тросовый молниеотвод.** Вертикальный разрез зоны защиты двойного тросового молниеотвода вы-

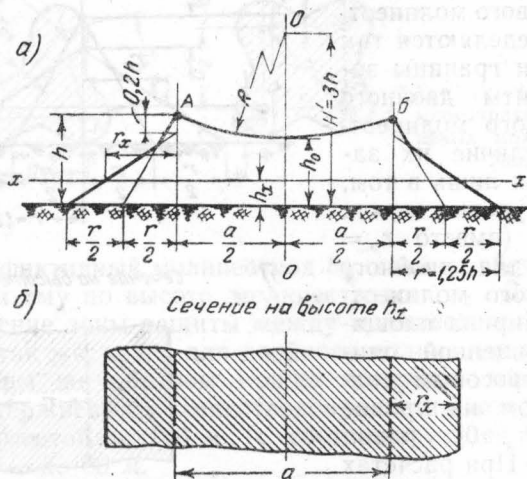


Рис. 21. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

сотой  $h \leq 60$  м показан на рис. 21, а, а горизонтальное сечение в плоскости  $x-x$  дано на рис. 21, б. Средняя часть зоны защиты в вертикальном сечении сверху ограничивается дугой окружности, проходящей через оси тросов А и Б. Эта дуга определяет наименьшую высоту зоны защиты  $h_0$ , которая может быть вычислена по формуле

$$h_0 = 3h - \sqrt{4h^2 + 0,25a^2}. \quad (16)$$

Радиус дуги, образующий верхнюю границу зоны и проходящий через вершины молниеотводов А и Б, равен

$$R = H' - h_0 = 3h - h_0.$$

Минимальную высоту  $h$  при расчете молниеотвода определяют с учетом максимального провеса и отклонения троса под действием ветра.

Два параллельных троса можно рассматривать как двойной тросовый молниеотвод если отношение  $\frac{a}{h} \leq 4$ .

**Комбинированный молниеотвод.** Зона защиты, образованная взаимодействием тросового и стержневых (одиночных или двойных) молниеотводов, определяется так же, как и зона защиты многократного стержневого молниеотвода (см. рис. 19). При этом опоры тросового молниеотвода приравниваются к стержневым молниеотводам высотой  $h$  и расстоянием  $r$ , равным  $1,5 h$ . Отличие в форме зоны защиты комбинированного молниеотвода по сравнению с рис. 19, *а* и *б* будет состоять в очертании внешней части зоны тросового молниеотвода, ширина которой будет равна  $r = 1,25 h$ .

**Номограммы для определения высот молниеотводов.** Для определения высоты молниеотводов и построения их зон защиты можно воспользоваться номограммами, приведенными в [4, 15, 16 и 29].

Высота одиночного стержневого молниеотвода может быть найдена по номограмме рис. 22, *а*. Для этого должны быть заданы:  $h_x$  — высота и  $r_x$  — расстояние (в плане) от оси молниеотвода до наиболее удаленной точки защищаемого сооружения. Высота молниеотвода  $h$  находится пересечением прямой, соединяющей точки заданных значений  $h_x$  и  $r_x$  на крайних шкалах с одной из средних шкал (*I—II*): если  $\frac{h_x}{r_x} \leq 2,67$ , то по шкале *I*, если  $\frac{h_x}{r_x} \geq 2,67$ , то по шкале *II*.

**Пример 1.** Определить высоту одиночного стержневого молниеотвода. Дано  $h_x = 8$  м,  $r_x = 10$  м. При этом  $\frac{h_x}{r_x} = \frac{8}{10} < 2,67$ ; следовательно, значение искомой величины  $h$  нужно взять по шкале *I*. Соединяя прямой заданные значения, получим  $h = 17$  м.

**Пример 2.** Дано  $h_x = 25$  м,  $r_x = 8$  м. При этом  $\frac{h_x}{r_x} = \frac{25}{8} > 2,67$ ; следовательно, значение  $h$  нужно взять по шкале *II*. Соединяя прямой заданные  $h_x$  и  $r_x$ , получим  $h = 36$  м.

Высоту двойного стержневого молниеотвода можно вычислить по двум номограммам (рис. 22, *а* и *б*).

Для этого должны быть заданы:  $h_x$ ,  $r_{ox}$  — расстояние (в плане) от середины прямой, соединяющей молниеотводы, до наиболее удаленной точки защищаемого здания;  $a$  — расстояние между молниеотводами.

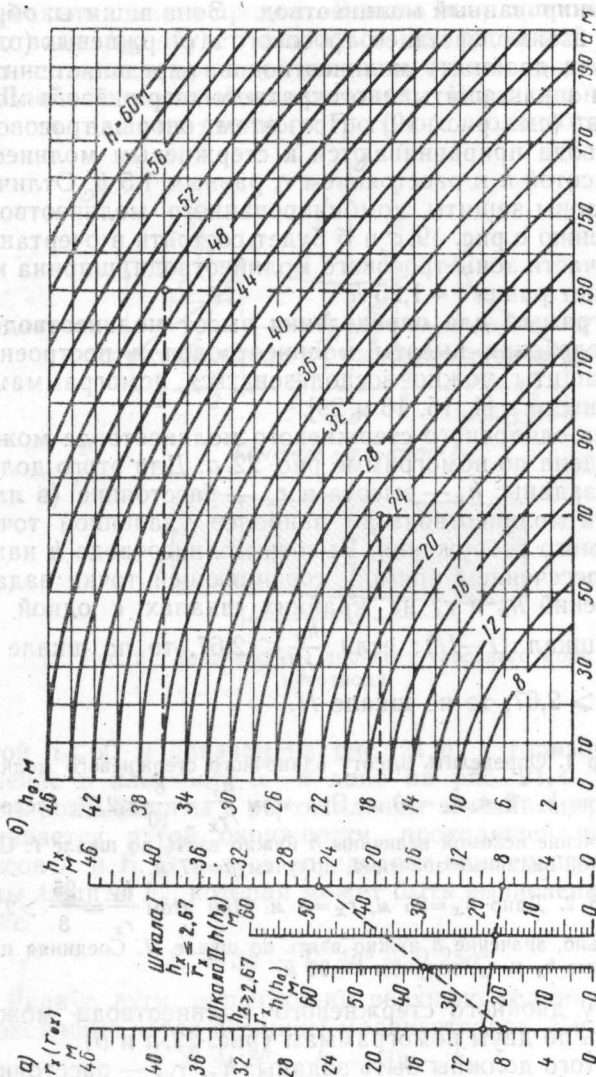


Рис. 22. Номограммы для расчета зон защиты стержневых молниестоводов

$a$  — одиночных;  $b$  — двойных

Для определения высоты двойного стержневого молниеотвода первоначально необходимо найти значение  $h_0$  по номограмме рис. 22, а тем же способом, что и для одиночного, используя  $h_x$  и  $r_{ox}$ , а затем по номограмме рис. 22, б на пересечении полученной величины  $h_0$  и а найти искомую высоту  $h$ .

**Пример 3.** Определить высоту двойного стержневого молниеотвода. Дано  $h_x=8$  м,  $r_{ox}=10$  м,  $a=70$  м. При этом  $\frac{h_x}{r_{ox}} < 2,67$  (шкала I). По номограмме рис. 22, а получим  $h_0=17$  м, а по номограмме рис. 22, б —  $h=24,8$  м.

**Пример 4.** Дано  $h_x=25$  м,  $r_{ox}=8$  м,  $a=130$  м. При этом нужно пользоваться шкалой II (рис. 22, а), так как  $\frac{h_x}{r_{ox}} > 2,67$ . По номограмме рис. 22, а получим  $h_0=h=36$  м, а по номограмме рис. 22, б —  $h=49,5$  м.

## б) Конструктивное выполнение молниеотводов

**Опоры молниеотводов.** В зависимости от требуемой высоты опоры отдельно стоящих молниеотводов могут быть выполнены из стали в виде стоек из труб одного или разного диаметра (телескопические), мачт решетчатой конструкции и т. д. Опоры можно изготавливать из железобетона в виде колонн с сечением любого профиля или из дерева (отдельными столбами или с применением железобетонных пасынков). Молниеотводы рекомендуются выполнять в виде свободно стоящих конструкций без растяжек.

Там, где это возможно, в качестве опор для крепления токоведущих частей молниеотвода должны использоваться конструкции самих защищаемых зданий и сооружений.

Широкое применение при проектировании молниезащиты химических, нефтеперерабатывающих, металлургических и других объектов нашли конструкции молниеотводов, применяемые по нормам Э-898 Тяжпромэлектропроекта, Гипрокаучука, по альбому трубчатых молниеотводов Гипропласта и др.

Металлические опоры необходимо предохранять от коррозии покраской, а древесину опор от гниения пропитывать антисептиками.

**Молниеприемники** стержневых молниеотводов изготавливают из стальных стержней различных величин и форм сечения с защитой от коррозии. Минимальная пло-

щадь сечения молниеприемника, рассчитанного на полный ток молнии, должна быть не менее  $100 \text{ мм}^2$ , чему соответствуют следующие размеры ходовых сортов сталей, идущих на изготовление молниеприемников: круглая сталь диаметром 12 мм; полосовая  $35 \times 3 \text{ мм}$ ; угловая  $20 \times 20 \times 3 \text{ мм}$  или газовые трубы диаметром  $\frac{3}{4} - 1''$ .

Свободный конец трубы необходимо сплющить и заварить.

Молниеприемниками могут служить металлические конструкции защищаемых сооружений: дымовые и другие трубы, дефлекторы, кровля (из листовой стали), сетка и другие конструкции, возвышающиеся над сооружением.

Молниеприемник тросового молниеотвода следует выполнять из стального многопроволочного оцинкованного троса сечением не менее  $35 \text{ мм}^2$  (диаметр 7 мм).

**Токоотводы.** Для устройства токоотводов можно использовать сталь любого профиля (проволоку, полосу, уголок). Многопроволочный стальной трос по условиям коррозии применять не рекомендуется. Минимальное сечение стальных токоотводов должно быть не менее  $35 \text{ мм}^2$  (диаметр 7 мм).

Чтобы защитить стальные токоотводы от коррозии, их обычно оцинковывают, омедняют, освинцовывают, эмалируют (в зависимости от разрушающего характера загрязнений воздуха) или окрашивают масляной краской. Окраска контактных поверхностей недопустима, поэтому контактные поверхности, соединяемые сболчиванием, рекомендуется лудить. Количество соединений в токоотводах следует ограничивать, причем соединения должны быть механически прочными и иметь надежный электрический контакт. Для этого достаточно, чтобы площадь контакта имела величину, не меньшую, чем двойная площадь сечения токоотводов. Между собой токоотводы соединяют, как правило, сваркой.

В качестве токоотводов можно использовать металлические конструкции защищаемых сооружений: колонны, фермы, рамы, пожарные лестницы, стенки резервуаров, арматуры железобетонных элементов и другие конструкции. При применении таких токоотводов необходимо соблюдать условия непрерывной металлической связи в соединениях, которые обычно выполняются сваркой. Нельзя использовать стальную арматуру желе-

зобетона в качестве токоотводов для сооружений 1-й категории.

Токоотводы следует прокладывать снаружи защищаемых сооружений, в малодоступных местах; они должны также хорошо просматриваться с земли. На расстоянии 2—2,5 м над землей и 0,3 м ниже уровня земли токоотводы защищают от механических повреждений уголком или швеллером; защита токоотвода стальной трубой не допускается.

В местах соединения токоотводов с заземлителем для осуществления периодического контроля сопротивления заземлителя устанавливают специальные болтовые разъемы. Они необходимы в тех случаях, когда несколько токоотводов, присоединенных к самостоятельным заземлителям, на крыше металлически связаны между собой (например, при металлической кровле и т. д.).

**Заземляющим устройством** (заземлителем) называется совокупность проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с почвой и служащих для безопасного отвода токов молнии в землю.

По расположению в грунте и форме электродов заземлители подразделяются на:

а) углубленные, стержневые (вертикальные), в виде стальных труб (трубчатые), стержней или уголков, забиваемых в землю;

б) поверхностные, полосовые (горизонтальные), в виде стальных полос (полосовые), уголков или катанки (для упрощенных заземлителей), укладываемых в верхних слоях грунта;

в) сложные, выполняемые в комбинации из первых двух разновидностей заземлителей путем, например, соединения полосой нескольких стержневых электродов в общую систему.

Углубленные заземлители применяют чаще всего при глинистом грунте с наличием грунтовых вод на небольшой глубине. Для углубленных заземлителей может быть использована сталь любого профиля, например круглая сталь диаметром не менее 15—20 мм или угловая сталь с шириной полки не менее 40 мм (рис. 23, а). В качестве углубленных заземлителей (рис. 23, б) рекомендуется применять некондиционные трубы длиной 2—3 м, диаметром 30—60 мм с толщиной стенок не менее 3,5 мм.

Объединение отдельных труб, уголков или стержней углубленных заземлителей в систему производят при помощи стальной полосы шириной  $40 \times 4$  мм либо другими профилями такого же сечения с толщиной стенок не ме-

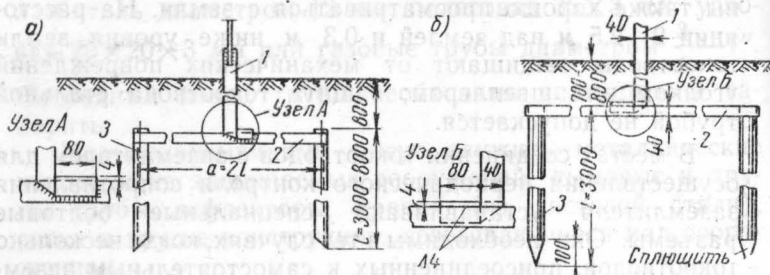


Рис. 23. Углубленные заземлители

*а* — из угловой стали; *б* — из двух труб, соединенных полосой; 1 — токоотвод из полосовой стали; 2 — соединительная полоса; 3 — электроды

нее 4 мм. Электроды таких заземлителей забивают в грунт на расстояние 0,7—0,8 м от верхнего конца стержня до поверхности земли.

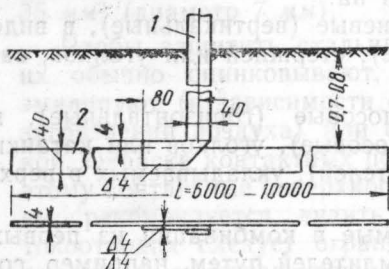


Рис. 24. Заземлитель из полосы

1 — токоотвод из полосовой стали  $40 \times 4$ ;  
2 — заземлитель из полосовой стали  $40 \times 4$

земли (рис. 24) в виде одного горизонтально расположенного луча или пучка лучей, расходящихся из одной точки, которые по концам могут быть объединены общим кольцом.

Для этих заземлителей можно применять и другие виды стального проката сечением не менее  $80 \text{ мм}^2$  и толщиной не менее 4 мм. Для заземлителей молниеотво-

Поверхностные заземлители применяют обычно в местах с постоянно влажными верхними слоями грунта или там, где углубленные заземлители забить трудно. Полосовые заземлители изготовляют из стальных полос шириной 25—40 мм и толщиной не менее 4 мм и укладывают на глубину 0,7—0,8 м от поверхности



дов длина каждого луча от места присоединения токоотвода (ввода тока) не должна превышать 25—30 м. Во всех случаях нужно стремиться к тому, чтобы ввод тока приходился в середину заземляющего устройства.

Выбор конструкции заземляющего устройства обычно определяется требуемой по нормам величиной сопротивления растеканию тока молнии и геологическим составом почвы с учетом соотношений удельных сопротивлений верхних и нижних слоев грунта.

Для заземлителей молниеотводов важной характеристикой является значение сопротивления растеканию тока молнии  $R_{\text{и}}$  (импульсное сопротивление заземлителя). Причем  $R_{\text{и}}$  может весьма существенно отличаться от сопротивления растеканию тока промышленной частоты  $R_{\sim}$ . Эти сопротивления связаны соотношением

$$R_{\text{и}} = R_{\sim} a_{\text{и}}, \quad (17)$$

где  $R_{\text{и}}$  — импульсное сопротивление заземлителя в ом (величина переходного сопротивления между электродами заземлителя и землей при протекании токов молнии, сопровождающемся появлением вокруг электродов заземлителя зон, охваченных искровыми процессами в грунте; сопротивление не поддается измерению общепринятыми методами: измерителем заземления, способом амперметра и вольтметра и др.);

$R_{\sim}$  — сопротивление заземлителя при промышленной частоте в ом (величина переходного сопротивления между электродами заземлителя и землей при протекании тока промышленной частоты измеряется общепринятыми методами);

$a_{\text{и}}$  — импульсный коэффициент, связывающий сопротивление заземлителя при промышленной частоте с его импульсным сопротивлением.

Отличие  $R_{\text{и}}$  от  $R_{\sim}$  определяется особенностями токов молнии: большой крутизной, амплитудой и кратковременностью. Так как при растекании токов молнии плотность их весьма велика, то вблизи поверхности заземлителя напряженность электрического поля достигает пробивной напряженности грунта, образуется зона искрения, как бы увеличивающая диаметр заземлителя.

При этом сопротивление заземлителя уменьшается. Эффект искрообразования тем сильнее, чем выше удельное сопротивление грунта, т.е.  $a_n$  заметно ниже в грунтах с высоким удельным сопротивлением. Это благоприятное явление особенно проявляется у трубчатых (сосредоточенных) заземлителей  $a_n < 1$ , а у поверхностных (протяженных)  $s_n$  может быть и больше единицы.

Сопротивления заземлителей  $R_n$  и  $R_\infty$  могут быть подсчитаны по формулам, приведенным в [4, 5, 6].

На практике для заземлителей молниеотводов расчет импульсного сопротивления может не производиться. Сопротивление заземлителя можно установить по эквивалентной величине сопротивления при токе промышленной частоты  $R_\infty$  в зависимости от удельного сопротивления грунта.

Величины импульсных сопротивлений заземлителей, требуемые в различных случаях, не превзойдут допустимых пределов в том случае, если замеренные сопротивления растеканию токов промышленной частоты этих заземлителей (например, измерителем заземления МС-07 или МС-08) будут соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.

Таблица 3

Пересчет сопротивлений заземлителей с импульсного тока на ток промышленной частоты

Требуемая величина импульсного сопротивления заземлителя по нормам в Ом	Предельно допустимые величины сопротивлений при токе промышленной частоты в Ом в зависимости от удельного сопротивления грунта $\rho$ в Ом см			
	до $10^4$	$10^4$ — $5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$ — $10^5$	более $10^5$
5	5	5—7,5	7,5—10	15
10	10	10—15	15—20	30
20	20	20—30	30—40	60
30	30	30—45	45—60	90
40	40	40—60	60—80	120
50	50	50—75	75—100	150

Если измеренная величина сопротивления заземлителя при токе промышленной частоты превысит величину, требуемую по табл. 3, то для уменьшения его необходимо присоединить дополнительное число электродов.

Заземлители защиты от вторичных воздействий молнии рассчитываются по общеизвестной методике опреде-

ления сопротивлений растеканию тока промышленной частоты [32].

### в) Молниезащита зданий и сооружений 1-й категории

Здания и сооружения 1-й категории высотой до 30 м от прямых ударов молнии защищаются, как правило,

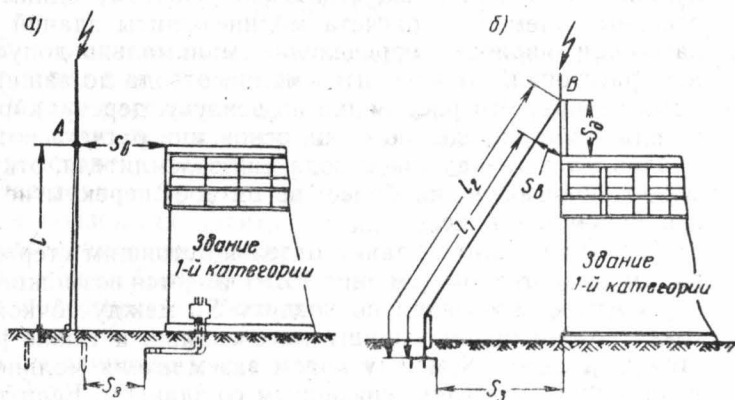


Рис. 25. Расчетные схемы для выбора допустимых расстояний

а — отдельно стоящий молниеотвод; б — молниеотвод на здании, но изолированный от него

при помощи отдельно стоящих или устанавливаемых на самом здании (но изолированно от него) молниеотводов (рис. 25, а и б).

Молниеотводы и их заземлители должны быть изолированы от защищаемых зданий и сооружений, а также от всех наружных надземных и подземных протяженных металлических устройств, вводимых в защищаемые здания и сооружения. К числу таких устройств относятся, например, надземные эстакады трубопроводов, рельсовые пути, подземные коммуникации в виде газо- паро- и водопроводов, защитные заземления электрооборудования или заземления защиты от вторичных воздействий молнии и статического электричества и т. д.

При ударе молнии в молниеотвод высокий потенциал приобретают токоотвод и заземлитель. При этом возникающие разности потенциалов могут оказаться достаточными для пробоя (перекрытия) изоляции между то-

коотводом и частями защищаемого здания или пробоя расстояния в земле между заземлителем молниеотвода и подземными частями здания или металлическими коммуникациями, связанными с защищаемым зданием. Для зданий 1-й категории возможность таких перекрытий и пробоев, приводящих к появлению внутри зданий мощных разрядов, по условиям пожаро- и взрывоопасности должна быть полностью исключена. Поэтому одним из основных элементов расчета молниезащиты зданий 1-й категории является определение минимально допустимых расстояний от элементов молниеотвода до защищаемых зданий. Эти расстояния по воздуху, дереву, кирпичу или земле определяются на основании расчета потенциалов в тех точках токоотвода или заземлителя, откуда может произойти наиболее вероятное перекрытие на защищаемое здание.

В случае защиты здания отдельно стоящим стержневым молниеотводом (см. рис. 25, а) имеется возможность перекрытия расстояния по воздуху  $S_v$  между точкой А токоотвода и краем защищаемого здания, а также расстояния в земле  $S_3$  между краем заземлителя молниеотвода и трубопроводом, связанным со зданием. Если трубопровода нет, то за расчетное расстояние принимают расстояние в земле до фундамента здания.

При установке молниеотвода на деревянной стойке, укрепленной непосредственно на крыше защищаемого здания с применением оттянутого в сторону токоотвода (см. рис. 25, б), имеется возможность перекрытия расстояния между точками А ( $S_v$ ), В ( $S_d$ ) и зданием, а также расстояния в земле  $S_3$  между краем заземлителя и фундаментом здания.

**Допустимые расстояния в земле  $S_3$ .** При прямом ударе молнии на заземлителе молниеотвода возникает потенциал с амплитудой (в кВ):

$$U_3 = I_m R_n, \quad (18)$$

где  $I_m$  — амплитуда тока молнии в кА;  
 $R_n$  — импульсное сопротивление заземлителя в Ом.

На основании экспериментов [30] расчетное значение импульсной прочности грунтов ( $E_3$ ) принимается равным 300 кВ/м, тогда минимальное значение  $S_3$  получается равным

$$S_3 \geq \frac{I_m R_n}{E_3} = \frac{200 R_n}{300} \geq 0,66 R_n. \quad (19)$$

Практически расстояние в земле  $S_3$  до коммуникаций, вводимых в здание, может быть определено по следующим соотношениям [16]:

для стержневых молниеотводов

$$S_3 \geq 0,5R_n; \quad (20)$$

для тросовых молниеотводов

$$S_3 \geq 0,3R_n. \quad (21)$$

В последнем случае учитывается, что ток молнии стекает через два заземлителя.

Однако расстояние  $S_3$  при любых условиях не должно быть меньше 3 м, если даже по формулам (20) и (21) эти расстояния будут получены меньшими.

Расстояния  $S_3$  должны быть выдержаны и для всех видов подземных электрических кабелей, не вводимых в защищаемое сооружение.

$S_3$  может быть принято равным 1 м для металлических подземных трубопроводов, расположенных вблизи заземлителей, но не вводимых в защищаемое здание, если их длина до места ввода в соседние здания не менее 50 м.

Величина импульсного сопротивления заземлителя молниеотвода для каждого отдельно стоящего или изолированного молниеотвода и для каждого токоотвода тросового молниеотвода должна быть не более 10 ом. В грунтах с удельным сопротивлением  $5 \cdot 10^4$  ом см и выше значение  $R_n$  допускается до 40 ом, но при условии соответствующего увеличения  $S_3$ , определяемого по формулам (20) и (21).

**Допустимые расстояния в воздухе и по дереву.** При прямом ударе молнии максимальный потенциал  $U_l$  в любой точке токоотвода (например, в точке А, см. рис. 25, а), расположенной на расстоянии  $l$  от заземлителя, будет составлять в общем случае

$$\left( U_l = I_m R_n + L \frac{di_m}{dt} \right) \kappa \theta, \quad (22)$$

где  $L$  — индуктивность участка токоотвода от заземлителя до рассматриваемой точки. Она может быть выражена как произведение длины  $l$  токоотвода на удельную индуктивность, которая для металлических молниеотводов решетчатой конструкции и отдельно проложенных токо-

отводов составляет в среднем  $L_0 = 1,7 \text{ мкГн/м}$ , т. е.  $L = 1,7 l \text{ мкГн}$ .

**Пример.** Определить величину максимального потенциала в точке А отдельно стоящего молниеотвода (см. рис. 25, а), если  $I_M = 200 \text{ кА}$ ,  $\frac{di_M}{dt} = 60 \text{ кА/мксек}$ ,  $R_H = 10 \text{ Ом}$ , а длина токоотвода  $l = 10 \text{ м}$ .

По формуле (22) будем иметь

$$U_{IA} = 200 \cdot 10 + 1,7 \cdot 10 \cdot 60 = 3020 \text{ кв.}$$

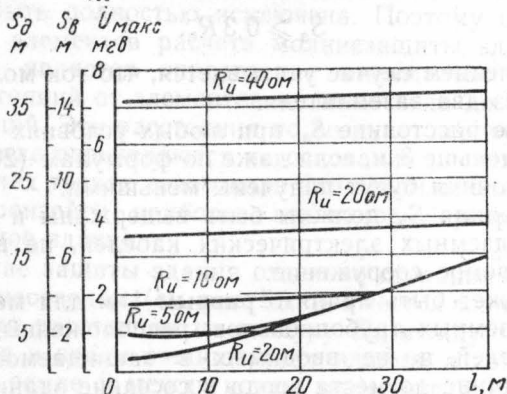


Рис. 26. Максимальный потенциал на вершине одиночного стержневого молниеотвода длиной  $l$  и с импульсным сопротивлением заземлителя  $R_H$

Это очень высокое напряжение. Если защищаемое здание находится слишком близко, то с молниеотвода может произойти перекрытие на здание.

Максимальный потенциал  $U_I$  в различных точках токоотвода отдельно стоящего стержневого молниеотвода или молниеотвода, изолированного от здания деревянной стойкой, в момент протекания по нему тока молнии может быть определен также по кривым рис. 26. Приведенные на этом графике значения максимальных потенциалов соответствуют амплитуде тока молнии 200 кА и крутизне фронта 60 кА/мксек.

Чтобы исключить возможность перекрытия с молниеотвода на защищаемое здание, необходимо соответствующим образом выбрать расстояние  $S_B$  (см. рис. 25, а и б) между молниеотводом и зданием; оно должно быть не менее

$$S_B \geq \frac{U_I}{E_B}, \quad (23)$$

где  $E_b$  — расчетная импульсная прочность воздуха, равная 500 кВ/м.

Если в формулу (23) подставить значения  $U_l$  из формулы (22) и  $E_b$ , то получим

$$(S_b \geq \frac{200R_n + 1,7l \cdot 60}{500} = 0,4R_n + 0,2l) \text{ м.} \quad (24)$$

Расстояние  $S_b$  может быть также определено по кривым на рис. 26. Для случая, когда изоляцией элементов молниеотвода служит дерево, допустимое расстояние по нему (например,  $S_d$  см. на рис. 25, б) должно быть не менее

$$S_d \geq \frac{U_l}{E_d}, \quad (25)$$

где  $E_d$  — расчетная импульсная прочность дерева воздушной сушки, равная 250 кВ/м.

Если в формулу (25) подставить  $U_l$  из формулы (22) и  $E_d$ , то получим

$$(S_d \geq \frac{200R_n + 1,7l \cdot 60}{250} = 0,8R_n + 0,4l) \text{ м.} \quad (26)$$

Расстояние  $S_d$  может быть определено и по кривым на рис. 26.

Защитить высокие сооружения (более 30 м) при помощи отдельно стоящих или изолированных молниеотводов во многих случаях невозможно, поэтому для таких сооружений как исключение допускается защита от прямых ударов молнии при помощи неизолированных молниеотводов, устанавливаемых непосредственно на защищаемом сооружении. В этом случае необходимо соблюдать следующие дополнительные требования:

1) число токоотводов от молниеприемника до заземлителя должно быть не менее 2, располагаемых на расстоянии не менее 15 м друг от друга или по противоположным сторонам здания;

2) каждый токоотвод следует присоединить к отдельному заземлителю с  $R_n$  не более 5 ом. К этим заземлителям, в свою очередь, можно присоединить заземлители защиты от вторичных воздействий молнии, производственных защитных заземлений и различных подземных коммуникаций;

3) по каждому этажу или не более чем через 7—8 м



по высоте сооружения необходимо проложить металлические пояса (полосы) для выравнивания потенциалов на отдельных уровнях; к этим поясам должны быть присоединены все токоотводы, металлические элементы конструкций и оборудование внутри защищаемого сооружения.

Для зданий, имеющих газоотводные трубы и свечи или вентиляционные устройства, через которые происходит выброс взрывоопасных смесей горючих газов, паров или пыли, молниеотводы надо располагать так, чтобы контакт молнии с молниеприемником происходил вне пределов взрывоопасной зоны (см. IV).

### **г) Молниезащита зданий и сооружений 2-й категории**

Защита зданий и сооружений 2-й категории от прямых ударов молнии может быть выполнена стержневыми или тросовыми молниеотводами, отдельно стоящими или установленными непосредственно на защищаемом сооружении. В последнем случае токоотводы прокладывают непосредственно по крыше и стенам защищаемого сооружения и присоединяют к заземлителю с импульсным сопротивлением не более 10 ом.

Такой заземлитель удобно располагать в земле вне здания, по его контуру, на расстоянии 0,8—1 м от фундаментов. К заземлителю защиты от прямых ударов молнии можно присоединять различные металлические подземные коммуникации (трубопроводы, кабели и т. д.).

Заземлители не изолированных от здания молниеотводов необходимо совмещать с заземлителями от вторичных воздействий молнии и объединять с заземлителями защитного заземления электрооборудования. Это требование объясняется тем, что раздельное выполнение заземлителей часто неосуществимо, а иногда может дать отрицательные результаты [31, 32]. Практически трудно гарантировать, чтобы вблизи токоотвода или заземлителя молниеотвода не оказалось металлических конструкций здания, технологического оборудования или электрооборудования, связанных с защитным заземлением и имеющих поэтому низкий потенциал. Токоотводы же при ударе молнии могут иметь высокие потенциалы (сотни киловольт). Вследствие этого могут возникнуть перекрытия с частей молниеотводов на заземленные части, а также перекрытия с металлическими конструкциями и предметами здания на людей. При хорошей связи ча-

стей молниеотвода с конструкциями и оборудованием здания происходит выравнивание потенциалов всего сооружения. Меры по выравниванию потенциалов в таких случаях следует выполнять с такой же тщательностью, как и в рассмотренном уже случае защиты зданий 1-й категории неизолированными молниеотводами.

Если вблизи здания 2-й категории имеются высокие деревья, их можно использовать под опоры молниеотводов. Расстояния между токоотводами отдельно стоящих молниеотводов и частями защищаемого сооружения должны выдерживаться такими же, как и в случае защиты зданий 1-й категории (см. выше). Если эти расстояния окажутся менее требуемых, то против токоотвода необходимо проложить по стенам защищаемого сооружения на всю высоту его стальную полосу (катанку) сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$  и присоединить ее к заземлителю молниеотвода.

Металлическая кровля защищаемого сооружения (здания) может служить молниеприемником, поэтому токоотводы, соединяющие кровлю с заземлителем, нужно прокладывать по углам и не более чем через 25 м по контуру сооружения. Металлические части сооружения, расположенные на крыше (трубы, вентиляционные устройства и т. д.), необходимо присоединять к кровле. Неметаллические части, возвышающиеся над кровлей, должны быть оборудованы дополнительными молниеприемниками, присоединяемыми к металлу кровли.

Для зданий высотой более 20 м и при защите их молниеотводами, установленными посередине неметаллической кровли, чтобы уменьшить электрические потенциалы, вызванные током молнии, необходимо от каждого молниеотвода прокладывать не менее двух токоотводов по одному с противоположных сторон здания. Для зданий шириной 30—40 м с этой целью предпочтительнее устанавливать молниеотводы, закрепленные по наружным стенам у крыши. Кроме того, для подобных зданий высотой более 30 м необходимо по этажам, но не более чем через 7—8 м по высоте, устраивать горизонтальные металлические пояса для выравнивания потенциалов. К этим поясам нужно присоединить все токоотводы, металлические конструкции здания и оборудования, расположенные внутри здания.

Для зданий, имеющих газоотводные трубы и свечи или вентиляционные устройства, через которые происхо-

дит выброс взрывоопасных смесей горючих газов, паров и пыли, как и в случае защиты здания 1-й категории с такими устройствами, молниеотводы необходимо располагать так, чтобы контакт молнии с молниеприемником происходил вне пределов взрывоопасной зоны (см. IV).

#### **д) Молниезащита наружных взрывоопасных установок 3-й категории**

Как уже отмечалось, по степени опасности поражения молнией и по необходимым мероприятиям молниезащиты к 3-й категории отнесены наружные взрывоопасные установки, причисленные по ПУЭ к установкам класса В-Іг.

Защита таких установок от прямых ударов молнии определяется рядом условий и специфических особенностей [16]. Так, например, для металлических наружных установок с горючими жидкостями или взрывоопасными газами (емкостей, газгольдеров и т.д.), не имеющих газоотводных и дыхательных труб, а также для установок, оборудованных огнепреградителями на трубах, защиты от прямых ударов молнии специальными молниеотводами не требуется, если толщина металлического покрытия не меньше 4 мм и избыточное давление в установках не более 1 атм. Это условие действительно как для надземных, так и для заглубленных установок независимо от их объема и конструкции. Защита в этом случае заключается в присоединении их к заземлителям с импульсным сопротивлением не более 50 ом. Число присоединений и соответственно количество заземлителей должны определяться периметром основания установки с таким расчетом, чтобы присоединения располагались на расстоянии не более 30 м и количество их было не менее двух.

Независимо от толщины стали покрытия необходимость устройства специальных молниеприемников отпадает и в том случае, если единичные цельнометаллические установки с горючими жидкостями или взрывоопасными газами имеют объем до 1000 м<sup>3</sup>. Также решается вопрос молниезащиты от прямых ударов молнии и для парков из подобных резервуаров с общей емкостью до 10 000 м<sup>3</sup>, однако газоотводные и дыхательные трубы таких установок должны иметь огнепреградители.

Металлические наружные установки с горючими жид-

костями или взрывоопасными газами (емкости, газгольдеры и т. д.) емкостью более  $1000 \text{ м}^3$ , с покрытием из листовой стали толщиной менее 4 мм вне зависимости от общей емкости парка (базы) должны быть защищены от прямых ударов молнии устанавливаемыми на них молниеотводами. Такие же мероприятия требуются для подобных установок с покрытиями из стали толщиной 4 мм и больше, но с газоотводными и дыхательными трубами, не оборудованными огнепреградителями.

При отсутствии огнепреградителей на газоотводных и дыхательных трубах металлических наружных установок с горючими жидкостями или взрывоопасными газами емкостью свыше  $100 \text{ м}^3$  независимо от толщины стали их покрытия необходимы молниеотводы для предотвращения взрывов газов от молнии<sup>1</sup>. Для этой цели при выбросе горючих паров и газов с удельным весом более или равным удельному весу воздуха и с избыточным давлением не более 0,05 атм должна быть предусмотрена установка конических колпаков на концах газоотводных труб.

Зона взрывоопасности горючих паров и газов принимается при этом не менее 1 м по вертикали (над колпаком) и 2 м по горизонтали (в стороны от среза трубы). При отсутствии конических колпаков на газоотводных трубах следует руководствоваться главой VII-3 §VII-3-6 п. 2 ПУЭ.

Если выброс горючих паров и газов через трубы с коническими колпаками происходит при избыточном давлении до 0,5 атм, то независимо от их удельного веса зона взрывоопасности принимается равной 4 м по вертикали и 8 м по горизонтали от места выброса.

Для промежуточных избыточных давлений выходящих газов от 0,05 до 0,5 атм размеры зоны взрывоопасности должны определяться пропорционально.

Газоотводные трубы большой высоты могут быть использованы в качестве опор и токоотводов для закрепления на них молниеприемников. В этом случае места стыков отдельных элементов трубы должны быть выполнены сваркой или оборудованы стальными перемычками сечением не менее  $100 \text{ мм}^2$ . Основания таких труб нужно

---

<sup>1</sup> Молниезащиту зданий и сооружений с учетом зон взрывоопасности см. IV.

присоединять к заземлителям с импульсным сопротивлением не более 20 *ом*.

#### 4. ЗАЩИТА ОТ ВТОРИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЛНИИ

Защите от вторичных воздействий молнии подлежат здания и сооружения 1-й и 2-й категорий. Требования к защите от вторичных воздействий молнии сочетаются, как правило, с требованиями к защите от разрядов статического электричества.

Общим наиболее простым и в большинстве случаев удовлетворительным решением по борьбе с опасностью вторичных воздействий молнии и разрядов статического электричества является заземление всей металлической аппаратуры, резервуаров, газгольдеров, продуктопроводов, сливно-наливных устройств и т. д., расположенных как внутри зданий, так и вне их и предназначенных для переработки, хранения или транспортирования ЛВЖ, горючих газов и пыли.

Если сооружение защищают от вторичных воздействий молнии и статического электричества, то величина сопротивления заземлителя при токе промышленной частоты выбирается как для защиты от вторичных проявлений молнии.

Последовательного включения заземляемых предметов в одну цепь не допускается: все установленные аппараты и агрегаты должны иметь самостоятельные заземлители или присоединяться к общей системе заземления при помощи отдельного ответвления.

**Защита зданий 1-й категории.** Для защиты от электростатической индукции все металлическое оборудование и аппаратуру защищаемого сооружения необходимо присоединить к заземлителю защиты от вторичных воздействий молнии с сопротивлением растеканию тока промышленной частоты 10 *ом*.

В ряде случаев защита от электростатической индукции осуществляется при помощи сетки из стальной проволоки диаметром 6—8 *мм* со сторонами ячеек 8—10 *м*. Сетку накладывают на кровлю здания и обязательно присоединяют к заземлителю защиты от вторичных воздействий молнии.

При наличии на защищаемом сооружении металлической кровли достаточно присоединить ее к заземлителю защиты от вторичных воздействий молнии. Токоотводы от сетки или металлической кровли к заземлителю

прокладывают по стенам; расстояние между токоотводами должно быть не более 20 м по контуру сооружения.

Защита будет эффективна и в том случае, если в период строительства стальную арматуру железобетонного сооружения (плиты покрытия, фермы, балки, колонны) сварить между собой. В этом случае достаточно присоединить к заземлителю арматуру колонн у основания.

Для защиты от электромагнитной индукции между трубопроводами и другими протяженными металлическими предметами (каркасом сооружения, оболочками кабеля и т. д.) в местах их взаимного сближения (на 10 см и меньше) через каждые 20 м длины нужно установить металлические перемычки, чтобы исключить возможность образования незамкнутых контуров.

В местах соединений трубопроводов и других протяженных металлических предметов, расположенных в защищаемом сооружении, необходимо обеспечить контакт с величиной переходного электрического сопротивления не более 0,03 ом на один контакт [16]. При фланцевых соединениях труб такая величина сопротивления достигается нормальной затяжкой болтов при наличии на фланце не менее шести болтов (см. также II, 4).

Заземлитель защиты от вторичных воздействий молнии целесообразно выполнять по контуру защищаемого сооружения, располагая его снаружи на расстоянии 0,8—1 м от фундамента. При такой конструкции заземлителя его сопротивление не нормируется. При устройстве раздельных заземлителей (в виде отдельных очагов) их общее сопротивление растеканию тока промышленной частоты должно быть не более 10 ом.

К заземлителю защиты от вторичных воздействий молнии допускается присоединение всех подземных металлических коммуникаций (водопровода, канализации и т. д.) и защитного заземления электрооборудования. Для удобства присоединения оборудования к такому заземлителю внутри здания по стенам может быть проложен металлический контур, соединяемый с основным заземлителем в небольшом числе мест.

Расстояние между заземлителем от прямых ударов молнии и заземлителем защиты от вторичных воздействий ее должно определяться по формулам (20) и (21).

**Защита зданий 2-й категории.** Для зданий 2-й категории специальных мер защиты от электростатической индукции не требуется. Эту роль выполняет защитное за-



земление электрооборудования, к которому необходимо присоединять металлические корпуса всех установок и аппаратов. Все подземные металлические коммуникации, вводимые в защищаемое сооружение, у мест их ввода должны присоединяться к этому заземлителю.

Защита от электромагнитной индукции сводится к устройству металлических перемычек через каждые 25—30 м в местах сближения (на расстоянии не более 10 см) трубопроводов или других металлических протяженных предметов.

Устройства перемычек в местах соединений (например, во фланцах) трубопроводов и других протяженных конструкций не требуется.

## **5. ЗАЩИТА ЗДАНИЙ ОТ ЗАНОСА ВЫСОКОГО ПОТЕНЦИАЛА**

**Здания 1-й категории.** Ввод воздушных линий любого назначения в здания 1-й категории не допускается, вместо них должны применяться подземные кабельные линии. При этом оболочки и броня кабелей, вводимых в здания, необходимо присоединять к заземлителю защиты от вторичных воздействий молнии. Расстояние в земле  $S_z$  от кабелей до заземлителей молниеотводов должно устанавливаться по формулам (20) и (21).

К защищаемому сооружению можно подводить трубопроводы на эстакадах только от соседних, близкорасположенных сооружений одного и того же объекта. В этом случае вся трасса эстакады должна вписываться в зону защиты ближайших сооружений, снабженных защитой от прямых ударов молнии или специально установленными молниеотводами.

У ввода в здание эстакадные трубопроводы присоединяют к заземлителю защиты от вторичных воздействий и к специальным заземлителям с величиной сопротивления при токах промышленной частоты для ближайшей к сооружению опоры 5 ом, для последующей опоры 10 ом.

**Здания 2-й категории.** Ввод воздушных линий любого назначения непосредственно в сооружение не допускается. Металлическую броню и оболочки кабелей необходимо присоединять у ввода в сооружение к защитному заземлению электрооборудования.

Ввод воздушных линий в сооружение возможен только при помощи кабельного перехода длиной в земле не менее 50 м. В этом случае в месте перехода воздушной



линии в кабель металлическая оболочка и броня кабеля, а также штыри изоляторов линии должны присоединяться к специальному заземлению с импульсным сопротивлением не более 10 ом.

Кроме того, в этих местах между жилами кабеля и его металлической оболочкой требуется установить закрытый воздушный искровой промежуток с межэлектродным расстоянием в 2—3 мм или низковольтный вентильный разрядник.

Штыри изоляторов на опоре воздушной линии, следующей от места перехода линии в кабель, присоединяют к специальному заземлителю с импульсным сопротивлением не более 20 ом.

Эстакадные трубопроводы на вводе в сооружение и у ближайшей к сооружению опоры следует присоединить к заземлителю с импульсным сопротивлением не более 10 ом или к заземлителю молниеотвода.

Вдоль трассы, в пределах территории объекта, на расстоянии не более 50 м трубопроводы присоединяют к заземлителю с импульсным сопротивлением не более 20 ом.

Вне территории объекта трубопроводы следует соединять через каждые 250—300 м по длине трассы с заземлителем при импульсном сопротивлении не более 40 ом.

## **6. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ РАЗНЫХ КАТЕГОРИЙ**

Современные химические, нефтегазоперерабатывающие и другие предприятия отличаются весьма важными с точки зрения устройства молниезащиты особенностями. Широко, например, практикуется объединение в одном сооружении ряда технологически связанных между собой взрывоопасных и невзрывоопасных производств, а также взрывоопасных помещений со вспомогательными невзрывоопасными помещениями: цеховыми мастерскими, вентиляционными камерами приточной вентиляции, электропомещениями и т. д. Большое распространение получил вынос технологического оборудования, в том числе высоких металлических колонн, и установка его на открытом воздухе. Сооружаются эстакады большой протяженности для трубопроводов с металлическими или железобетонными опорами (стойками).

При выполнении молниезащиты в таких случаях следует учитывать как категории зданий и установок, так и строительно-архитектурные формы отдельных частей, высоту зданий и сооружений.

На практике здания 1-й и 2-й категории часто примыкают к зданиям 3-й категории или взрывоопасные помещения с признаками 1-й и 2-й категории располагаются в составе зданий 3-й категории. Могут быть и другие сочетания зданий разных категорий. Молниезащита всего комплекса в таких случаях должна определяться соотношением между взрывоопасной и невзрывоопасной частями здания, их масштабами, взаимным расположением, связью или изолированностью и т. д.

Если преобладает взрывоопасная часть здания, например с признаками 1-й категории, и между этой и невзрывоопасными частями здания существует связь в виде металлических коммуникаций и они не разделяются капитальными несгораемыми стенами, то все здание защищается от прямых ударов и вторичных воздействий молнии в соответствии с требованиями для зданий 1-й категории. Такой же вариант защиты необходимо иметь в виду и в случае, если взрывоопасные процессы с признаками 1-й категории будут расположены в разных местах больших зданий и между ними будет существовать связь в виде различного рода коммуникаций.

Если же часть здания с признаками 1-й категории сосредоточена в одном месте и отделена от невзрывоопасной части капитальными несгораемыми стенками, то молниезащита здания может производиться комбинированно. Взрывоопасную часть здания следует защищать отдельно стоящими или изолированно устанавливаемыми на здании молниеотводами; невзрывоопасную часть здания можно защищать молниеотводами, располагаемыми непосредственно на этой части здания, при этом необходимо максимально удалять молниеотводы от взрывоопасной части. Импульсное сопротивление заземлителей этих молниеотводов следует принимать 5 Ом. Неизолированные молниеотводы не должны иметь прямого металлического соединения с металлическими конструкциями или трубопроводами, связанными с взрывоопасной частью здания. Чтобы исключить занос высокого потенциала при возможных перекрытиях с элементов неизолированных молниеотводов на металлические конструкции здания или коммуникации, имеющие связь со

взрывоопасной частью здания, необходимо все металлические конструкции в невзрывоопасной части здания заземлить в нескольких местах ( $R_{\text{и}} = 5 \text{ ом}$ ). Тип и расположение этих заземлителей выбираются с учетом особенностей размещения оборудования.

При наличии в здании частей с признаками 2-й и 3-й категории защита всего здания осуществляется по требованиям 2-й категории. Исключение составляют случаи, когда взрывоопасная и невзрывоопасная части здания не имеют металлических проводящих связей и занос потенциала во взрывоопасную часть исключен. В этом случае защита от вторичных воздействий молнии выполняется лишь во взрывоопасной части здания.

Для сооружений, совмещающих помещения 1-й и 2-й категорий, молниезащитные мероприятия определяются соотношением объемов помещений той и другой категории. Если объем помещения 1-й категории составляет менее 30 % объема сооружения, то молниезащита для всего сооружения должна быть как для зданий 2-й категории, но при этом необходимо выполнять дополнительные требования для помещений 1-й категории:

а) все подземные и надземные внутрицеховые металлические коммуникации у ввода в помещения 1-й категории из 2-й категории должны быть присоединены к специальному заземлителю, расположенному внутри цеха, с сопротивлением при токе промышленной частоты не более 10 ом; этот заземлитель, в свою очередь, может быть соединен с другими имеющимися заземлителями, чтобы уменьшить общее сопротивление растеканию;

б) металлические пояса по высоте помещений устраивать так же, как и в случае защиты зданий 1-й категории (см. выше);

в) перемычки между протяженными металлическими коммуникациями устраивать внутри помещений, как в случае защиты зданий 1-й категории (см. выше);

г) защиту от заноса высоких электрических потенциалов устраивать в соответствии с п. 5.

В качестве естественных молниеотводов для комплексной молниезащиты зданий и сооружений разных категорий следует широко использовать высотные технологические аппараты, колонны и т. д. (см. II, 1).

Целесообразно использовать также для целей комплексной молниезащиты различного рода трубы, выступающие над крышами зданий или отдельно стоящие и

служащие для выброса невзрывоопасных газов и паров (дымовых, агрессивных и др.), которые необходимо заземлять.

Для кирпичных или железобетонных труб тоже предусматриваются молниеотводы, причем во всех случаях их можно рекомендовать в качестве молниеотводов для защиты рядом расположенных сооружений всех классов и наружных технологических аппаратов, а также для защиты зданий, над которыми они выступают.

## 7. ПРИМЕРЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Молниезащита здания газгольдерной.** Здание газгольдерной представляет собой круглое сооружение с небольшой пристройкой. По степени опасности пораже-

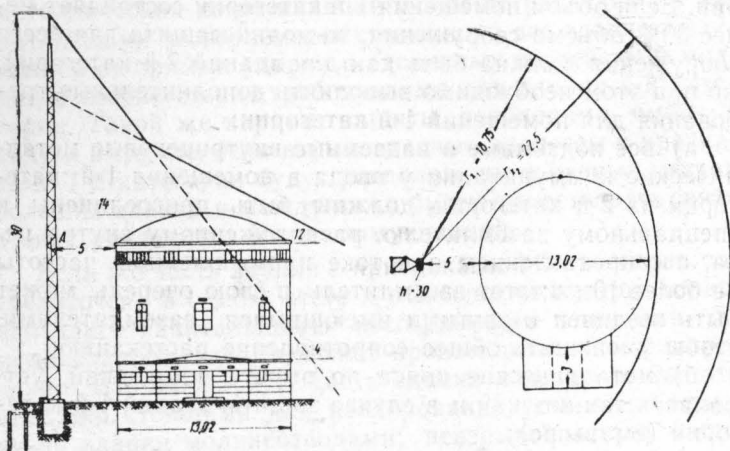


Рис. 27. Молниезащита здания газгольдерной

ния молнией оно относится к зданиям 2-й категории, поэтому подлежит защите как от прямых ударов молнии, так и от вторичных ее воздействий.

Защиту от прямых ударов молнии целесообразно осуществить отдельно стоящим молниеотводом высотой ( $h$ ), равной 30 м, типовой конструкции, установленным на расстоянии, исключающем перекрытие с молниеотвода (точка  $A$ ) на защищаемое здание (рис. 27). По кривой рис. 26 расстояние от молниеотвода до здания на высо-

те ( $h_x = 12 \text{ м}$ ; при сопротивлении заземлителя  $R_n = 10 \text{ ом}$  должно быть около 4 м, но для удобства проезда транспорта это расстояние принимаем равным 5 м.

Расчет зон защиты молниеотвода на разных уровнях приведен в табл. 4.

Таблица 4

Основные расчетные данные

Высота молниеотвода $h$ в м	Высота защищаемого уровня $h_x$ в м	Активная высота молниеотвода $h_a = h - h_x$ в м	Радиус зоны защиты $r_x$ в м
30	14	16	18,75
30	12	18	22,5
30	4	26	37,5

В качестве заземлителя молниеотвода обычно используют четыре стержня из угловой стали  $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$ , длиной 3 м, соединенные стальной полосой  $40 \times 4 \text{ мм}$ . Такая конструкция в грунте с  $\rho = 10^4 \text{ ом см}$  обеспечивает импульсное сопротивление заземлителя  $R_n = 10 \text{ ом}$ .

Для защиты от вторичных воздействий молнии заземляются газгольдер и все другие металлические предметы внутри здания.

**Молниезащита наружной взрывоопасной установки и здания насосной.** Наружная взрывоопасная установка одного из цехов химического комбината представляет собой вертикальную этажерку 1, состоящую из металлических конструкций, с расположенными на ней технологическими аппаратами (рис. 28). Рядом с установкой расположено здание насосной станции 2. Установка имеет газоотводную трубу 3, достигающую по высоте отметки 43,7 м.

Здание насосной станции по условиям технологического процесса и опасности поражения молнией относится к сооружениям 2-й категории, а наружная установка — к сооружениям 3-й категории.

Так как наружная установка не вписывается в зону защиты дымовой трубы 4, то ее защиту от прямых ударов молнии целесообразно производить двумя молниеприемниками (№ 1 и 2) типа ЖМ-17 (принимая их по нормам Э-898), укрепляемыми к площадке по отметке 35,5 и 39,7 м. Молниеприемники располагают от газоотводной трубы 3 на расстоянии 10 м с таким превыше-

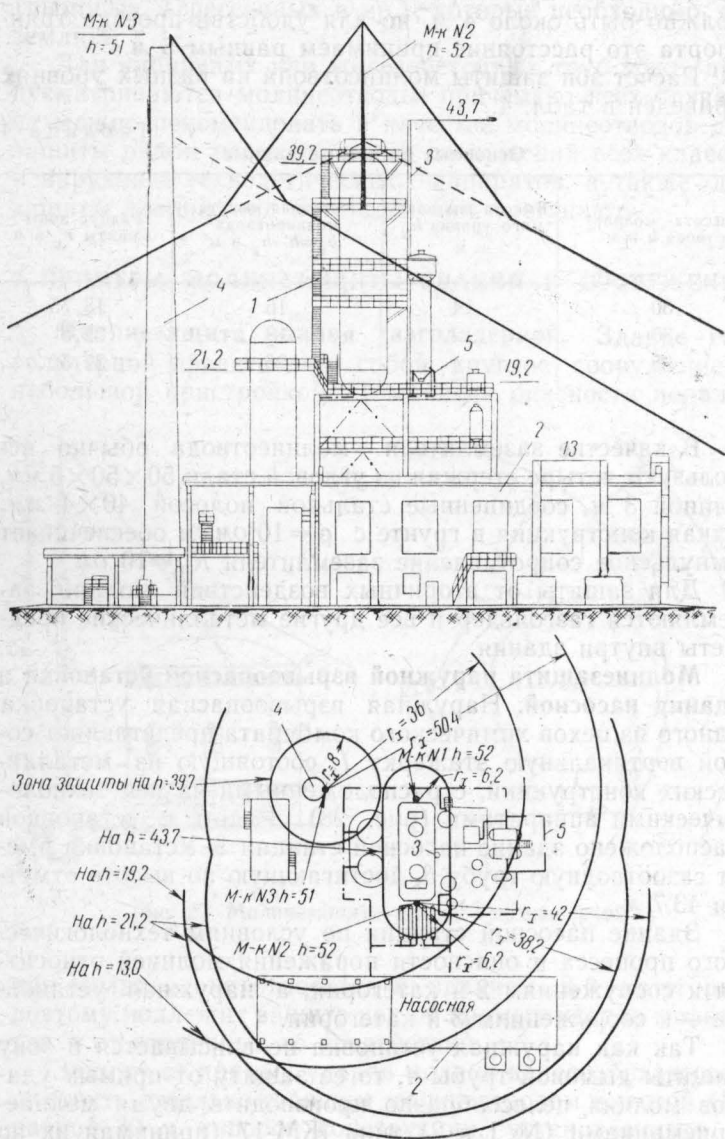


Рис. 28. Молниезащита цеха химического комбината



нием над ней, при котором труба и зона взрывоопасности около нее вписываются в зону защиты. В качестве токоотводов используют металлические конструкции этажерки, которые в нескольких точках присоединяются к специальному контуру заземления 5 с  $R_{\text{н}} \leq 10 \text{ ом}$ . Вертикальные электроды заземления выполнены из угловой стали  $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$ , длиной 2,5 м, и соединены полосовой сталью  $40 \times 4 \text{ мм}$ .

Здание насосной защищается молниеотводами дымовой трубы и молниеотводами наружной установки. Для упрощения чертежа на рис. 28 зоны защиты молниеотводов № 1, 2 и 3 показаны отдельно. Расчет зон защиты на разных уровнях приведен в табл. 5.

Таблица 5

Основные расчетные данные зон защиты

№ молниеприемников	Высота молниеприемника $h$ в м	Высота защищаемого уровня $h_x$ в м	Активная высота $h_a = h - h_x$ в м	Радиус зоны защиты $r_x = 1,25 K(h - 1,25 h_x)$ ; $0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h$ ; $K=1,2$	Радиус зоны защиты $r_x = 0,625 K(h - h_x)$ ; $\frac{2}{3}h \leq h_x \leq h$ ; $K=1,2$	Расстояние между молниеприемниками $a$ в м	Ширина защитного уровня $r_{\text{ох}}$ в м	Высота защитного уровня $h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 + 0,25a^2}$	Тип и высота молниеприемника
1—2	52	43,7	8,3	—	6,2	18	6	51,7	ЖМ-17
1—2	52	21,2	30,8	38,2	—	—	—	—	ЖМ-17
1—2	52	19,2	32,8	42	—	—	—	—	ЖМ-17

Внутренний контур заземления насосной, используемый в качестве защитного для заземления электрооборудования, защиты от вторичных воздействий молнии и проявлений статического электричества, подсоединяют к внешнему контуру заземления (см. рис. 28).

#### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН ВЗРЫВООПАСНОСТИ И ВОПРОСЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

##### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Многие здания, сооружения и наружные установки химических, нефтеперерабатывающих и некоторых других предприятий, хранилищ и складов нефтепродуктов



и горючих газов имеют устройства постоянного или периодического выброса в окружающее пространство горючих газов и паров жидкостей.

Технологические выбросы горючих газов и паров, связанные с нормальным или аварийным режимом работы аппаратов и установок, происходят через постоянно или периодически действующие воздушники, свечи, газоотводные трубы, по специальным аварийным стравливающим линиям, а также через дыхательные и предохранительные клапаны и т. д. Значительное количество выбросов горючих газов и паров производится локальными и общеобменными механическими и естественными вентиляционными системами зданий. На отдельных объектах химической промышленности насчитывается до нескольких сотен штук воздушшек.

Перечисленные устройства располагаются, как правило, на зданиях, наружных установках, рабочих площадках и этажерках, а также в виде отдельно стоящих труб — свечей высотой более 30 м. Через эти устройства и выбрасываются различные горючие газы и пары жидкостей.

Большие потери наблюдаются от испарения нефтепродуктов с высокой упругостью паров и сырой нефти при их хранении и различных операциях, связанных с загрузкой и разгрузкой емкостей.

Во многих случаях горючие продукты (газы и пары) выбрасываются либо в чистом виде, особенно при аварийных стравливаниях из аппаратов, либо в смеси с воздухом в границах концентрационных пределов взрыва (при выбросе газо- и паровоздушных смесей из дыхательных труб, воздушшек и т. д.). Поэтому в определенном пространстве около таких устройств выброса могут создаваться зоны взрывоопасности.

Непосредственный контакт канала молнии или нагретых до высокой температуры током молнии частей молниезащитных устройств с этой зоной может привести к воспламенению, взрыву и разрушениям (см. выше, II, 5). Отсюда вопросы молниезащиты взрывоопасных зданий и наружных установок должны решаться с учетом возможных зон взрывоопасности, которые будут влиять на выбор схемы и типа молниезащитного устройства, мест расположения молниеотводов, необходимого удаления и превышения зон защиты молниеотводов над устройством выброса.

В практике проектирования молниезащиты встречались случаи, когда наличие большого количества газоотводных труб, вентиляционных устройств и т. д. вызывало необходимость отказа от защиты зданий 2-й категории молниеотводами, располагаемыми на здании, и приводило к защите при помощи отдельно стоящих молниеотводов.

Трудности, возникающие при решении вопросов молниезащиты с учетом зон взрывоопасности, объясняются, с одной стороны, весьма противоречивыми указаниями в литературных и нормативных источниках, а с другой стороны, отсутствием каких-либо исследований распределения взрывоопасных концентраций и зон взрывоопасности [4, 15, 33].

Все это приводит либо к усложнению и чрезмерному удорожанию молниезащитных устройств, либо к применению недостаточно надежного и безопасного варианта молниезащиты.

В связи с этим автором было исследовано распределение взрывоопасных концентраций и зон взрывоопасности горючих смесей при непрерывном выбросе их в атмосферу.

При решении практических задач процессов атмосферной диффузии часто применяется теория Сэттона [34]. Так, по Сэттону, для случая изотропной турбулентности определение приземной объемной концентрации от помещенного на высоте  $h$  точечного источника на расстоянии  $x$  в направлении по ветру и на расстоянии  $y$  в направлении поперек ветра можно произвести по формуле

$$\chi(x, y) = \frac{2Q}{\pi C^2 \bar{u} x^{2-n}} \exp\left(-\frac{y^2 + h^2}{C^2 x^{2-n}}\right), \quad (27)$$

где  $\chi(x, y)$  — приземная объемная концентрация от помещенного на высоте  $h$  точечного источника в г/м<sup>3</sup> или мг/л;

$Q$  — удельный расход паров или газов в г/сек, удваиваемый за счет отражения от земли;

$C$  — обобщенный коэффициент диффузии в м<sup>n/2</sup> (для изотропной турбулентности  $C = C_x = C_y = C_z$  определяется из опыта на основании экспериментальных данных);

$\bar{u}$  — средняя скорость ветра в м/сек;

$y$  — расстояние от оси струи в направлении поперек ветра в  $m$ ;

$h$  — высота точечного источника над поверхностью земли в  $m$ ;

$n$  — безразмерный параметр, связанный с устойчивостью атмосферы, или показатель турбулентности. Величина этого параметра изменяется в пределах от 0 до 1 (в условиях очень турбулентной атмосферы  $n$  приближается к нулю, а в условиях слабой турбулентности  $n$  стремится к своему верхнему пределу, равному 1). При условиях, соответствующих малым градиентам температуры по вертикали, величина  $n$  в среднем равна 0,25 [34].

В нашу задачу входило исследование не приземной концентрации, а распределения концентраций на уровне точки выброса паров и газов по оси их струи в направлении по ветру. Поэтому, принимая  $y=0$  и  $h=0$ , а также заменяя значения  $\chi = G$ ,  $\chi = S$ , преобразуем формулу (27) в следующую:

$$G_{(S)} = \frac{Q}{\pi C^2 u S^{2-n}}. \quad (28)$$

Однако для получения концентрации по формуле (28) необходимо определить значения коэффициентов  $C^2$  и  $n$ . Если, как уже указывалось, коэффициент  $n$  можно принять равным 0,25, то значение коэффициента  $C^2$  можно определить только на основании данных экспериментального исследования распределения концентраций в реальных условиях выброса горючих паров и газов в атмосферу.

Поэтому при решении вопросов о зонах взрывоопасности горючих паров и газов большое внимание было уделено экспериментальным исследованиям распределения их концентраций, причем эксперименты проводили в реальных условиях выброса горючих смесей в атмосферу на действующих промышленных объектах.

Исследования зон взрывоопасности проводили при выбросе горючих паров и газов из дыхательных и предохранительных клапанов резервуаров с ЛВЖ, отдельно стоящих свечей, газоотводных и продувочных труб, вентиляционных шахт и коробов и т. д. Таким образом, экспериментами были охвачены наиболее характерные и

часто встречающиеся устройства для выброса горючих смесей в атмосферу.

Чтобы определить влияние на процесс распределения концентраций паров и газов различных конструктивных оформлений концов газоотводных труб, опыты проводили при свободном выбросе струи по вертикали, а также при наличии на концах труб защитных колпаков и изогнутых концов труб под углом  $90-120^\circ$ , препятствующих выбросу.

Влияние удельного веса выбрасываемых паров и газов на процесс распределения концентраций учитывалось тем, что опыты проводили при выбросе веществ как тяжелее воздуха (бензин, псевдобутилен, стирол), так и легче его (водород, природный газ) при разных значениях избыточных давлений. При опытах учитывалось также и влияние на зоны взрывоопасности метеорологических условий (главным образом, скорости ветра).

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПРИ ХРАНЕНИИ ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ**

Исследование зон взрывоопасности легковоспламеняющихся жидкостей проводилось при выделении паров бензина через дыхательные и предохранительные клапаны и открытые замерные люки наземных вертикальных резервуаров типа РВС-5000. Это объясняется тем, что бензин является весьма распространенной легковоспламеняющейся жидкостью, а хранение его связано со значительной пожаро- и взрывоопасностью.

Из существующих методов определения концентраций паров и газов в воздухе за основу был принят экспрессный способ с использованием специального газоанализатора типа ПГФ2М-ИЗГ «Эфир», градуированного на бензины.

Концентрации паров бензина определяли как по горизонтали, так и по вертикали через каждые 0,5 м от места их выделения в точках, указанных на рис. 29, причем в каждой точке производили не менее пяти замеров.

Эксперименты проводили при наиболее благоприятных для образования зон взрывоопасности режимах работы резервуаров и метеорологических условиях. Например, концентрации по вертикали в точках 16—86 (рис. 29) измеряли при скорости ветра порядка 0,2 м/сек; измере-

ния же концентраций в горизонтальных направлениях в точках 1—11 и 1а—7а проводили при скорости ветра до 2 м/сек.

На резервуаре были установлены три дыхательных клапана типа ДК-200 и три предохранительных клапана

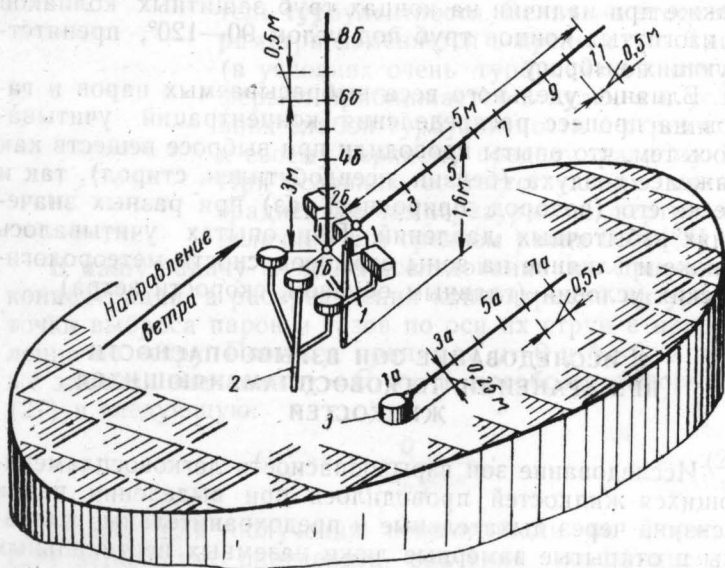


Рис. 29. Схема расположения экспериментальных точек по замеру концентраций паров бензина

1 — дыхательный клапан; 2 — предохранительный гидравлический клапан; 3 — замерный люк

типа ПКС-200. Производительность насоса, работавшего на заполнение резервуара, была равна  $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Зоны взрывоопасности определялись для автомобильных бензинов марок А-66 и А-72, у которых наименее значительны нижние концентрационные пределы взрыва (НПВ). По результатам измерений были построены графики зависимости средних значений концентраций паров бензина  $G$  от расстояния ( $S$  или  $h$ ) до места выхода (выброса), т. е.  $\bar{G}=f(S)$  по горизонтали (рис. 30, а и б, кривые 1) и  $\bar{G}=f(h)$  по вертикали (рис. 30, в, кривая 1).

Полученные экспериментальные кривые распределе-

ния концентраций паров бензина хорошо аппроксимируются следующими эмпирическими формулами:

$$\bar{G}_{(S)} \text{ расч} = 10S^{-0,9} \text{ мг/л} \quad (29)$$

— для случая распределения концентраций паров бензина по горизонтали (см. рис. 29, точки 1—11) при выбросе их из дыхательного и предохранительного клапанов резервуара;

$$G_{(h)} \text{ расч} = 6,2h^{-1,6} \text{ мг/л}, \quad (30)$$

— для случая распределения концентраций паров бензина по вертикали над клапанами (см. рис. 29, точки 16—86).

Концентрации паров бензина, определяемые по графикам или формулам (29) и (30), соответствуют доверительной вероятности  $\alpha = 0,5$ . Но так как вопрос о зонах взрывоопасности связан с обеспечением пожаро- и взрывобезопасности установок и хранилищ бензина, то кроме средних значений концентраций  $\bar{G}$  был определен также их верхний доверительный интервал  $\bar{G}_{\text{ист}}$ , соответствующий доверительной вероятности  $\alpha = 0,99$ .

Верхний доверительный интервал концентраций был определен по формуле (31):

$$G_{(S \text{ или } h)} \text{ ист} < \bar{G}_{(S \text{ или } h)} \text{ опытн} + t_{\alpha} \delta_{0(S \text{ или } h)}, \quad (31)$$

где  $G_{(S \text{ или } h)} \text{ ист}$  — истинные значения величин концентраций паров бензина в данных точках, соответствующие заданной доверительной вероятности ( $\alpha = 0,99$ );

$\bar{G}_{(S \text{ или } h)} \text{ опытн}$  — средние значения концентраций паров бензина в данных точках, полученные опытным путем (рис. 30, а, б, и в, кривые 1);

$t_{\alpha}$  — коэффициент, зависящий от заданной доверительной вероятности  $\alpha$  и числа степеней свободы  $(n-1)$  и определяемый из таблиц критерия Стьюдента ([35], приложение VII); в нашем случае  $t_{\alpha} = 3,75$ ;

$\delta_{0(S \text{ или } h)}$  — средняя квадратичная ошибка среднего арифметического значения концентраций в данной точке.

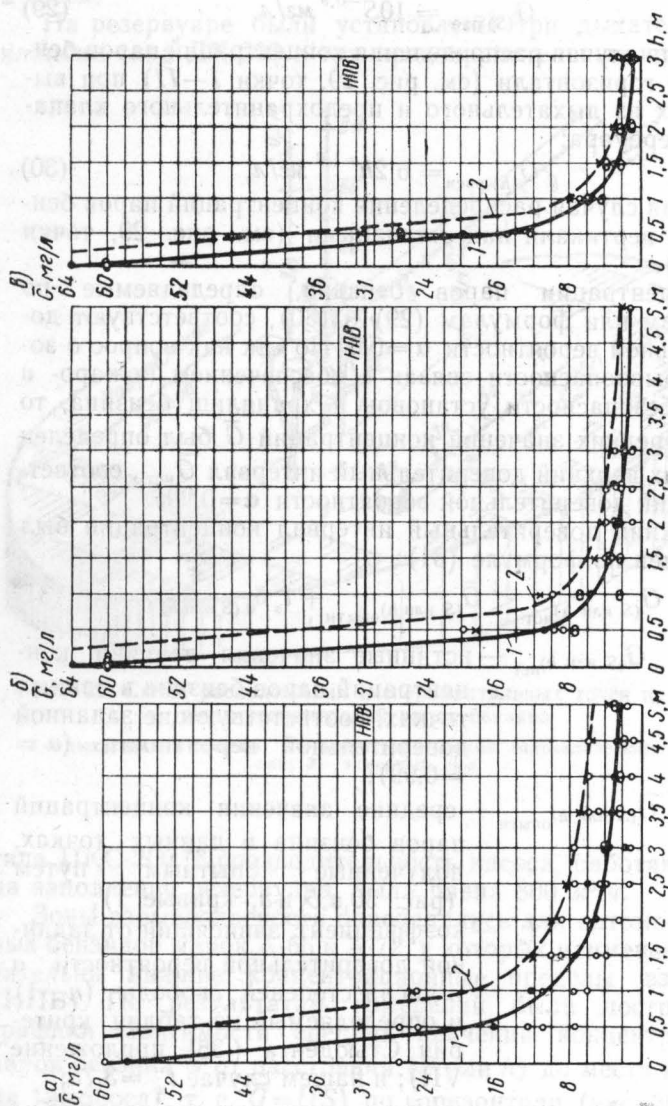


Рис. 30. Графики распределения концентраций паров бензина

а — по горизонтали от дыхательных и предохранительных клапанов; о — по горизонтали от замерного люка; в — над клапанами



По полученным значениям  $G_{(S \text{ или } h)_{\text{ист}}}$  были построены кривые распределения концентраций паров бензина, соответствующие доверительной вероятности  $\alpha = 0,99$  (рис. 30, а, б и в, кривые 2).

При определении размеров зон взрывоопасности учитывали также коэффициент надежности, который по аналогии с коэффициентом, применяемым в вопросах взрывозащиты, был принят равным 3 и определялся из следующего соотношения:

$$K_n = \frac{G_{\text{нпв}}}{G_{(S \text{ или } h)_{\text{ист}}}} \geq 3. \quad (32)$$

Учитывая изложенное, зона взрывоопасности паров бензина была принята равной 2 м по горизонтали и 1 м по вертикали от места выделения паров бензина. Установленные размеры зоны взрывоопасности могут быть справедливыми для резервуаров любой емкости, так как они определялись не только по верхнему доверительному интервалу концентраций, но и с учетом коэффициента надежности, равного 3.

Были исследованы также зоны взрывоопасности при выбросе паров псевдобутилена и стирола через газоотводные трубы, свечи и промышленную вентиляцию. При этих опытах ни в одной экспериментальной точке взрывоопасных концентраций обнаружено не было.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН ВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗОВ

Исследование зон взрывоопасности газов проводили при выбросе водорода и природного газа через свечи и газоотводные трубы. Опыты по замерам концентраций водорода, который легче воздуха в 14,5 раза, происходили при выбросе  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$  и избыточном давлении  $100 \text{ мм вод. ст.}$ , при средней скорости ветра  $1 \text{ м/сек}$  и температуре воздуха  $28^\circ \text{C}$ . Величину концентраций водорода определяли по вертикали через каждые 0,5 м в направлении оси струи. Опыты проводили газоанализатором типа ПГФ-11-54 с градуировкой на водород.

При этом было установлено, что если в точках, превышающих место выброса водорода на 0,5 и 1 м, средние концентрации меньше нижнего предела взрыва водорода (4% объемных) соответственно в 1,3 и 1,9 раза, то в точке, отстоящей на 1,5 м, концентрации меньше уже в

36,3 раза. В точке, отстоящей по вертикали на 2 м, газоанализатор показаний не давал, так же как и в горизонтальном направлении от точки выброса, т. е. концентрации водорода выходили за пределы чувствительности прибора.

Таким образом, максимальной зоной взрывоопасности для водорода (при условиях выброса, соответствующих опыту) следует считать зону с превышением над местом выброса на 1,5 м. Такой вывод о размерах зоны взрывоопасности, очевидно, будет правильным и для случаев большей производительности выброса по сравнению с выбросом при опыте, но для избыточных давлений до 100 мм вод. ст.

Опыты по определению зон взрывоопасности при выбросе в атмосферу природного газа проводились на газораспределительной станции и газгольдерном пункте. Природные газы (саратовский, ставропольский и дашавский) состоят из 94—98% метана, в связи с чем плотность их по отношению к воздуху составляет 0,55. Нижний предел взрыва природных газов равен 3,8% объемных.

В первом случае выброс газа происходил из газовой магистрали диаметром 500 мм через свечу диаметром 100 мм. Опыты проводили как при свободном выбросе газа, так и при наличии защитного колпака, препятствующего свободному выбросу.

Концентрации газа при свободном выбросе измеряли в точках, расположенных через каждый метр по высоте от среза конца свечи; среднее значение концентраций газа в каждой точке оценивали по восьми замерам. Выброс газа производился при избыточных давлениях 0,2 и 0,3 атм. При проведении опытов скорость ветра менялась в пределах 1—2 м/сек, а температура воздуха была равной 27°С. Определение концентраций газа производили газоанализатором типа ПГФ2М-ИИА «Метан».

Во втором случае (при опытах на газгольдерном пункте) выброс газа производился через свечу диаметром 100 мм из батареи горизонтальных газгольдеров при избыточном давлении газа 0,5 атм. Всего было проведено три варианта опытов (рис. 31, а, б и в).

В первом опыте осуществлялся свободный выброс газа; во втором на свече имелся защитный колпак, препятствующий свободному выбросу газа, и в третьем опыте на конце свечи была укрепена специальная насадка, направляющая струю газа под углом 120° к вертикали.

При проведении опытов скорость ветра составляла в среднем 1 м/сек, а температура воздуха была равна 24° С. Измерения концентраций производили в точках, расположенных через каждый метр по вертикали и горизонтали от места выброса.

По результатам исследований концентраций газа были построены графики  $\overline{G}_{(h)} = f(h)$  и  $\overline{G}_{(s)} = f(s)$  распределе-

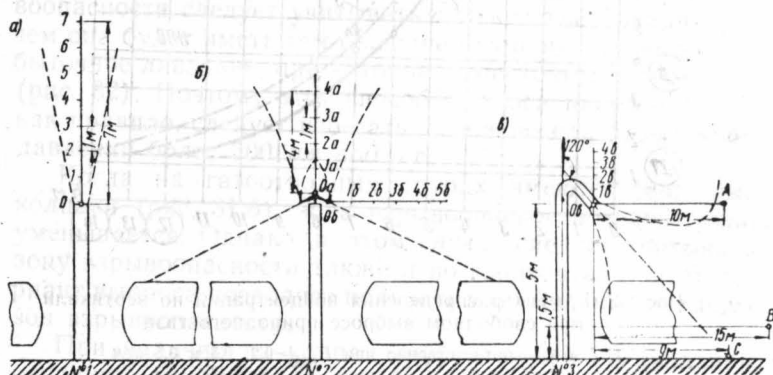


Рис. 31. Схема расположения экспериментальных точек по замеру концентраций природного газа

а — опыт № 1, свободный выброс; б — опыт № 2, выброс при наличии защитного колпака; в — опыт № 3, выброс при наличии насадка

ния средних значений концентраций как по вертикали, так и по горизонтали от места выброса.

Так как значения величин концентраций газа, определяемые по графикам, соответствуют доверительной вероятности  $\alpha = 0,5$ , то был определен также их верхний доверительный интервал  $G_{ист}$ , соответствующий доверительной вероятности  $\alpha = 0,99$ .

Концентрации газа, соответствующие верхнему доверительному интервалу  $G_{ист}$ , определяли по формуле (31). По полученным значениям  $G_{ист}$  были построены графики распределения концентраций, соответствующие доверительной вероятности  $\alpha = 0,99$  (рис. 32, кривые 1, 2 и рис. 33, кривая 2). На рис. 33 кривая 1 соответствует доверительной вероятности  $\alpha = 0,5$ .

Размеры зон взрывоопасности определяли по концентрациям газа, соответствующим верхнему доверительному интервалу  $G_{ист}$ , с учетом коэффициента надежности, равным 3 в формуле (32).

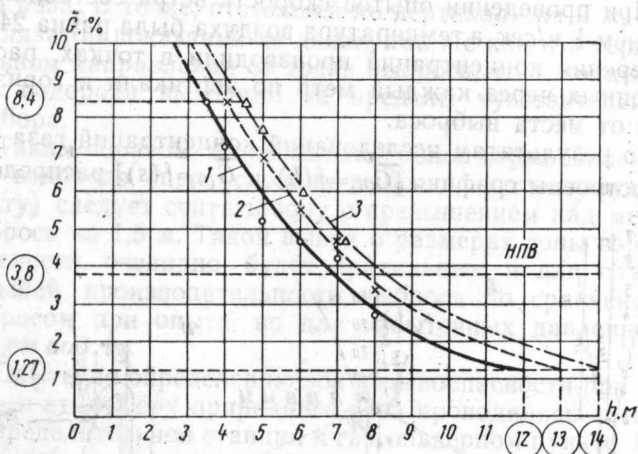


Рис. 32. График распределения концентраций по вертикали при свободном выбросе природного газа  
1, 2 и 3 — соответственно при  $P_{изб}=0,2; 0,3$  и  $0,5$  атм

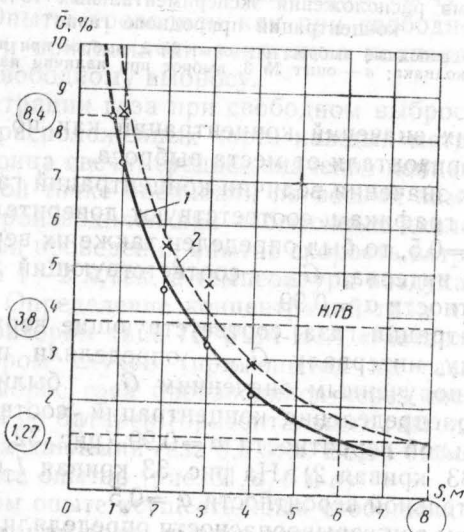


Рис. 33. График распределения концентраций природного газа по горизонтали при наличии на свече защитного колпака

1 и 2 — соответственно при  $P_{изб}=0,5$  атм

Исследования зон взрывоопасности горючих смесей паров и газов показывают, что особенно сильное влияние на размеры зон взрывоопасности при всех прочих равных условиях оказывает конструктивное выполнение устройств для выброса горючих паров и газов в атмосферу. Так, например, особенно при свободном выбросе (рис. 31,а) горючих паров и газов легче воздуха зону взрывоопасности следует учитывать только по вертикали, причем она будет иметь тем большие размеры, чем выше избыточное давление, при котором происходит выброс газа (рис. 32). Поэтому этот способ выброса паров и газов, как правило, следует избегать, особенно при избыточном давлении более 500 мм вод. ст.

Когда на газоотводных трубах имеются защитные колпаки (рис. 31,б), зона взрывоопасности значительно уменьшается. Однако в этом случае следует учитывать зону взрывоопасности также и по горизонтали. Этот вариант выброса позволяет получить минимальные размеры зон взрывоопасности.

При наличии на концах труб и свечей специальной насадки или изгиба труб (рис. 31,в), направляющих струю паров и газов под углом  $90-120^\circ$  к вертикали, основное значение имеет размер зоны по горизонтали. Причем в зависимости от избыточного давления при выбросе паров и газов размеры такой зоны могут быть весьма значительными (например, до 20 м для случая выброса природного газа под избыточным давлением 0,5 атм).

Такой вариант конструктивного выполнения устройств для выброса (особенно при избыточном давлении 0,5 атм и более) в большинстве случаев следует считать не удовлетворяющим условиям пожаро- и взрывобезопасности, так же как и практическому решению вопросов молниезащиты.

#### **4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НОРМИРОВАНИЮ ЗОН ВЗРЫВООПАСНОСТИ И МОЛНИЕЗАЩИТЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЫБРОСА ГОРЮЧИХ ПАРОВ И ГАЗОВ В АТМОСФЕРУ**

На основании исследований рекомендуется учитывать следующие размеры зон взрывоопасности:

а) для веществ тяжелее воздуха (бензин и др.) при выбросе их через устройства, имеющие на концах труб защитные колпаки, и при избыточном давлении до 500 мм вод. ст. зона взрывоопасности имеет размеры: 1 м

по вертикали над точкой выброса и 2 м по горизонтали от точки выброса;

б) для веществ легче воздуха (водород, природный газ и др.) при свободном выбросе и при избыточном давлении до 100 мм вод. ст. зона взрывоопасности имеет размеры 1,5 м по вертикали над точкой выброса;

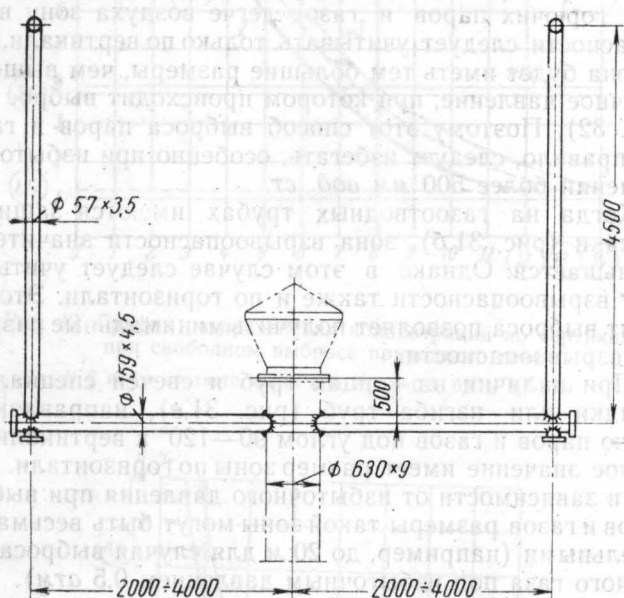


Рис. 34. Молниезащита газоотводной трубы (условным пунктиром показана труба сброса газа)

в) для веществ как тяжелее, так и легче воздуха при выбросе с обязательным наличием на концах труб защитных колпаков и при избыточном давлении до 0,5 атм зона взрывоопасности имеет размеры: 4 м по вертикали над точкой выброса и 8 м по горизонтали от точки выброса.

При проектировании молниезащиты взрывоопасных зданий и наружных установок с устройствами для выброса горючих паров и газов в атмосферу расчет молниеотводов следует производить с учетом зон взрывоопасности. При этом минимальная удаленность молниеотводов от места выброса горючих паров и газов будет определяться размерами зон взрывоопасности по горизонтали, а необ-

ходимая высота молниеотводов — тем, чтобы устройства для выброса с их зонами взрывоопасности были бы полностью вписаны в зону защиты молниеотводов.

Наилучшим решением молниезащиты устройств для выброса горючих смесей следует считать защиту их теми же молниеотводами, которые служат для защиты самого здания или сооружения.

В отдельных случаях, когда выполнение указанных выше требований будет связано с необходимостью применения очень высоких молниеотводов или большого их количества, а также если устройство для выброса горючих смесей будет представлять отдельно стоящую конструкцию большой высоты ( $h_x \geq 30 \text{ м}$ ), можно допустить защиту таких устройств по схеме рис. 34, при этом конец трубы обязательно должен быть снабжен защитным колпаком.

Если по условиям технологии можно разбавить горючие смеси перед их выбросом до безопасных концентраций, то выполнение такого мероприятия позволит значительно упростить молниезащиту и повысить пожаро- и взрывобезопасность здания или наружной установки, особенно при наличии большого количества устройств для выброса.

На отдельных высотных свечах при разрядах молнии могут возникнуть факелы, которые рекомендуется тушить подводом к свечам обычного пара или инертного газа (например, азота).

Исследования зон взрывоопасности горючих паров и газов и рекомендации по их нормированию представляют значительный интерес также и с точки зрения обоснования зон взрывоопасности, принятых для наружных взрывоопасных установок класса В-I<sub>г</sub>. «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ). Размеры зон взрывоопасности по ПУЭ превышают размеры, полученные нами при экспериментальном исследовании. Таким образом, результаты исследований подтверждают надежность норм ПУЭ по зонам взрывоопасности для наружных установок класса В-I<sub>г</sub>.

## **V. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Рекомендуемые в настоящее время геометрические размеры зон защиты молниеотводов (см. III) соответст-



вуют вероятности поражения защищаемых объектов, равной примерно 1%, т. е. считается, что сооружение будет надежно защищено от прямых ударов молнии, если все его части окажутся в пределах зоны защиты молниеотводов, а все элементы молниеотводов будут правильно выполнены и исправны.

Однако в практике проектирования и монтажа молниезащиты взрывоопасных зданий и сооружений имеется ряд существенных недостатков, снижающих эффективность молниезащиты, а именно: неправильное выполнение молниезащиты, при котором здания и установки или отдельные их части оказываются за пределами зон защиты молниеотводов; разделение заземлителей электрооборудования и молниезащиты в зданиях и сооружениях 2-й и 3-й категорий; значительные протяженности токоотводов и отсутствие по высоте здания металлических поясов для выравнивания потенциалов; отсутствие квалифицированного надзора за состоянием молниезащиты; несоблюдение сроков ревизий и осмотров молниезащитных устройств и т. д.

## **1. ЗОНЫ ЗАЩИТЫ МОЛНИЕОТВОДОВ И СТЕПЕНЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ ЗДАНИЙ И УСТАНОВОК**

Проведенные автором исследования молниезащиты ряда объектов с наличием взрывоопасных зданий и наружных установок, а также объектов, на которых произошли пожары и взрывы (см. II, 5), показывают, что во многих случаях здания или установки в целом или отдельные их части оказались вне пределов зон защиты молниеотводов.

Так, например, молниезащита резервуарного парка и железнодорожной сливно-наливной эстакады светлых нефтепродуктов одной из нефтебаз была выполнена неправильно. Защита резервуаров и эстакады этой нефтебазы осуществлялась отдельно стоящими телескопическими молниеотводами, совмещенными с прожекторными мачтами (рис. 35 и 36). Общая высота молниеотводов оказалась равной соответственно 15 и 20 м.

На рис. 37 в плане и разрезе показаны зоны защиты молниеотводов (№ 4—12) резервуарного парка. Из рисунка видно, что все защищаемые резервуары оказались вне пределов зон защиты молниеотводов. Естествен-

но, что при такой молниезащите не исключено поражение резервуаров прямыми ударами молнии.

Молниезащита эстакады осуществлялась тремя молниеотводами высотой по 20 м (рис. 36). По внешним признакам создается впечатление, что эстакада защищена вполне надежно, но построение зон защиты молниеотводов № 1—3 показывает, что на уровне высоты защищаемой эстакады ( $h_x = 8$  м) более 90% ее оказалось вне пределов зон защиты молниеотводов (рис. 38).

Такая же неправильная схема молниезащиты, когда молниеотводы совмещаются с прожекторными мачтами недостаточной высоты и удалены на большие расстояния

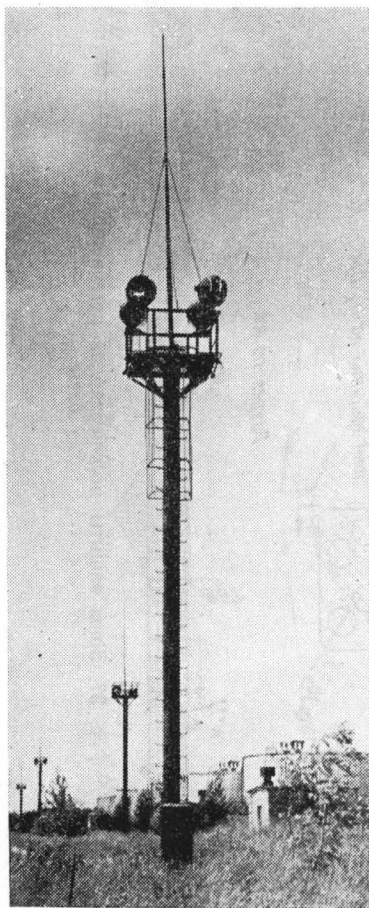


Рис. 35. Молниезащита резервуаров нефтебазы

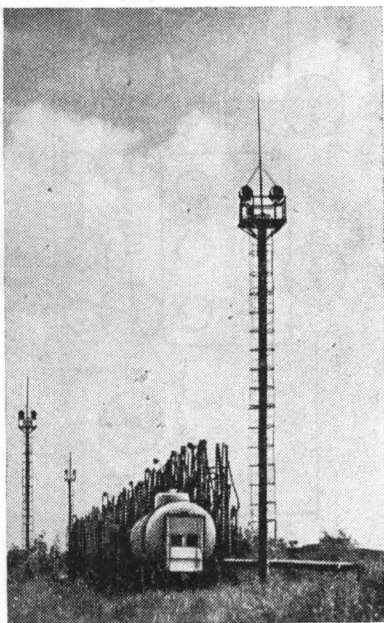
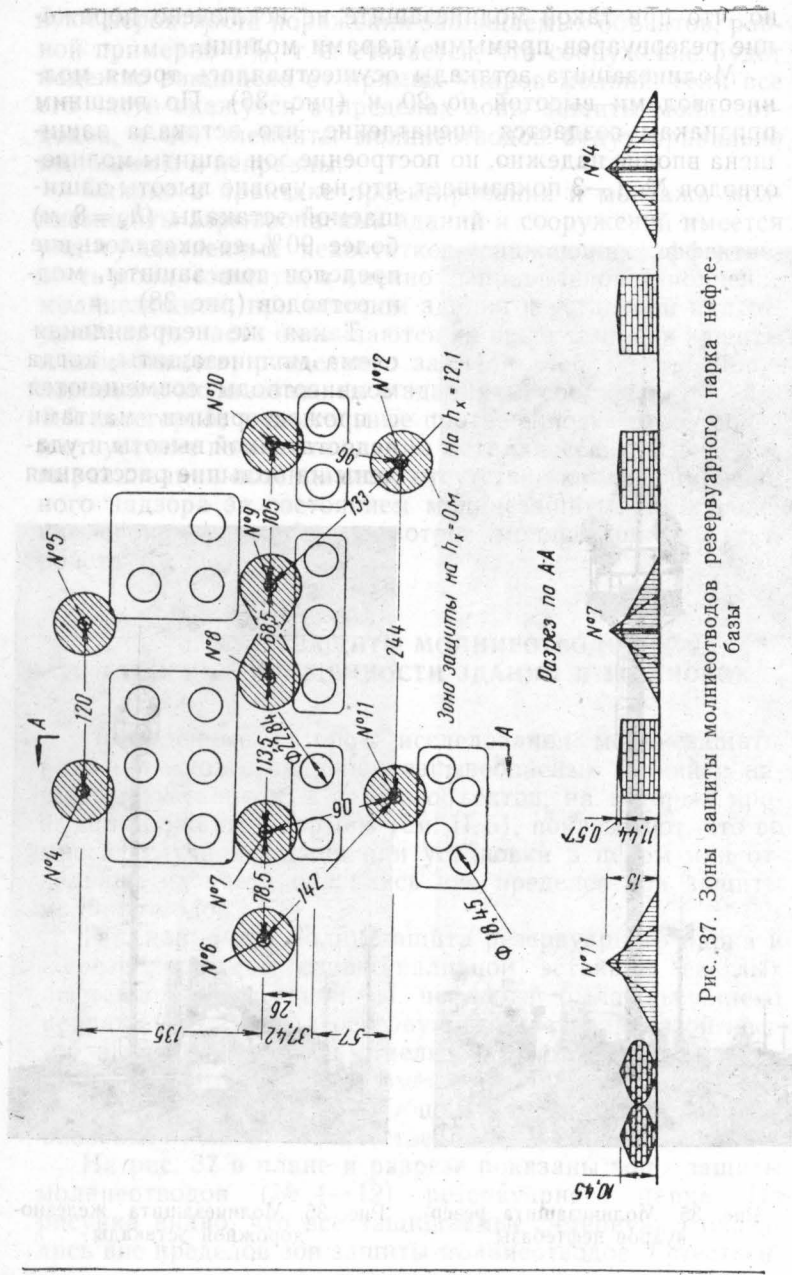


Рис. 36. Молниезащита железнодорожной эстакады



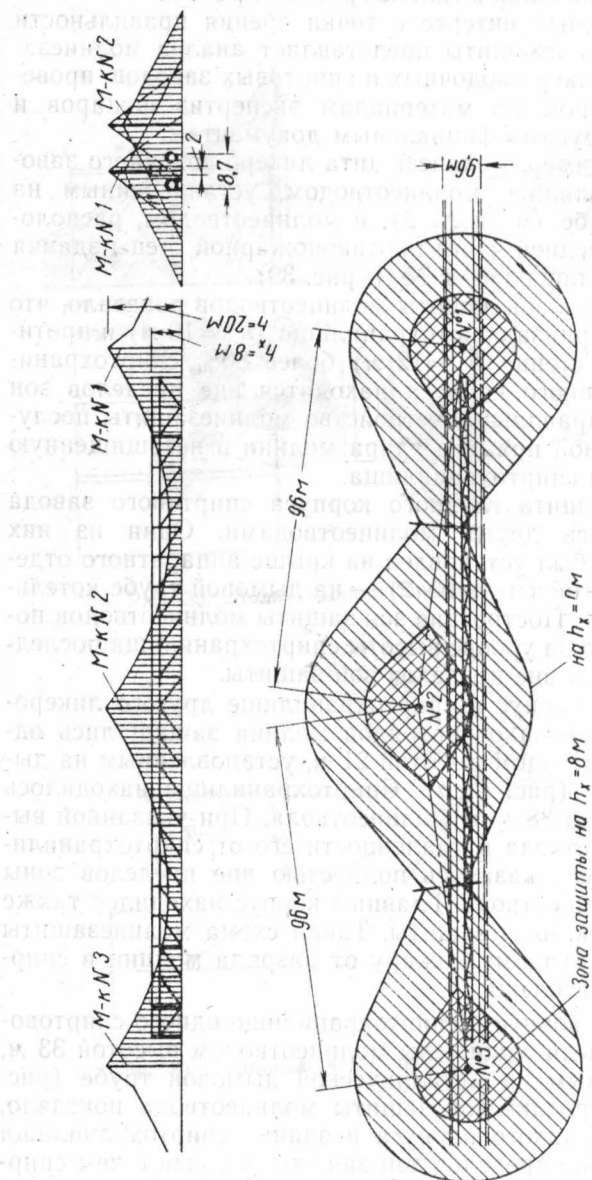


Рис. 38. Зоны защиты молниесводов железнодорожной эстакады

от резервуаров, применена и на другой крупной нефтебазе, расположенной в сильно грозовом районе.

Значительный интерес с точки зрения правильности решений молниезащиты представляет анализ молниезащиты ряда ликеро-водочных и спиртовых заводов, проведенный автором по материалам экспертиз пожаров и взрывов и другим официальным документам.

Так, например, молниезащита ликеро-водочного завода осуществлялась молниеотводом, установленным на дымовой трубе (м—к № 2), и молниеотводом, расположенным в средней части противопожарной стены здания спиртохранилища (м—к № 1, рис. 39).

Построение зон защиты молниеотводов показало, что на уровне карниза спиртохранилища ( $h_x = 10$  м) и противопожарной стены ( $h_x = 12$  м) более 80% спиртохранилища и главного корпуса находится вне пределов зон защиты. Неправильное устройство молниезащиты послужило причиной прямого удара молнии в незащищенную часть крыши спиртохранилища.

Молниезащита главного корпуса спиртового завода производилась двумя молниеотводами. Один из них (м—к № 1) был установлен на крыше аппаратного отделения, а другой (м—к № 2) — на дымовой трубе котельной (рис. 40). Построение зон защиты молниеотводов показывает, что на уровне высоты спиртохранилища последнее находится вне пределов зон защиты.

Главный корпус и спиртохранилище другого ликеро-водочного завода от разрядов молнии защищались одним молниеотводом высотой 21 м, установленным на дымовой трубе (рис. 41, а). Спиртохранилище находилось на расстоянии 38 м от молниеотвода. При указанной высоте молниеотвода и удаленности его от спиртохранилища последнее оказалось полностью вне пределов зоны защиты молниеотвода. Главный корпус находился также вне пределов зоны защиты. Такая схема молниезащиты привела к крупному пожару от разряда молнии в спиртохранилище завода.

Главный корпус и спиртохранилище одного спиртового завода были защищены молниеотводом высотой 33 м, установленным на металлической дымовой трубе (рис. 41, б). Построение зон защиты молниеотвода показало, что часть главного корпуса и здание спиртохранилища оказались вне пределов зон защиты, в связи с чем спиртохранилище было поражено прямым ударом молнии.

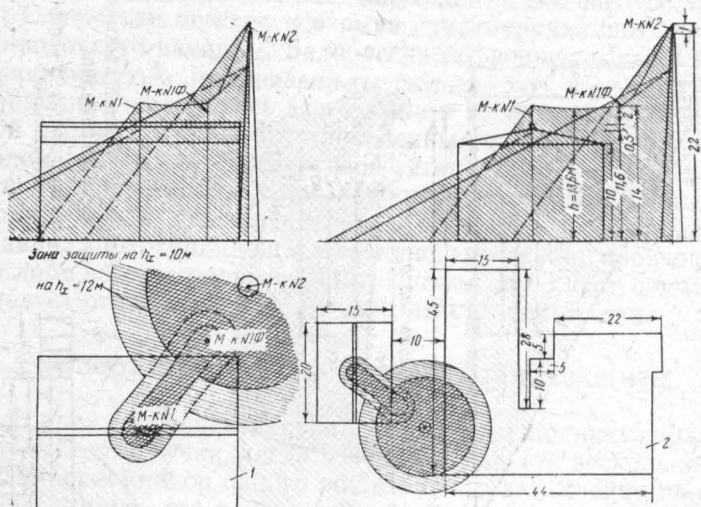


Рис. 39. Молниезащита ликеро-водочного завода

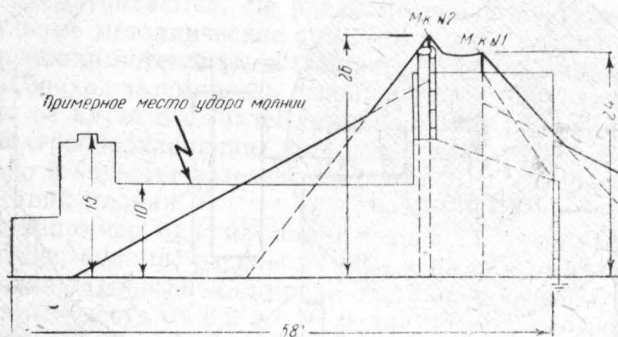


Рис. 40. Молниезащита главного корпуса спиртзавода







Во всех рассмотренных примерах прямой удар молнии в здания объясняется тем, что части зданий или здания полностью оказывались вне зоны защиты молниеотводов.

Случай же пожара и взрыва спиртохранилища ликеро-водочного завода в Белоруссии объяснить только неправильностью молниезащиты нельзя, так как спиртохранилище находилось всего лишь в 13 м от металлической дымовой трубы с установленным на ней молниеотводом (рис. 41, в). Экспертизой установлено, что молниеотвод удовлетворял всем требованиям — зона защиты молниеотвода со значительным запасом перекрывала здание спиртохранилища. Очевидно, поражение произошло либо за счет прорыва зоны защиты, либо этот случай следует отнести к вторичным воздействиям молнии.

## 2. ТОКООТВОДЫ И ЗАЗЕМЛИТЕЛИ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

В практике проектирования и монтажа молниезащиты встречаются случаи, когда использование для нескольких молниеприемников одного общего очага заземления приводит к тому, что токоотводы наиболее удаленных молниеприемников имеют большую протяженность. Бывает и так, что протяженность токоотводов достигает 100 м и более, при этом соединения токоотводов с металлическими конструкциями здания и оборудованием по всей длине не предусматриваются. Не предусматриваются также и специальные металлические пояса по высоте зданий для выравнивания потенциалов. Общие для нескольких молниеприемников заземлители выполняются изолированными друг от друга и от заземлителей защитного заземления электрооборудования, которые используются одновременно в качестве заземлителей защиты от вторичных воздействий молнии.

Так, например, одно из зданий завода СК защищалось 16 молниеотводами, расположенными на самом здании. При длине здания 86 м, ширине отдельных частей от 14 до 40 м и высоте от 8,2 до 16 м для 16 молниеотводов предусматривалось всего три очага заземления (с последующим добавлением при монтаже еще одного). В связи с этим протяженность токоотводов достигала от 51 до 128 м.

Наиболее высокая часть ( $h_x = 38$  м) здания другого взрывоопасного цеха (рис. 42) имела молниезащиту из четырех молниеотводов с общим очагом заземления. Для

молниеприемников № 3 и 4 общая длина токоотвода составляет 83 м, из которых 45 м изготовлено из круглой стали диаметром 6 мм, а 38 м — из полосовой стали 25×4 мм. В нескольких метрах от вертикального участка токоотвода располагается металлическая площадка с вентиляционным агрегатом, присоединенным к заземли-

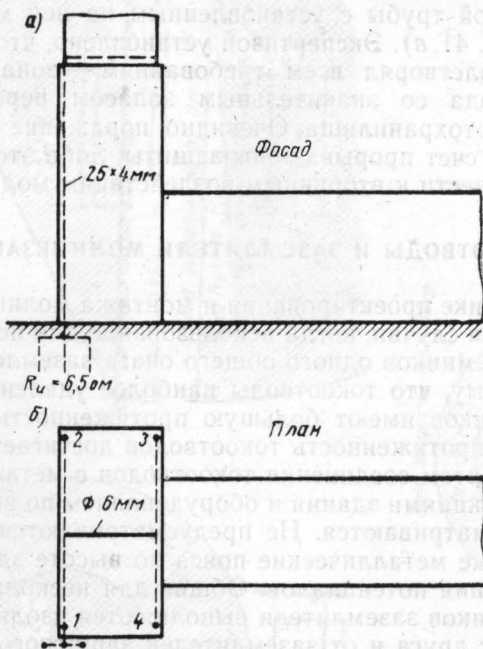


Рис. 42. Пример неправильного решения молниезащиты взрывоопасного здания (один заземлитель на четыре молние-приемника)

телю защитного заземления электрооборудования. Импульсное сопротивление заземлителя молниеотводов  $R_{и} = 6,5 \text{ ом}$ . Опасность, создаваемая рассмотренными недостатками молниезащиты, заключается в том, что в отдельных точках токоотводов при прямом ударе молнии в зависимости от его параметров будут возникать очень высокие потенциалы, достигающие сотен и тысяч киловольт. При таких величинах напряжений не исключается возможность перекрытий с токоотводов на металличе-

кие конструкции зданий или на элементы технологического оборудования, что совершенно недопустимо по условиям пожаро- и взрывобезопасности.

Так, если подсчитать величину потенциала в точках подсоединения токоотвода к молниеприемникам № 3 и 4 (см. рис. 42), приняв ток молнии равным 200 кА, то по формуле (22) будем иметь

$$U_l = 200 \cdot 6,5 + 1,7 \cdot 83 \cdot 60 = 9766 \text{ кв.}$$

При такой величине потенциала по формуле (23) может быть перекрыт воздушный промежуток длиной

$$S_B = \frac{U_l}{E_B} = \frac{9766}{500} = 19,5 \text{ м.}$$

В других точках токоотвода, расположенных ближе к заземлителю, величины потенциалов будут соответственно меньше, но достаточными для перекрытий на заземленные металлические предметы, расположенные в нескольких метрах от этих точек.

Разделение заземлителей молниеотводов, заземлителей электрооборудования и других систем защитных заземлений для зданий 1-, 2- и 3-й категорий при наличии неизолированных молниеотводов не только усугубляет пожаро- и взрывоопасность воздействий молнии, но и экономически нецелесообразно (см. III, 3 «г»).

### 3. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Нормальная организация эксплуатации молниезащитных устройств предусматривает наряду с текущим ремонтом периодические осмотры (ревизии) и предупредительные ремонты.

Цель ревизии состоит в том, чтобы:

а) проверять надежность электрической связи между токоведущими элементами (мест сварки, болтовых и прочих соединений);

б) выявлять элементы в защитных устройствах, требующие замены или усиления из-за механических повреждений;

в) определять степень разрушения коррозией отдельных элементов молниезащиты и принять меры по антикоррозийной защите и по усилению элементов, поврежденных коррозией;

г) проверять соответствие молниезащитных устройств категории здания или установки;

д) измерять сопротивление при токе промышленной частоты всех заземлителей молниезащиты не реже одного раза в два года, а при повышении сопротивления заземлителя больше, чем на 20% по сравнению с допустимым (расчетным), принимать меры по доведению сопротивления заземлителей до требуемых величин (см. III, 3 и 4).

На основании ревизий определяются объемы предупредительного ремонта устройств молниезащиты, который должен быть закончен к началу грозового сезона (обычно март для южных и апрель для центральных районов СССР). Мелкие текущие ремонты молниезащитных устройств могут производиться во время грозового сезона, а капитальные ремонты — в негрозовое время года.

Однако на практике встречаются случаи, когда ревизии молниезащитных устройств не производятся в течение нескольких лет. Недостатком является также не всегда достаточно квалифицированный надзор за состоянием и соответствием молниезащиты. Имеют место случаи, когда строительно-монтажные и технологические изменения на объекте повышают степень его пожаро- и взрывоопасности, а молниезащитные устройства остаются без изменений. Часто на объектах отсутствует как проектная, так и эксплуатационная документация по молниезащитным устройствам.

Рассмотренные недостатки, естественно, снижают надежность молниезащитных устройств по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности защищаемых объектов.

Высококвалифицированный надзор за молниезащитными устройствами достигается на тех объектах, где в составе электроцеха создается специальная группа или бригада, занимающаяся только вопросами эксплуатации молниезащитных устройств и устройств по защите от статического электричества. Главный энергетик или начальник электроцеха должен разрабатывать краткую инструкцию по эксплуатации указанных устройств, учитывающую все конкретные особенности объекта. Лица, проводящие ревизию молниезащиты, должны составлять акт осмотра и проверки с указанием обнаруженных дефектов.

Результаты ревизий молниезащитных устройств и устройств по защите от разрядов статического электричества, проверочных испытаний заземляющих устройств,

произведенных ремонтов и т. д. следует заносить в специальный эксплуатационный журнал произвольной формы.

## **VI. ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Многие производственные процессы в различных отраслях промышленности сопровождаются явлением статической электризации, приводящей к образованию и разделению положительных и отрицательных электрических зарядов, т. е. зарядов статического электричества. Иногда эти заряды быстро стекают в землю, рассеиваются или нейтрализуются; в других случаях они накапливаются и создают поле высокой напряженности, обуславливающее электрические разряды.

Во взрывоопасных производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, горючих газов и пылей, искровые разряды статического электричества могут вызвать взрыв и пожар, приводящие к значительным убыткам, увечьям или человеческим жертвам.

В ряде производств статическое электричество является причиной брака продукции, препятствует увеличению скорости работы машин и аппаратов, а следовательно, препятствует повышению производительности труда.

### **1. ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

В основе образования статического электричества лежат очень сложные процессы, зависящие от множества факторов. Часто эти явления не только не рассматриваются вместе, но и не приводятся к какой-либо взаимной связи. В настоящее время нет еще единой теории, объясняющей статическую электризацию, а существует ряд гипотез. Однако общим элементом в объяснении статической электризации является образование двойного электрического слоя, который во всех случаях служит непосредственным источником возникновения статических зарядов [36].

Наиболее распространенная гипотеза статической электризации — контактная электризация веществ. Согласно этой гипотезе электризация возникает при соприкосновении двух разнородных веществ в силу неуравновешенности атомных и молекулярных сил на поверхности соприкосновения. При этом происходит перераспределение электронов или ионов веществ и образование двойного электрического слоя (по одному на каждой поверхности) с противоположными знаками.

Величина контактной разности потенциалов весьма различна и зависит от диэлектрических свойств соприкасающихся поверхностей, состояния поверхности, давления, с которым они прижаты друг к другу, а также от влажности и температуры. При разделении поверхностей, между которыми возникла контактная электризация, каждая поверхность сохраняет свой заряд, а контактная разность потенциалов по мере уменьшения емкости при разделении может достичь порядка сотен и тысяч вольт [37].

Согласно другой гипотезе статическая электризация может быть объяснена явлениями эффекта удара и отрыва.

Появление опасных потенциалов можно объяснить и за счет электростатической индукции при грозовых явлениях, вызывающей статическую электризацию изолированных проводников.

Таким образом, статическая электризация охватывает все процессы, ведущие к образованию и разделению положительных и отрицательных электрических зарядов в результате механической деформации, имеющей место при столкновении или контакте поверхностей двух твердых тел, поверхностей твердого тела и жидкости, а также при разрыве или отделении поверхностей твердых тел или жидкости газами или каким-либо другим агентом.

Как величина зарядов статического электричества, так и их полярность в значительной степени зависят от состояния поверхности исследуемых материалов, поэтому в производственных условиях весьма затруднительно предвидеть точно величину и полярность зарядов статического электричества.

Экспериментами установлено, что из двух соприкасающихся (трущихся) веществ положительно заряжается то, у которого диэлектрическая проницаемость больше, а если вещества имеют одинаковую диэлектрическую

проницаемость, то электрические заряды возникать не будут.

Многочисленные исследования показывают, что напряжение относительно земли при статической электризации в целом ряде технологических процессов достигает многих тысяч и десятков тысяч вольт. Ниже приведены случаи возникновения статического электричества с потенциалами (в кВ).

В кинофотопленочной промышленности . . . . .	15 и выше
На заводах резиновой промышленности и искусственной кожи . . . . .	10—15
В производствах, связанных с размолом, тонким дроблением и т. д. . . . .	10—25—50
На предприятиях, связанных с изготовлением пороха или другими операциями с готовым порохом . . . . .	3—6—20
При:	
промазке тканей резиновым клеем на клеепромазочных машинах . . . . .	9—30
протекании бензина и химически чистого бензола по стальным трубам	3,6
транспортировании по стеклянному трубопроводу длиной 80 м шерстяных очесов при скорости 20 м/сек и относительной влажности воздуха в цехе 50—55% . . . . .	15—17
вынимании шерстяной одежды из бензина . . . . .	3,6
разбрызгивании красок . . . . .	10
трении целлулоида . . . . .	40
движении резиновой ленты транспортера с пшеницей (4 м/сек) . . . . .	45
движении кожного приводного ремня (15 м/сек) . . . . .	80
фильтрации смеси бензина с асфальтом сквозь шелк . . . . .	335

Величины же токов при явлениях статической электризации составляют, как правило, микроамперы. Так, например, при протекании нефти различных сортов по металлической питающей трубе наблюдались токи в интервале  $1-80 \cdot 10^{-8}$  а [36]. При протекании различных сортов бензина по трубопроводу для заполнения цистерны были измерены токи в пределах  $10^{-7}-10^{-8}$  а, причем ток оказался прямо пропорциональным скорости течения бензина [38].

Если в процессе электризации напряженность элект-



рического поля достигнет величин, равных или превышающих электрическую прочность диэлектрика (например, воздуха), может возникнуть электрический разряд, который при определенных условиях послужит причиной взрыва и пожара. Особенно большую опасность разряды статического электричества представляют для новых химических процессов сублимации, адсорбции и сушки в подвижном слое для пневмосушки, а также для пневмотранспорта и т. д.

## 2. ВОСПЛАМЕНЯЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИСКР СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Когда на поверхности вещества в результате нарушения контакта образуются электростатические заряды, то эти поверхности становятся пластинами конденсатора. При этом для возникновения искр первостепенное значение имеет зависимость между напряжением, величиной электрического заряда и электрической емкостью. Эта зависимость выражается формулой

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (33)$$

где  $U$  — напряжение между пластинами конденсатора в в;

$Q$  — электрический заряд на одной из пластин в к;

$C$  — емкость конденсатора в ф.

Энергия искры, способной возникнуть между пластинами конденсатора под действием высокого напряжения, определяется по формуле

$$W = 0,5CU^2, \quad (34)$$

где  $W$  — энергия искры в дж.

Энергия искры является одним из важнейших критериев определения возможности воспламенения взрывоопасных смесей паров, газов и пыли с воздухом. Это подтверждается соответствующими исследованиями и, в частности, результатами испытаний [38] по воспламенению электрическими искрами различных взрывоопасных смесей (рис. 43). Если бы воспламеняющая способность искр определялась только переносом заряда  $Q$ , то на рисунке граница области искр, способных воспламенить, выражалась бы прямой, параллельной оси абсцисс. На-

оборот, если бы воспламеняющая способность искр зависела только от напряжения  $U$ , то эта граница выражалась бы прямой, параллельной оси ординат. По виду же кривых рис. 43 ясно, что граница воспламеняющей способности искр является приблизительно гиперболой. Это значит, что воспламеняющая способность искр определяется произведением  $QU$ , т. е. энергией искры. На воспламеняющую способность электрической искры влияет ряд факторов, наиболее существенными из которых являются: концентрация, температура и давление взрывоопасной смеси.

Минимальная энергия искры, необходимая для воспламенения взрывоопасной смеси при ее оптимальной концентрации, определяется экспериментально. Обычно минимальная энергия, необходимая для воспламенения пылевоздушных взрывоопасных смесей, на порядок выше энергии, необходимой для воспламенения паровоздушных взрывоопасных смесей. Примеры минимальных энергий, необходимых для воспламенения некоторых паро-, газо-, пылевоздушных взрывоопасных смесей, приводятся в приложении I.

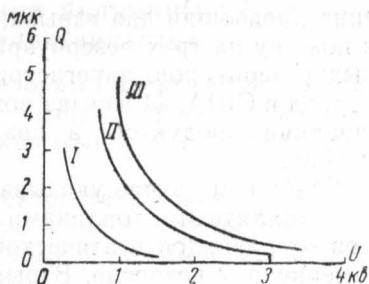


Рис. 43. Способность воспламенения электрическими искрами различных взрывоопасных смесей паров с воздухом

I — сероуглерод; II — бензол;  
III — этиловый спирт

### 3. ПРИМЕРЫ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Возникновение статического электричества в пространстве со взрывоопасными смесями паров, газов и пыли с воздухом послужило причиной многочисленных пожаров и взрывов, которые привели к значительным материальным ущербам.

Так, например, по данным шведских страховых обществ, выплата за ущерб, причиняемый разрядами статического электричества, в 1958 г. составила около 4—5 млн. крон [39].

Особую опасность представляет возникновение искр статического электричества при различных операциях по перекачке светлых нефтепродуктов (бензинов, лигроинов и др.) в резервуары, цистерны, нефтеналивные суда (танкеры и баржи). Так, в 1954 г. в Битбурге (ФРГ) взорвался подземный резервуар емкостью 5000 м<sup>3</sup>. В 1956 г. на складе аэропорта полярной авиации при перекачке бензина произошли два взрыва, причем один из них привел к пожару на трех резервуарах. Из 46 взрывов заземленных резервуаров, зарегистрированных за определенный период в США, 44 взрыва возникли при наливке и перемешивании продуктов, а два — при отстое капелек воды [40].

В другом случае указывается [41], что при операциях с дистиллятными топливами количество взрывов и пожаров от разрядов статического электричества в крупных резервуарах возросло. Взрывы наблюдались в резервуарах любой емкости: от резервуара автоцистерны до танкеров и больших резервуаров для смешения и хранения топлив. В качестве причины увеличения числа взрывов указываются повышение скоростей перекачки и возрастание числа операций с топливом. Более 25 случаев воспламенения нефтепродуктов произошло из-за образования статического электричества при наливке автоцистерн.

Имеется описание [42] взрыва резервуара от разряда статического электричества. При экспертизе было установлено, что шаровой поплавок для измерения уровня жидкости находился только на одном направляющем тросе, а вокруг второго направляющего троса он поворачивался на 360°. Поскольку скорость закачки бензина была завышена в 1,5 раза, эксперты пришли к правильному выводу, что на поверхности жидкости быстро скопилось статическое электричество и свободно вращающийся поплавок приобрел значительный потенциал, который при контакте с системой заземления через трос вызвал искровой разряд.

Известен случай взрыва на нефтеперегонном заводе, где причиной взрыва явилось статическое электричество. Материальный ущерб от последствий этого взрыва составил многие сотни тысяч рублей. На одном из анилино-красочных заводов от разряда статического электричества произошел взрыв в аэросушилке. Взрывы по этой причине наблюдались и на производствах искусственной шерсти при процессе сублимации и др.

Разряды статического электричества являются причиной крайне разрушительных взрывов на сахарных и серных заводах, в зернохранилищах и при транспортировании угля. Некоторые авторы считают, что 60% всех взрывов на производствах, имеющих дело с тонкораздробленными веществами, происходит по этой причине.

#### **4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Самыми простыми индикаторами электростатических потенциалов могут служить лампы тлеющего разряда, однако их применение возможно только при высоких значениях потенциалов.

В качестве указателей электростатических потенциалов можно применять электроскопы и электрометры, в том числе наиболее совершенные и точные — квадрантные и струнные.

Для непосредственного измерения электростатической разности потенциалов могут быть использованы электростатические вольтметры, которые, по существу, представляют собой видоизменение электрометров с листочками. Отечественная промышленность выпускает следующие типы статических вольтметров: С-50 и С-95 с верхними пределами измерения от 30 до 3000 в; С-96 с верхними пределами измерения от 7,5 до 30 кв. Измерительный механизм приборов состоит из подвижного и неподвижного электродов, изолированных друг от друга. Неподвижный электрод укреплен на специальной изоляционной стойке; подвижный электрод соединен с электростатическим экраном. К электродам подводится измеряемое напряжение, под действием которого поворачивается подвижный электрод; угол его поворота указывает величину приложенного напряжения.

При измерениях статическими вольтметрами необходимо иметь в виду, что напряжения, показываемые прибором, не являются абсолютной величиной измеряемого напряжения заряженного предмета.

Недостатками всех указанных приборов и способов измерения являются: не всегда достаточная точность; необходимость наличия во всех случаях металлических электродов и контакта с наэлектризованной поверхностью, что иногда затруднительно; опасность применения во взрывоопасных помещениях, так как искра, которая может проскочить с заряженной поверхности на металли-

ческий электрод, обычно имеет энергию, достаточную для того, чтобы воспламенить взрывоопасную смесь. Кроме того, следует указать на особую предосторожность (по условиям техники безопасности) при пользовании указанными приборами

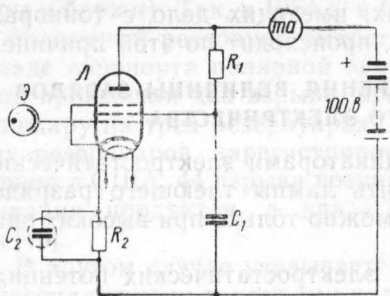


Рис. 44. Принципиальная схема прибора для обнаружения зарядов статического электричества

при измерениях высоких величин электростатических потенциалов.

В литературе [43] приводится описание прибора для определения наличия и знака зарядов статического электричества, а также для проверки эффективности действия нейтрализаторов или увлажнителей. Кроме того, этот прибор пока-

зывает, ликвидируется ли электростатический заряд на деталях оборудования при наличии заземления. Схема прибора приводится на рис. 44.

Принцип работы прибора основан на следующем. От приложенной разности потенциалов через лампу Л (6Ж1П) протекает ток, величину которого показывает гальванометр та. К управляющей сетке лампы присоединен экран Э, который помещается в электростатическое поле. При поднесении экрана к оборудованию с отрицательным зарядом на экране индуцируется положительный заряд, а электроны, поступая на управляющую сетку лампы, запирают ее, после чего анодный ток в цепи прекращается и стрелка гальванометра отклоняется к нулю. Аналогичная картина происходит при удалении экрана от положительно заряженного предмета. В том и другом случаях гальванометр снова покажет анодный ток, как только вследствие утечки рассеются электрические заряды, вызванные индукцией на управляющей сетке лампы.

Напряжение на экранную сетку подается через сопротивление  $R_1$  (1,3 Мом). Для фильтрации переменной составляющей экранного тока поставлена емкость  $C_1$  (0,1 мкф). Смещение на сетке создается сопротивлением  $R_2$  (1 ком) и емкостью  $C_2$ .

После подключения питания и прогрева лампы стрелку гальванометра устанавливают на определенное деление шкалы, причем если поднести прибор к детали оборудования, не содержащей электростатических зарядов, то положение стрелки гальванометра не изменится. Если же при этом стрелка все же отклонится к нулю, значит деталь содержит отрицательный заряд. При поднесении индикатора к положительно заряженному предмету стрелка гальванометра также не изменит своего положения, но при удалении от предмета она отклонится к нулю.

Прибор весьма чувствителен к слабым электрическим полям, поэтому он может быть использован для проверки эффективности заземлений и нейтрализаторов. Преимуществом этого прибора является то, что он не требует непосредственного контакта с жидкостями и частями оборудования. Кожух прибора полностью герметичен.

В литературе [37, 38, 44] имеются описания приборов для измерения поверхностной плотности электростатических зарядов, а также для измерения напряженности и полярности электростатического поля. Работа приборов основана либо на принципе электростатического генератора, либо на принципе измерения ионизационного тока, возникающего под действием поля.

Рассматриваемые приборы использовались для исследований электризации светлых нефтепродуктов и проверки эффективности защитных мероприятий по снижению электризации жидкостей (например, токоснимающих секток внутри трубопроводов, оптимальных скоростей перекачки жидкостей и т. д.), при лабораторных и заводских исследованиях электризации и нейтрализации электростатических зарядов, при производстве резинотехнических изделий, при работе с диэлектрическими порошками и т. д.

Некоторые из приборов могут быть использованы во взрывоопасных помещениях, так как имеют взрывозащищенное исполнение.

## **5. СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ОПАСНОСТИ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Для разработки способов устранения опасности статического электричества необходимо:

а) установить причины, обуславливающие электризацию материалов, оборудования и людей;



б) замерить величину генерируемого напряжения электростатического поля (или напряженность поля) или поверхностную плотность электростатических зарядов;

в) измерить или рассчитать электрическую емкость системы.

По действующим правилам [45] защита от разрядов статического электричества должна осуществляться во взрыво- и пожароопасных производствах, отнесенных по СНиП к категориям А и Б (или по ПУЭ к помещениям классов В-I, В-Ia, В-II, В-IIa, П-I и П-II), где применяются или получают вещества, удельное электрическое сопротивление которых превышает  $10^6$  ом см (см. приложение II).

Производства, которые не относятся к указанным категориям, следует защищать лишь в тех случаях, когда статическое электричество представляет опасность для обслуживающего персонала или отрицательно влияет на технологический процесс или качество продукции.

Основными способами устранения опасности статического электричества (расположенными ниже в соответствии со степенью эффективности и частоты применения) являются:

1) заземление оборудования, коммуникаций и емкостей, в которых возникает статическое электричество, способное накапливаться;

2) увеличение поверхностной проводимости повышением относительной влажности воздуха или применением антистатических примесей;

3) ионизация воздуха или среды, в частности внутри аппарата, емкости и т. д.;

4) предотвращение образования взрывоопасных концентраций.

Выбор способа на практике производится в зависимости от его эффективности в конкретных условиях и экономической целесообразности. Рассмотрим сущность указанных способов.

### **Заземление**

Во всех случаях, когда оборудование выполнено из токопроводящих материалов, заземление является основным и, как правило, достаточным способом устранения опасности статического электричества. Однако в ряде случаев, когда на поверхности или внутренних стенках металлических аппаратов, резервуаров и трубопроводов



образуются отложения из неэлектропроводящих веществ (смолы, пленка, осадки), заземление становится неэффективным и, больше того, создается ложное впечатление о надежности и безопасности.

Устранение опасности заземлением не достигается и в случаях применения аппаратов с эмалированными или другими электронепроводящими поверхностями.

Оборудование следует считать электростатически заземленным тогда, когда сопротивление утечки тока в любой точке при самых неблагоприятных условиях (повышенной сухости воздуха и др.) не превышает  $10^6$  ом.

Заземлять необходимо все металлические конструкции машин и аппаратов, резервуары, газгольдеры, закрытые и открытые транспортеры, сливно-наливные устройства, трубопроводы и др., расположенные как внутри помещений, так и вне его и предназначенные для переработки, хранения, транспортирования горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, горючих газов и пылевидных горючих продуктов.

Трубопроводы наружных установок (на эстакадах или в каналах), системы оборудования и трубопроводов, расположенные в цехе, должны представлять на всем протяжении непрерывную электрическую цепь и присоединяться к заземляющим устройствам. При этом следует считать, что фланцевые соединения трубопроводов, аппаратов, соединения корпусов аппаратов с крышками и др. образуют достаточные по электрической проводимости контакты, не требующие установки специальных шунтирующих перемычек. В условиях повышенной агрессивности среды рекомендуется тщательно зачищать поверхность под головками и гайками не менее чем у двух болтов с прокладкой под ними луженых шайб.

Каждая система аппаратов и трубопроводов в пределах цеха должна быть заземлена не менее чем в двух местах.

Все резервуары емкостью более  $50\text{ м}^3$  должны быть заземлены не менее чем в двух противоположных местах; нельзя допускать в резервуарах на поверхности горючих жидкостей каких-либо плавающих предметов. Следует избегать также применения поплавковых измерителей уровня, а в случае их использования необходимо соблюдать особую осторожность: поплавки должны быть укреплены на металлических струнах таким образом, чтобы исключить возможность их отрыва и приближения

к стенкам резервуара, так как при этом может возникнуть искровой разряд в результате накопления статического электричества на поплавке и вызвать взрыв (см. выше, 3).

Испытания на воспламенение топлива в присутствии плавающих предметов в резервуаре емкостью 37,8 м<sup>3</sup> неоднократно показывали, что разряды происходили от небольших металлических поплавков [46], поэтому все предметы, находящиеся в резервуарах, должны иметь достаточно надежное электрическое соединение с корпусом.

Наливные стояки эстакад для заполнения железнодорожных цистерн и рельсы железнодорожных путей в пределах сливно-наливного фронта должны быть электрически соединены между собой и надежно заземлены.

Автоцистерны, а также наливные суда, находящиеся под наливом и сливом горючих жидкостей и сжиженных горючих газов, должны на время наполнения присоединяться к заземлению.

При сливе горючих жидкостей по резиновым рукавам (шлангам) также образуется статическое электричество, поэтому на сливные рукава надевают наконечники из цветного металла, которые электрически соединяются через тросики или спирали рукавов с корпусом цистерны, бочкой и т. д. При повреждении заземления рукавов происходит искрение, а по этой причине неоднократно возникали пожары. И в то же время на практике повреждение или отсутствие заземления рукавов встречается часто. Так, при одном из обследований бензовозов и бензоправщиков из 104 обследованных машин только у 19 рукава имели наконечники и исправное заземление [47].

Учитывая малые величины разрядных токов (*ма*) при статической электризации, сопротивление заземляющего устройства допускается до 100 *ом*.

### **Увеличение поверхностной проводимости**

Устранение опасности при статической электризации диэлектриков может быть достигнуто за счет увеличения их поверхностной проводимости. Существуют два способа, которыми можно увеличить поверхностную проводимость.

**Повышение относительной влажности воздуха.** Наблюдения показывают, что большинство пожаров и взрывов от искр статического электричества происходит обыч-

но в зимние месяцы, когда относительная влажность воздуха низка. Влияние относительной влажности воздуха на процесс статической электризации хорошо видно из рис. 45, на котором показана зависимость количества пожаров на машинах для прорезинивания тканей от времени года [38].

При высокой относительной влажности воздуха отвод зарядов связывают с тем, что на поверхности электризующихся материалов адсорбируется пленка влаги. Эта пленка обычно содержит достаточное количество ионов из загрязнений и растворенных веществ, поэтому поверхностная проводимость веществ увеличивается. Так, например, чистый фарфор в атмосфере с относительной влажностью (порядка 50%) обладает сопротивлением  $10^5$  Мом, а при относительной влажности выше 70% сопротивление фарфора заметно снижается и при 90% достигает  $10^3$  Мом. Сопротивление фарфора становится еще меньшим вследствие отложения тонкого слоя соли, если его поверхность соприкасается с наружным воздухом.

Однако если материал содержится при температуре, более высокой, чем та, при которой пленка может удержаться на поверхности, то указанная поверхность не может стать проводящей даже при очень высокой относительной влажности воздуха. Эффекта за счет увеличения относительной влажности не достигается и в том случае, если скорость перемещения заряженного материала больше, чем скорость образования поверхностной пленки. Учитывая сказанное, этот способ уменьшения опасности статической электризации нельзя считать всегда эффективным. Так, например, на одном из заводов резинотехнических изделий в помещении клеепромазочных машин относительная влажность воздуха искусственно поддерживалась до 75%, однако количество загораний от статического электричества оставалось большим. Кроме того,

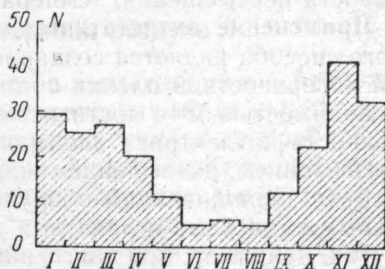


Рис. 45. Количество пожаров на машинах для прорезинивания тканей в отдельные месяцы

способ увлажнения не всегда возможен и по соображениям технологического порядка, так как пленка влаги может ухудшить качество материала и привести к браку продукции.

Многие авторы считают достаточной относительную влажность, равную в среднем 70%, однако граница достаточной влажности зависит от ряда факторов и определяется исходя из конкретных условий (увлажняемости, скорости перемещения, температуры материалов и т. д.).

**Применение антистатических примесей.** Сущностью этого способа является создание временной или постоянной поверхностной пленки с достаточной электрической проводимостью. Это достигается при нанесении на поверхность диэлектрика электропроводящих веществ разбрызгиванием, распылением или испарением металла в вакууме, окрашиванием оборудования и изделий специальными красками и лаками и т. д.

Так, например, при нанесении специальной токопроводящей краски на поверхность стеклянного трубопровода в виде трех симметрично расположенных полос с последующим их соединением по окружности медной фольгой и ее заземлением потенциал зарядов, возникающих от статической электризации при транспортировании шерстяных очесов, снижался в 6—7 раз.

Для повышения поверхностной проводимости рекомендуется применять полупроводниковые керамические покрытия, пленки которых содержат  $F_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $Cr_2O_3$  и другие соединения. Рекомендуются также покрытия из окиси олова и хлорида олова, которые обладают достаточно высокой и устойчивой электропроводностью.

Пленки углерода могут быть получены на поверхности диэлектриков путем осаждения из газообразных углеводородов при высокой температуре. Эти пленки обладают сопротивлением примерно  $10^2$ — $10^4$  ом. Проводимость изделий и оборудования следует считать достаточной, если их электрическое удельное сопротивление менее  $10^7$  ом см.

Иногда во взрывоопасных производствах применяют ременные передачи и ленточные транспортеры. При их работе возникают заряды статического электричества, потенциал которых достигает нескольких десятков киловольт. Это может привести к сильному искрению и вызвать взрыв и пожар. В этом случае наиболее действенным способом снижения потенциала зарядов является увеличение поверхностной проводимости ремня при обязатель-

ном заземлении установки. Для этого на внутреннюю поверхность ремня рекомендуется наносить антистатическую смазку, возобновляемую не реже 1 раза в неделю. Для кожаных и резиновых ремней рекомендуется, например, смазка следующего состава: на 100 *вес. ч.* глицерина — 40 *вес. ч.* сажи. Иногда хорошие результаты по снижению опасных потенциалов на приводных ремнях и лентах транспортеров дают увеличение относительной влажности воздуха, снижение линейной скорости ремня и т. д.

### Ионизация воздуха

Сущность этого способа заключается в нейтрализации поверхностных электростатических зарядов ионами, которые получаются с помощью специального прибора, называемого нейтрализатором. Нейтрализатор создает большое число положительных и отрицательных ионов, которые, взаимодействуя с противоположными зарядами статического электричества, нейтрализуют их. Ионизация воздуха для указанных целей осуществляется в настоящее время исключительно двумя способами: действием электрического поля высокого напряжения и радиоактивным излучением.

**Ионизация воздуха электрическим полем высокого напряжения.** Ионизация воздуха по этому способу осуществляется нейтрализаторами двух типов: индукционными и высоковольтными.

Индукционные нейтрализаторы являются самыми простыми и применяются уже давно. Имеются два типа индукционных нейтрализаторов: с остриями и проволочный. Нейтрализатор с остриями (рис. 46, а) состоит из деревянного или металлического стержня 1, на котором укреплены заземленные острия, тонкие проволочки или фольга. У проволочного нейтрализатора (рис. 46, б) вместо острий имеется тонкая стальная проволочка, натянутая поперек движущегося заряженного материала 2.

Действие индукционных нейтрализаторов основано на использовании электрического поля наэлектризованного тела, и постороннего источника напряжения для них не требуется. Они обладают высокой ионизационной способностью, особенно при высоких потенциалах заряженного тела. Проволочные нейтрализаторы менее эффективны, у них более слабый ионизационный ток и более высокое предельное напряжение, при котором начи-

нается ионизация воздуха. Общим недостатком для них является то, что они начинают действовать только после того, как напряжение наэлектризованного тела достигнет нескольких киловольт.

В работах [38, 48] указывается на то, что индукционные нейтрализаторы являются взрывобезопасными и их можно устанавливать во взрывоопасных средах. Это под-

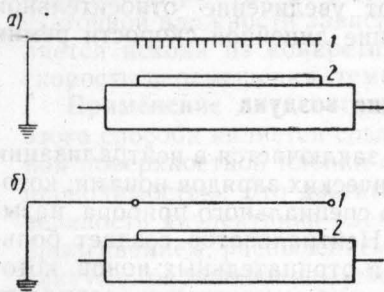


Рис. 46. Принципиальная схема индукционного нейтрализатора

а — схема нейтрализатора с острыми;  
б — схема проволочного нейтрализатора

тверждается тем, что минимальная энергия для воспламенения, например, паров бензина равна 1,1—3 дж. Опыты и расчеты показали, что искрение с такой энергией возникает на индукционном нейтрализаторе только при наличии на заряженном теле потенциала порядка 63 кв. Если минимальная энергия воспламенения взрывоопасных смесей равна примерно 0,001 дж, то

искрение с такой энергией может начаться на нейтрализаторе только при потенциале около 45 кв.

Практически достижение таких потенциалов при наличии индукционных нейтрализаторов невозможно, так как интенсивная нейтрализация электростатических зарядов начинается при значительно более низких потенциалах (5—10 кв). Неисправный нейтрализатор представляет большую опасность, так как может послужить причиной искрообразования и взрыва.

Высоковольтные нейтрализаторы бывают трех типов: работающие на переменном и постоянном токе и токе высокой частоты. Их принцип действия, основанный на ионизации высоким напряжением, одинаков, но эффективность нейтрализаторов различна. Достоинством всех трех типов нейтрализаторов является то, что они производят достаточное ионизирующее действие и при низких потенциалах заряженного тела.

Недостатком высоковольтных нейтрализаторов является необходимость источника тока и большая энергия возникающих искр, способных воспламенить любые газо-



паро- и пылевоздушные взрывоопасные смеси. Поэтому применение их во взрывоопасных помещениях возможно только при взрывозащищенном исполнении или при осуществлении ряда мер предосторожности.

Нейтрализатор переменного тока (рис. 47) промышленной частоты состоит из ионизатора-индуктора 3 и трансформатора 1 высокого напряжения. Индуктор имеет

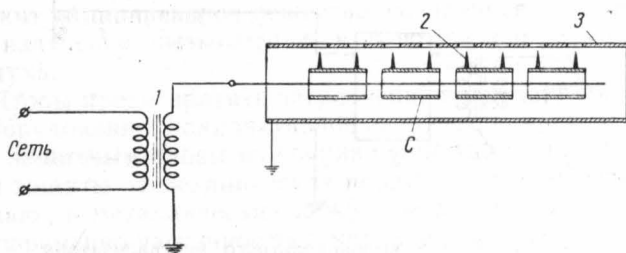


Рис. 47. Схема высоковольтного нейтрализатора переменного тока

вид длинной трубки с отверстиями, внутри которой закреплены ионизирующие стержни 2. Стержни связаны трансформатором либо через емкость, образуемую самой конструкцией индуктора, либо через конденсатор С, включаемый между индуктором и трансформатором. Емкостная связь стержней с источником питания имеется для того, чтобы ограничить величину тока в цепи индуктора до безопасной величины и тем самым обезопасить обслуживающий персонал при случайном прикосновении к корпусу нейтрализатора.

Этот тип нейтрализаторов прост по конструкции, достаточно эффективен, особенно при больших скоростях движения заряженных поверхностей, и позволяет, кроме того, снимать небольшие начальные заряды. Ионизация при помощи этих нейтрализаторов характеризуется образованием ионов обоих знаков, т. е. они являются биполярными. Биполярные ионизаторы обладают тем преимуществом, что с их помощью можно почти полностью нейтрализовать заряд любого знака. Эта особенность представляет практический интерес, так как во многих промышленных процессах трудно контролировать постоянно величины потенциала и знак статического заряда.

Нейтрализатор постоянного тока по сравнению с нейт-



рализатором переменного тока имеет некоторые преимущества: большая дальность действия, меньшее влияние емкости проводов, упрощающее подведение высокого напряжения, более удобный монтаж электродов и др.

Нейтрализатор (рис. 48) состоит из ионизирующих электродов 1, высоковольтного трансформатора 2 и выпрямителя высокого напряжения 3. Ионизирующие элект-

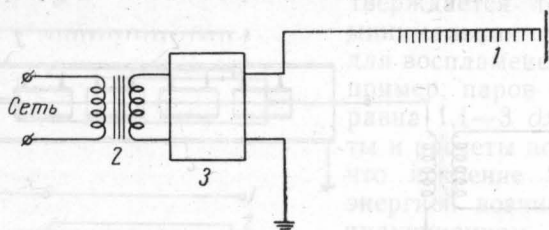


Рис. 48. Схема высоковольтного нейтрализатора постоянного тока

роды изготовляют различной длины в зависимости от ширины обрабатываемого материала или машины; соединение электродов с выпрямителем осуществляется кабелем высокого напряжения.

Ионизация воздуха этими нейтрализаторами может сопровождаться образованием ионов обоих знаков или ионов одного знака.

Высокочастотные нейтрализаторы по сравнению с рассмотренными более безопасны для обслуживающего персонала, однако они значительно сложнее по устройству и состоят из ионизирующих стержней, источника напряжения высокой частоты и высоковольтного трансформатора. Источником напряжения высокой частоты служит обычно либо ламповый генератор, либо вибратор.

Общим и существенным недостатком высоковольтных нейтрализаторов является то, что работа их в атмосфере воздуха приводит к образованию озона и окиси азота, которые являются сильно раздражающими газами. Длительное пребывание в атмосфере воздуха, содержащего эти газы даже в незначительной концентрации, может привести к хроническому раздражению органов дыхания [36]. Следовательно, при эксплуатации этих нейтрализаторов необходимо придерживаться ряда мер предосторожности и по этой причине.

**Ионизация воздуха радиоактивными нейтрализаторами.** Радиоактивные нейтрализаторы очень просты по устройству, не требуют источника питания и достаточно эффективны, поэтому они получают все большее применение, особенно во взрывоопасных помещениях, так как полностью взрывобезопасны. Нейтрализаторы этого типа чаще всего имеют вид длинных плоских пластинок или маленьких круглых тарелочек, одна сторона которых содержит радиоактивное вещество, создающее радиоактивное излучение, вызывающее, в свою очередь, ионизацию воздуха.

Чтобы предотвратить загрязнение воздуха, продукции и оборудования, радиоактивное вещество покрывают тонким защитным слоем из специальной эмали или фольги. Для защиты от механических повреждений пластины помещают в металлический кожух, который обеспечивает одновременно частичное экранирование и создает нужное направление ионизирующего излучения.

Подбор радиоактивного вещества производят на основании учета целого ряда свойств: энергии частиц излучения, длины пробега частиц, характера взаимодействия излучения с молекулами газов, входящих в состав воздуха, действия излучения на людей.

Энергия частиц должна быть достаточно большой, чтобы создать достаточное число ионов при незначительном количестве самого радиоактивного вещества. Длина пробега частиц в воздухе должна быть по возможности меньшей, а характер взаимодействия с молекулами газа должен быть таким, чтобы вся энергия шла на создание ионов.

Указанным требованиям наиболее полно отвечают радиоактивные вещества, распад которых сопровождается излучением  $\alpha$ -частиц.

$\alpha$ -частицы представляют собой поток положительно заряженных ядер атомов гелия, обладают большой энергией порядка 5—8 Мэв и небольшой длиной пробега в воздухе (примерно 3—7,5 см). Проницаемость их в более плотных средах очень мала, и частицы можно полностью поглотить обычной писчей бумагой. На 1 см своего пробега одна  $\alpha$ -частица создает до 30 000 пар ионов.

Для ионизации воздуха применяют радиоактивные вещества и с излучением  $\beta$ -частиц, которые представляют собой поток электронов, вылетающих из ядер радиоактивного вещества со скоростью, близкой к скорости света.

Масса  $\beta$ -частицы в 7360 раз меньше массы  $\alpha$ -частицы. Длина пробега частицы в воздухе составляет несколько метров. На 1 см пути пробега  $\beta$ -частица создает около 100 пар ионов.

В нейтрализаторах с  $\alpha$ -излучением обычно используются следующие радиоактивные вещества: полоний-208 и 210, радий-226; плутоний-238, 239 и 240, а в нейтрализаторах с  $\beta$ -излучением: таллий-204, стронций-90, сера-35, прометий-147, криптон-85 и др.

Исследования [37] ионизационной способности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателей показали, что  $\alpha$ -излучатели могут применяться для местной ионизации воздуха с целью нейтрализации электростатических зарядов в месте их образования. Там же, где необходимо нейтрализовать электростатические заряды в объеме аппарата, лучше всего использовать  $\beta$ -излучатели.

При применении радиоактивных нейтрализаторов необходимо обязательно предусматривать надежную защиту людей, оборудования и выпускаемой продукции от вредного воздействия радиоактивного излучения.

### **Предотвращение образования взрывоопасных конструкций**

В ряде случаев рассмотренные способы уменьшения опасности статической электризации могут оказаться малоэффективными или неприемлемыми во взрывоопасных производствах, поэтому в подобных обстоятельствах следует создавать такие условия, которые исключали бы образование взрывоопасных концентраций, например применение в резервуарах плавающих крыш, заполнение свободного пространства в аппаратах азотом или углекислотой, применение постоянно действующей вентиляции с высокой кратностью обмена воздуха, а также автоматическое включение аварийной вентиляции и т. д.

Иногда удовлетворительные результаты дает изменение технологического процесса отдельных производственных операций или замена горючих растворителей на негорючие.

Так, например, на одном из объектов химической промышленности [49] уменьшение опасности статической электризации было достигнуто путем изменения технологического процесса загрузки компонентов в массомешатели. Раньше загрузка производилась в такой последова-

тельности, при которой через 20—25 мин на внутренней поверхности машины образовывалась сухая диэлектрическая пленка и бензин загружался в последнюю очередь. При этой последовательности загрузки массомешателей на поверхности массы накапливались электростатические заряды с потенциалом порядка 11—13 кВ, отводу которых через контур заземления препятствовала сухая диэлектрическая пленка. Кроме того, содержание паров бензина внутри объема массомешателя всегда было выше нижнего предела взрываемости — от 2,75 до 3,18%.

Загрузку компонентов по измененной технологии проводили так: в остановленный массомешатель сначала заливали бензин, затем загружали каучук, окись цинка, железный сурик и запускали машину. После 60 мин перемешивания массы засыпали ускорительную группу и асбест, доливая недостающий бензин.

Первоначальное введение окиси цинка и железного сурика увеличивает поверхностную и объемную проводимость массы, при этом возникшие заряды отводятся раньше, чем образуется на стенках диэлектрическая пленка.

Произведенными замерами было установлено, что величина потенциала электростатических зарядов на поверхности массы в массомешателях снижалась до 400 в и даже 0. При такой величине потенциала электростатические заряды не представляют опасности.

В другом случае [38] при производстве мелтона (для теннисных мячей) на заводах по производству красок возникали частые пожары от искр статических зарядов, так как воспламенялись пары бензина. При замене бензина трихлорэтиленом пожары прекратились, хотя потенциал зарядов достигал 15 кВ.

### **Дополнительные способы уменьшения опасности статической электризации горючих жидкостей**

Опасность статической электризации легковоспламеняющихся и горючих жидкостей может быть значительно снижена или даже устранена рядом дополнительных способов.

Как известно, движение жидких углеводородов относительно твердого, жидкого или газообразного тела может привести к разделению электрических зарядов на по-

верхности соприкосновения. При движении жидкости слой находящихся в ней зарядов уносится ее потоком, а заряды противоположного знака остаются на трубе и в том случае, если она металлическая и заземлена, утекают в землю. Если при этом металлический трубопровод изолирован от земли или изготовлен из диэлектрических материалов, он приобретает положительный заряд, а жидкость — отрицательный.

Степень электризации нефтепродуктов зависит от состава и концентрации содержащихся в жидкости активных примесей, физико-химического состава внутренней поверхности трубопровода и ее состояния (коррозии и т. д.), диэлектрических свойств, вязкости и плотности жидкости, а также от скорости движения жидкости, диаметра и длины трубопровода.

Так, например, присутствие 0,001% механических примесей превращает инертное углеводородное топливо в электризуемое до опасных пределов. При ламинарном потоке степень электризации пропорциональна скорости движения жидкости и не зависит от диаметра трубопровода, а при турбулентном потоке она пропорциональна скорости движения жидкости в степени 1,75 и диаметру трубопровода в степени 0,75. Заряды статического электричества более интенсивно возникают в трубах с шероховатой внутренней поверхностью.

Простым и эффективным способом предотвращения возникновения электростатических зарядов (там, где это возможно) является увеличение электропроводности жидкости с помощью антистатических присадок. Так, при добавлении к бензолу уксусной кислоты и токопроводящих солей (олеино-кислого магния) опасность возникновения электростатических зарядов снижается.

Другим способом предотвращения возникновения электростатических зарядов является уменьшение скорости движения жидкостей — диэлектриков. Так, например, для этилового эфира (при диаметре трубопровода до 12 мм) и для сероуглерода (при диаметре трубопровода до 24 мм) максимально допустимые скорости составляют 1—1,5 м/сек. При больших диаметрах скорость движения этих жидкостей должна быть меньше и не превышать 1 м/сек. Для метилового и этилового спиртов допустимая скорость движения в трубах не должна превышать 2—3 м/сек, а для сложных эфиров, кетонов и спиртов — 9—10 м/сек.

При использовании диэлектрических жидкостей следует исключать возможность их загрязнения коллоидными частицами. При сливе жидкостей нельзя их перемешивать, распыливать или разбрызгивать; при наливе жидкости 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 емкость ниже уровня имеющегося в них остатка жидкости.

## **6. ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

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

Согласно действующим правилам [45] 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. Ревизию заземляющих устройств при помощи приборов нужно производить не реже 1 раза в шесть месяцев, а результаты ревизии и ремонтов защитных устройств следует заносить в специальный журнал.

Для каждого цеха с учетом специфических особенностей должна быть разработана инструкция по эксплуатации устройств защиты от статического электричества.

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

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

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

## МИНИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРО- И ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

(при давлении 1 атм и температуре 20°C)

Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж	Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж
Сероуглерод . . . . .	0,009	Гексан . . . . .	0,24
Водород . . . . .	0,019	Бутан . . . . .	0,25
Окись этилена . . . . .	0,06	Этан . . . . .	0,25
Циклопропан . . . . .	0,17	Пропан . . . . .	0,26
Ацетилен . . . . .	0,19	Метан . . . . .	0,28
Диэтиловый эфир . . . . .	0,19	Этиловый эфир . . . . .	0,45
Бензол . . . . .	0,2	Этилацетат . . . . .	0,5
Циклогексан . . . . .	0,22	Бутилацетат . . . . .	0,5
Гептан . . . . .	0,24	Бутиловый спирт . . . . .	0,5
Ацетон . . . . .	0,6	Метиловый » . . . . .	0,6
Этиловый спирт . . . . .	0,65	Сероводород . . . . .	7
Диоксан . . . . .	0,9	Окись углерода . . . . .	8
Диэтиловый спирт . . . . .	1,5	— . . . . .	—

Таблица 2

## МИНИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж	Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж
Ацетилцеллюлозная пресс-масса . . . . .	10	Фенольная смола . . . . .	10
Гексаметиленetetрамин . . . . .	10	» пресс-масса . . . . .	10
Инден-кумароновая смола . . . . .	10	Поливинилбутираль . . . . .	10
		Шеллак . . . . .	10
		п-Оксибензальдегид . . . . .	15



Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж	Вещества, входящие в состав смеси	Минимальная энергия воспламенения в мдж
Стеарат алюминия . . . . .	15	Полистирольная пресс-масса . . . . .	40
Ацетилцеллюлоза . . . . .	15	Алюминий . . . . .	50
Сера . . . . .	15	Эбонит сырой . . . . .	50
Цирконий . . . . .	15	Пропионат целлюлозы . . . . .	60
Полиметилметакрилат . . . . .	17	Казеин . . . . .	60
Древесная мука . . . . .	20	Полиэтилен . . . . .	80
Лигниновая смола . . . . .	20	Цинк . . . . .	100
Магний . . . . .	20	Метилметакрилат . . . . .	105
Магnezия . . . . .	25	Полистирол . . . . .	120
Резина из синтетического каучука . . . . .	30	Поливиниловая смола . . . . .	160
Уголь . . . . .	40	Ферромарганец . . . . .	250

## ПРИЛОЖЕНИЕ II

## УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ

Вещество	Удельное электрическое сопротивление в ом·см
Серебро . . . . .	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Медь . . . . .	$1,7 \cdot 10^{-6}$
Резина электропроводящая . . . . .	$2 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^8$
Графит . . . . .	$8 \cdot 10^2 - 1,4 \cdot 10^3$
Почва . . . . .	$6 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^5$
Дистиллированная вода . . . . .	$10^6$
Волокнистые вещества . . . . .	$10^9$
Искусственные смолы . . . . .	$10^9 - 10^{14}$
Натуральный каучук . . . . .	$10^{14} - 10^{15}$
Эбонит . . . . .	$10^{14} - 10^{15}$
Сухое дерево . . . . .	$10^{10} - 10^{16}$
Сера . . . . .	$10^{17}$
Жидкие углеводороды . . . . .	$10^{10} - 10^{18}$
Полистирол . . . . .	$10^{17} - 10^{18}$
Парафин . . . . .	$10^{18}$
Стекло . . . . .	$10^{13} - 10^{16}$

Примечание. Удельное электрическое сопротивление вещества зависит от степени чистоты вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стекольников И. С. Природа длинной искры. Изд. АН СССР, 1960.
2. Стекольников И. С. Молния. Изд. АН СССР, 1940.
3. Стекольников И. С. Физика молнии и грозозащита. Изд. АН СССР, 1943.
4. Стекольников И. С., Комельков В. С., Богомолов А. Ф., Лихачев Ф. А., Борисов В. Н., Лопшиц Л. М. Грозозащита промышленных сооружений и зданий. Изд. АН СССР, 1951.
5. Долгинов А. И. Перенапряжения в электрических системах. Госэнергоиздат, 1962.
6. Борисоглебский П. В., Дмоховская Л. Ф., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С., Разевиг Д. В., Рябкова Е. Я. Техника высоких напряжений. Госэнергоиздат, 1963.
7. Разевиг Д. В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. Госэнергоиздат, 1959.
8. Костенко М. В. Атмосферные перенапряжения и грозозащита высоковольтных установок. Госэнергоиздат, 1949.
9. Комельков В. С. Исследование максимальной крутизны фронта волн тока молнии. «Электричество» № 5, 1941.
10. Комельков В. С. Термическое действие токов молнии. «Электричество» № 4, 1946.
11. Нориндер Х. Исследования грозовых разрядов. Серия «Энергетика за рубежом». Госэнергоиздат, 1956.
12. Archiwum Elektrotechniki, vol. 6, № 1, 1957.
13. Дж. Мик, Дж. Крэгс. Электрический пробой в газах. ИЛ, 1960.
14. Указания по грозозащите зданий и сооружений и защите от статического электричества. Воениздат, 1958.
15. Временные руководящие указания по грозозащите и защите от проявлений статического электричества производственных установок и сооружений нефтяной промышленности. Гостоптехиздат, 1956.
16. Временные указания по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений (СН 305—65).
17. Руководящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3—220 кв. Госэнергоиздат, 1954.
18. Ларионов В. П. Защита жилых домов и производственных сооружений от молнии. Госэнергоиздат, 1960.
19. Черкасов В. Н. Молниезащита взрывоопасных зданий и сооружений. Изд. ВШ МООН РСФСР, 1964.
20. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. Изд. МГУ, 1957.
21. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. Изд. МКХ РСФСР, 1962.

22. Ульященко В. Е. Исследование взрывобезопасности электрооборудования в различных взрывчатых средах. Диссертация, 1958.

23. Таубкин С. И. Алюминиевая пыль. «Пожарное дело» № 12, 1962.

24. Oil Tank Fires, Engineering News-Record, p. 66—68, vol. 157, № 14, 1956.

25. Абрамсон И. С., Маршак Э. С. ЖТФ, 12, 632, 1942.

26. Абрамсон И. С., Гечечкори Н. М. Осциллографические исследования искрового разряда. ЖЭТФ, т. 21, вып. 4, 1951.

27. Питула А. Ф. Нефтесклады США. ОНТИ, 1937.

28. «Промышленная энергетика» № 4, 1959.

29. Лопшиц Л. М. Номограмма для определения зон защиты стержневых молниеотводов. «Электричество» № 7, 1957.

30. Акопян А. А. Импульсная прочность грунтов. «Электричество» № 6, 1940.

31. Всесоюзное совещание по заземлениям (тезисы докладов и решение). ХПИ, 1958.

32. Найфельд М. Р. Заземления и защитные меры безопасности. Изд. «Энергия», 1965.

33. Ракович И. И. Электрооборудование взрывоопасных производств. Изд. «Энергия», 1964.

34. Метеорология и атомная энергия. ИЛ, 1959.

35. Батунер Л. М., Позин М. Е. Математические методы в химической технике. Госхимиздат, 1960.

36. Лёб Л. Статическая электризация. Госэнергоиздат, 1963.

37. Ройзен И. С., Медведева В. С. Статическое электричество и меры по борьбе с ним в химической промышленности. Сб. «Охрана химических предприятий от пожаров и взрывов». НИИТЭХИМ, 1961.

38. Староба И. и Шиморда И. Статическое электричество в промышленности. Госэнергоиздат, 1960.

39. Перевод № 2483/1 со шведского языка. Бюро переводов Всесоюзного института научной и технической информации, М., 1962.

40. Егоров В. Электризация нефтепродуктов. «Пожарное дело» № 9, 1961.

41. «Транспорт и хранение нефти» № 10, 1963.

42. «Пожарное дело» № 9, 1963.

43. Шихов В. Н. Прибор для обнаружения зарядов статического электричества. «Нефтяное хозяйство» № 8, 1962.

44. Шихов В. Н., Попов Е. Ф. Приборы для измерения величин зарядов статического электричества. «Нефтяное хозяйство» № 12, 1963.

45. Правила защиты от статического электричества в производствах химической промышленности. Госхимиздат, 1963.

46. Роджерс Д. Т., Шлексер Ц. Е. Теоретические и экспериментальные исследования электризации топлива. Доклады V Международного нефтяного конгресса, т. IV, Гостоптехиздат, 1961.

47. «Пожарное дело» № 2, 1962.

48. Шихов В. Н. Взрывобезопасность нейтрализаторов. «Пожарное дело» № 8, 1964.

49. Бабкин П. Уменьшена опасность статического электричества. «Пожарное дело» № 2, 1964.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
<b>I. Молния и ее параметры</b>	
1. Механизм развития молнии . . . . .	5
2. Основные электрические характеристики молнии . . . . .	8
3. Измерения характеристик молнии в естественных условиях . . . . .	11
<b>II. Пожаро- и взрывоопасность воздействий молнии</b>	
1. Пожаро- и взрывоопасность прямого удара молнии . . . . .	16
2. Термическое действие токов молнии на проводники . . . . .	22
3. Механическое воздействие прямого удара молнии. Опасность поражения людей . . . . .	23
4. Пожаро- и взрывоопасность вторичных воздействий молнии . . . . .	24
5. Статистика и анализ некоторых пожаров и взрывов от рядов молнии . . . . .	30
<b>III. Защита взрывоопасных зданий и сооружений от молнии</b>	
1. Классификация зданий и сооружений по степени опасности поражения молнией . . . . .	39
2. Оценка грозовой деятельности на территории СССР и вопросы молниезащиты . . . . .	41
3. Защита от прямых ударов молнии . . . . .	43
4. Защита от вторичных воздействий молнии . . . . .	68
5. Защита зданий от заноса высокого потенциала . . . . .	70
6. Особенности совместной молниезащиты зданий и сооружений разных категорий . . . . .	71
7. Примеры молниезащиты зданий и сооружений . . . . .	74
<b>IV. Исследование зон взрывоопасности и вопросы молниезащиты</b>	
1. Теоретические предпосылки . . . . .	77
2. Исследование зон взрывоопасности при хранении легковоспламеняющихся жидкостей . . . . .	81
3. Исследование зон взрывоопасности газов . . . . .	85
4. Рекомендации по нормированию зон взрывоопасности и молниезащите устройств для выброса горючих паров и газов в атмосферу . . . . .	89

## V. Исследование действующих молниезащитных устройств взрывоопасных зданий и сооружений

1. Зоны защиты молниеотводов и степень защищенности зда- ний и установок . . . . .	92
2. Токоотводы и заземлители молниезащиты . . . . .	99
3. Эксплуатация молниезащитных устройств . . . . .	101

## VI. Защита взрывоопасных производств от разрядов статического электричества

1. Образование зарядов статического электричества . . . . .	103
2. Воспламеняющая способность искр статического электриче- ства . . . . .	106
3. Примеры пожаров и взрывов от разрядов статического электричества . . . . .	107
4. Приборы для измерения величины зарядов статического электричества . . . . .	109
5. Способы устранения опасности статического электричества . . . . .	111
6. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества . . . . .	125
Приложения . . . . .	126
Литература . . . . .	128

*Черкасов Владимир Николаевич*  
**ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ МОЛНИИ  
И СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Тем. план 1965 г. № 226

\* \* \*

*Стройиздат*  
*Москва, Третьяковский проезд, д. 1*

\* \* \*

Научный редактор канд. техн. наук В. П. Ларионов  
Редактор издательства Э. А. Зайчикова  
Оформление художника Е. В. Терехова  
Технический редактор А. А. Михеева  
Корректор Е. Н. Кудрявцева

Сдано в набор 21/IV 1965 г.  
Т-08979

Подписано к печати 21/VII 1965 г.  
Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> — 2,6256ум. л.

6,93 усл. печ. л. (уч.-изд. 7,0 л.)

Тираж 11.000 экз. Изд. № VII-9340/2211 Зак. № 1223 Цена 39 к.

Владимирская типография Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР  
по печати

Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б