

## Глава 4

# АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 4.1. Автоматический аналитический контроль

Оснащение производства контрольно-измерительными и регулирующими приборами должно быть решено таким образом, чтобы оно представляло полную картину протекания технологического процесса. Среди средств автоматизации аналитические приборы занимают особое место, так как они позволяют автоматизировать производственные процессы не по косвенным показателям (температуре, расходу, уровню и т.п.), а непосредственно по составу сырья промежуточных и конечных продуктов, что особенно важно для производства, где обращаются горючие газы и жидкости.

Нарушение пропорции смеси этих веществ с воздухом или взаимного их соотношения (сероводород – воздух в печах дожигания при производстве серы, кислород – этилен в реакторах при получении полиэтилена высокого давления и т.п.) может привести к взрыву, аварии, пожару. Существенное значение для таких производств имеет также контроль состава атмосферы с точки зрения токсичности и взрывоопасности, особенно в связи с интенсификацией технологических процессов и развитием нефтехимической и химической промышленности, в которых необходимо своевременное обнаружение горючих газов и паров в воздухе производственных помещений в концентрациях, значительно меньших взрывоопасных, и их локализация.

Обычные лабораторные анализы дают информацию только о промежуточном состоянии процесса, и, как правило, со значительным опозданием в отношении оперативной оценки сложившейся ситуации.

Автоматический аналитический контроль обеспечивает определение концентрации контролируемого компонента в анализируемой смеси, результат измерения прибор показывает или записывает, а в отдельных случаях выдает светозвуковой сигнал.

Прибор, автоматически или полуавтоматически определяющий количественный или качественный состав анализируемого вещества на основе измерения параметров, характеризующих его физические или физико-химические свойства, называется *анализатором*.

*Полуавтоматический анализатор (индикатор)* – устройство, предполагающее в своей работе наличие ручных операций по периодическому забору анализируемой смеси и в дополнительной обработке результатов анализа. Приборы такого типа не могут применяться в качестве элементов регулирующих систем и систем защиты.

*Автоматический анализатор* действует полностью автоматически и может служить в качестве элементов автоматических регулирующих систем, а также может быть использован в схемах автоматической защиты. Он представляет собой стационарное устройство непрерывного действия.

По принципу действия анализаторы разделяют на две группы. Анализаторы, основанные на физических принципах измерения, – это приборы, измеряющие некоторую физическую величину, зависимость которой от химического состава анализируемого вещества точно определена. Важным свойством этих анализаторов является то, что при измерении не происходит количественных изменений анализируемой смеси. Недостатком физических анализаторов является зависимость значений физических величин от давления, температуры и концентрации сопутствующих компонентов.

Анализаторы, основанные на физико–химических принципах измерения, измеряют параметры, сопровождающие химическую реакцию, в которой либо определяемое вещество участвует само, либо оно оказывает существенное влияние на химическую реакцию.

По числу определяемых компонентов анализаторы разделяются на одно- и многокомпонентные.

По физическому (агрегатному) состоянию анализируемого вещества анализаторы разделяются на анализаторы жидкостей, твердых веществ и газоанализаторы. Наиболее широко распространены газоанализаторы. Они могут быть объединены в зависимости от использования тех или иных физико-химических свойств определяемых веществ в следующие группы: тепловые, термохимические, термомагнитные, фотоколориметрические, оптико–акустические, спектральные, хроматографические.

#### **4.2. Термохимические газоанализаторы**

Для определения взрывоопасности газопаровоздушных сред пользуются газоанализаторами, определяющими концентрацию в воздухе того или иного горючего газа или пара. Оценка взрывоопасности среды производится путем сопоставления полученных данных со значениями нижних пределов воспламенения тех или иных газов или паров.

Среди методов, применяемых для определения горючих паров или газов, наибольшее распространение в мировой практике получил термохимический метод. Сущность термохимического метода заключается в том, что благодаря известному свойству некоторых металлов и окислов ускорять реакцию горючих газов и паров на своей поверхности удастся выделить эти горючие газы и пары путем их каталитического сжигания.

Термохимические приборы, в основе которых лежит термохимический метод, могут быть разделены на три группы.

К *первой группе* относятся приборы, в которых реакция горения сопровождается выделением тепла, протекает на катализаторе (обычно платиновая нить), причем катализатор используется и как чувствительный элемент измерительной схемы.

Ко *второй группе* относятся приборы, в которых реакция протекает на насыпном катализаторе, а полезный тепловой эффект, сопровождающий реакцию, измеряется специальным термочувствительным элементом.

К *третьей группе* относятся приборы, в которых реакция протекает на твердых носителях, пропитанных каталитически активным раствором, а полезный тепловой эффект измеряется расположенным на носителе термочувствительным элементом (рис. 4.1).

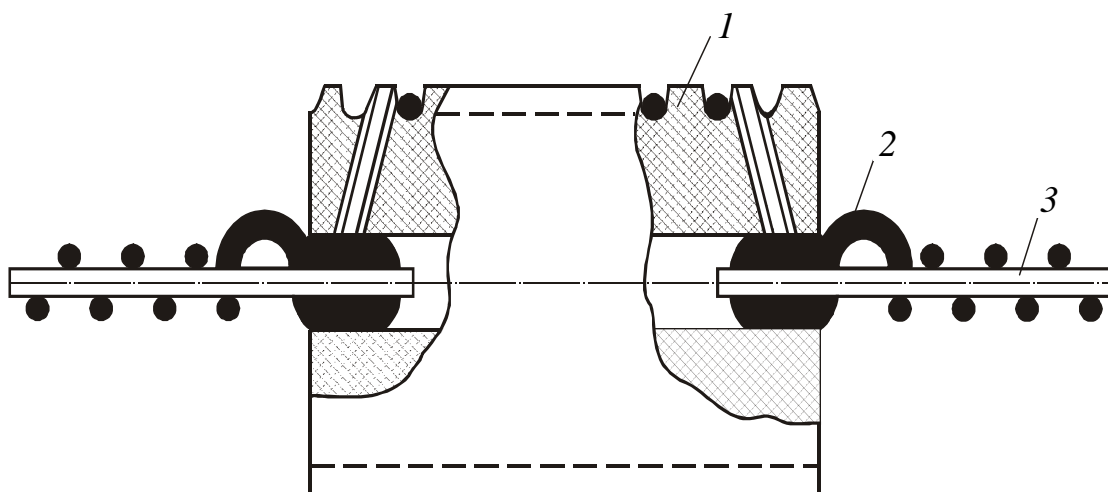


Рис. 4.1. Чувствительный элемент:

1 – цилиндр из  $\gamma$ -оксида алюминия; 2 – платиновая спираль; 3 – контактные выводы

Носителями обычно служат материалы, имеющие большую поверхность на единицу объема, такие, как активная окись алюминия, асбест. Для полного окисления газообразующих продуктов требуется температура более  $1000^{\circ}\text{C}$ , катализаторы же снижают эту температуру.

Тепловой эффект и температуру измеряют компенсационным или нулевым методом измерения.

Первыми разработками в области приборов, определяющих степень загазованности производственных помещений горючими газами или парами, являются переносной газоанализатор горючих газов и паров типа ПГФ1 и в последующем его модификации ПГФ1-В1А, ПГФ2-В3Г в искробезопасном исполнении.

На основе ПГФ1 был разработан прибор ГБЗ для измерения концентраций этилированных бензинов. Для измерения концентраций бензина и метана разработан прибор МБ2. Первыми отечественными стационарными приборами были приборы типа СГГ – сигнализаторы горючих газов. Эти

приборы калибровались индивидуально на каждый анализируемый газ, что исключало их применение в случае наличия в воздухе смеси разных горючих газов и паров. Впервые примененные в шахтных условиях в качестве индикаторов взрывоопасных концентраций метана, эти приборы широко использовались в различных отраслях промышленности: химической, нефтяной, горнодобывающей, легкой и других, но в основном для определения концентраций в воздухе индивидуальных горючих веществ.

Потребности промышленности привели к разработке новых модификаций приборов, определяющих концентрации горючих паров или газов, независимо от того, какой горючий газ, пар или их смесь находится в воздухе. Принципиально новым в этих приборах является универсальная шкала, построенная на основе закономерностей горения различных горючих веществ в воздухе при нижнем концентрационном пределе воспламенения.

Повышение температуры платиновой нити при горении на ней газа выражается общей формулой, принятой при термохимических расчетах:

$$\frac{\alpha}{100} = \alpha_1 Q_n \left( 1 - \frac{\beta}{100} \right) = \sum_{vc} \Delta t, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – полнота реакции;  $\alpha_1$  – число молей реагирующего вещества;  $Q_n$  – теплота сгорания;  $\beta$  – потери тепла в окружающую среду;  $\Sigma_{vc}$  – теплосодержание продуктов реакции и балластного газа;  $\Delta t$  – повышение температуры нити.

Из соотношения (4.1) имеем:

$$\Delta t = \frac{\alpha}{100} \alpha_1 \frac{Q_n}{\sum_{vc}} \left( 1 - \frac{\beta}{100} \right). \quad (4.2)$$

При одних и тех же конструктивных параметрах камеры, где расположена рабочая спираль, коэффициент зависит только от теплопроводности газа и температуры нити.

Так как в анализируемой смеси находится небольшое количество горючих паров или газов, то без особой погрешности можно принять во всех случаях теплопроводность среды примерно одинаковой и мало отличающейся от теплопроводности воздуха.

Выражение  $\Sigma_{vc}$  при небольших примесях различных горючих паров и газов к воздуху также может быть принято постоянным, так как в основном оно определяется теплосодержанием воздуха, который во всех случаях составляет не менее 96 – 97 % смеси.

Следовательно, для прибора одного и того же типа формула (4.2) примет вид:

$$\Delta t = K\alpha\alpha_1 Q_n, \quad (4.3)$$

где  $K$  – константа, постоянная для данного типа газоанализатора.

Таким образом, при одинаковых конструктивных параметрах прибора повышение температуры платиновой нити при горении на ней различных горючих веществ является функцией теплоты сгорания данного вещества, его концентрации и полноты реакции:

$$\Delta t = f(Q_n, \alpha, \alpha_1). \quad (4.4)$$

Теплота сгорания  $Q_n$  многих паров горючих веществ близки между собой, а полнота реакции определяется условиями диффузии горючего вещества к нити, каталитической активностью нити, условиями конвекции и другими факторами.

Температура пламени для некоторых газозвудушных смесей на нижнем концентрационном пределе распространения пламени (НКПР) приведена в табл.4.1.

Таблица 4.1

**Температура пламени для газозвудушных смесей на нижнем концентрационном пределе распространения пламени**

Горючий газ	Нижний предел воспламенения, об. %	Температура пламени, °С
Метан	5,0	1225
Этан	2,9	1218
Пропан	2,1	1233
Бутан	1,8	1340
Пентан	1,4	1292
Гексан	1,3	1361
Гептан	1,0	1341

Как видно из табл. 4.1, температура пламени при горении различных горючих веществ в воздухе на нижнем концентрационном пределе распространения пламени – величина практически постоянная.

Установлено также, что на нижнем пределе воспламенения равные объемы смесей большого числа газов и паров выделяют одинаковое количество тепла.

Согласно законам теплового взрыва, достижение НКПР обуславливается равновесием между тепловыделением за счет экзотермичности процесса окисления и теплопотерями из зоны реакции. Так как основным содержанием смеси на НКПР является воздух, то можно полагать, что теплопотери для одних и тех же условий для любых газов будут определяться условиями теплоотвода практически через воздух, т.е. будут одинаковы.

Учитывая указанное выше условие предела теплового взрыва (равновесие между тепловыделением и теплопотерями из зоны реакции), можно

полагать, что для рассматриваемых смесей теплотворная способность элемента объема также будет одинакова. А если так, то и тепловой эффект, а значит, и повышение температуры будут на нижнем пределе воспламенения одинаковы для всех горючих паров и газов.

Более строго постоянство температуры горения газовых смесей на нижнем концентрационном пределе распространения пламени доказано Я.Б. Зельдовичем. Он получил количественное решение задачи определения пределов распространения пламени (пределов воспламенения), согласно которому температура горения на нижнем пределе воспламенения весьма слабо зависит от начальной температуры и состава смеси. Согласно этой теории, появление пределов распространения пламени (концентрационных пределов воспламенения) обуславливается неадиабатичностью процесса горения вследствие теплопотерь в окружающую среду. Наличие этих теплопотерь вызывает необходимость предположения конечных пределов значений скорости распространения пламени. Эти конечные значения определяют концентрационные пределы распространения пламени.

Если скорость пламени с учетом теплопотерь обозначить  $U$ , скорость пламени без учета теплопотерь  $\bar{U}$  и максимальную теоретическую температуру горения  $T$ , то соотношение между скоростями пламени при адиабатическом протекании процесса и учете теплопотерь выразится так:

$$U = U_0 e^{-\frac{\alpha E}{RT_{\text{теор}}^2 - U^2}}, \quad (4.5)$$

где  $E$  – энергия активации;  $\alpha$  – константа.

Я.Б. Зельдович установил, что уравнение (4.5) имеет нетривиальное решение только при

$$\frac{\alpha E}{2RT_{\text{теор}}^2} < \frac{U_0^2}{2e}. \quad (4.6)$$

Следовательно, распространение пламени возможно только при условии, если  $U > \frac{U_0}{\sqrt{e}}$  или на пределе

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{e}}. \quad (4.7)$$

Дальнейшие преобразования приводят к тому, что

$$e^{-\frac{E}{2R}\left(\frac{1}{T_{\text{теор}}} - \frac{1}{T}\right)} = \sqrt{e}, \quad (4.8)$$

где  $T$  – истинная температура горения. Отсюда

$$\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{теор}}} \right) = 1 \quad (4.9)$$

или

$$T_{\text{теор}} - T = \frac{RT_{\text{теор}}^2}{E}. \quad (4.10)$$

Из уравнения (4.10) следует, что максимальное падение температуры горения на пределе от теоретической составляет:

$$\Delta T = \frac{RT_{\text{теор}}^2}{E}. \quad (4.11)$$

Это условие и есть количественное решение задачи пределов распространения пламени. Если в уравнении (4.11)  $T$  выразить через скорость химической реакции и константы, характеризующие теплоотдачу и т.п., то в результате для температуры горения на пределе получится трансцендентное уравнение. Поскольку в уравнении (4.11) есть экспонента, то решение его приводит к выводу, что температура горения на пределе весьма слабо зависит от начальной температуры и состава смеси, т.е. равные объемы смесей большего числа горючих паров и газов выделяют одинаковое количество тепла.

Теоретические предпосылки были экспериментально подтверждены, что послужило основанием для разработки универсальных приборов, определяющих суммарное содержание горючих газов и паров, модификаций СВК, СТХ, "ЩИТ", СТМ. Сравнительные характеристики современных стационарных термохимических газоанализаторов приведены в табл. 4.2. Схема принудительного забора контролируемой среды на анализ показана на рис. 4.2.

Таблица 4.2

**Характеристики современных стационарных термохимических газоанализаторов**

Тип газоанализатора	Количество датчиков/ взрывозащита	Вид забора смеси на анализ	Вид анализируемой смеси
СТХ - 18	1 1ExdibIIAT3	Диффузионный	Сумма горючих паров и газов в воздухе ( $C_x/H_y$ )
ЩИТ - 2	1 или 5 1ExdibIICT6	Принудительный и диффузионный	То же
СГГ-4М-4	1 1ExibdsIICT6	Диффузионный	«
СТМ-10	от 1 до 10 (1ExdIICT4)	Принудительный и диффузионный	«
СТМ-30 (4-20 мА, RS-232)	от 1 до 16 в группе (1ExdibIICT3)	Принудительный и диффузионный	«
ГАЗОТЕСТ-3001/3003	от 1 до 3 1ExibdsIICT6	Диффузионный	«

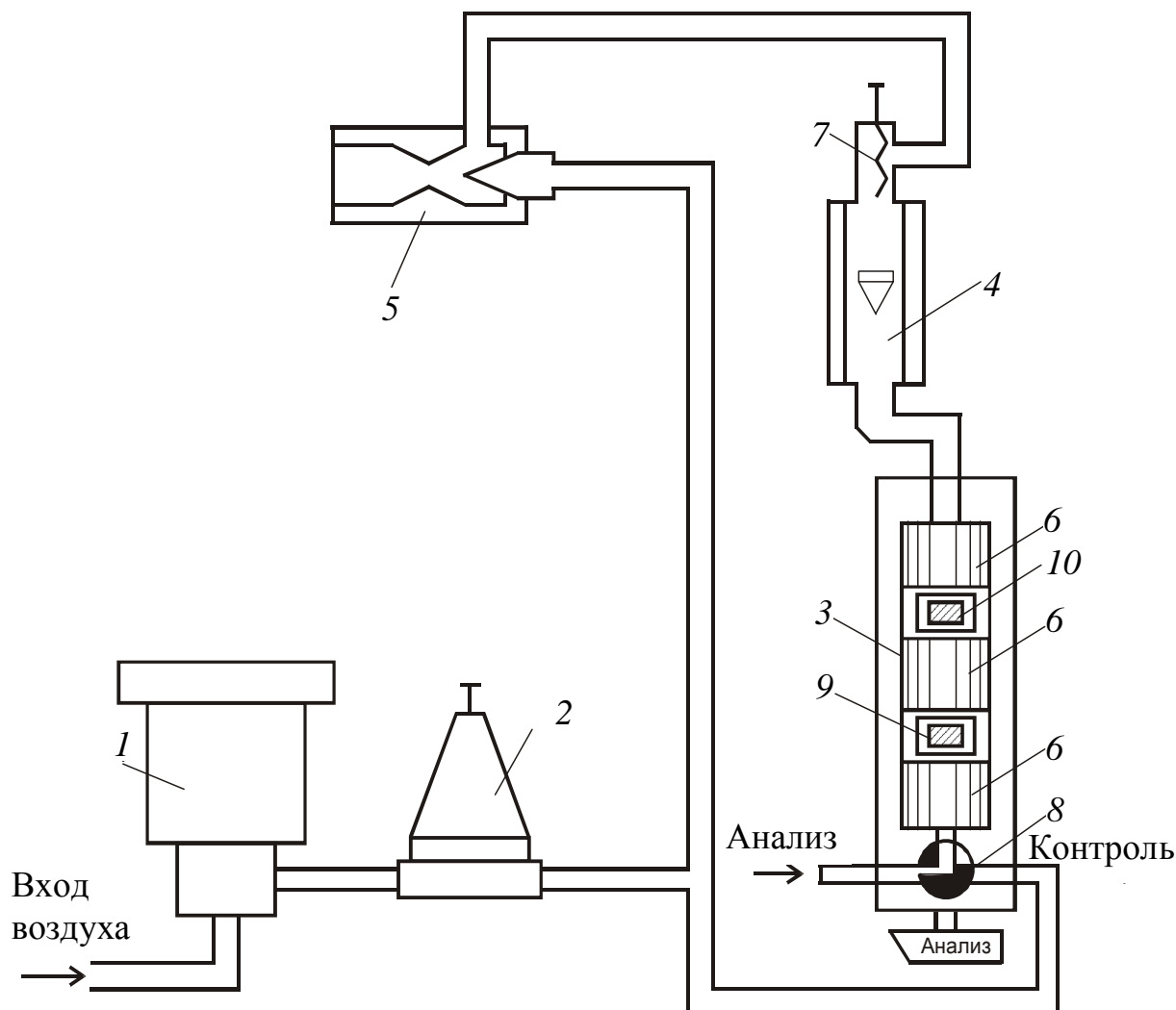


Рис. 4.2. Схема принудительного забора анализируемой смеси на анализ:  
 1 – фильтр; 2 – редуктор давления; 3 – датчик; 4 – ротаметр; 5 – воздушный эжектор;  
 6 – взрывозащитное устройство; 7 – вентиль ротаметра; 8 – кран-переключатель;  
 9 – сравнительный чувствительный элемент; 10 – рабочий чувствительный элемент

### 4.3. Газоанализаторы, основанные на физических принципах измерения

Рассмотренные в п. 4.2 термохимические газоанализаторы наряду с очевидными достоинствами имеют и существенные недостатки: сравнительно большую величину запаздывания, потерю платиной, входящей в чувствительный элемент, своих свойств при наличии в анализируемой смеси примесей хлора, фтора и сернистых соединений и т.д. Эти обстоятельства привели к необходимости разработки газоанализаторов типа СВИ и СДК, обладающих более широкими возможностями в измерении концентраций горючих паров и газов.



**Газоанализатор-сигнализатор типа СВИ** представляет собой стационарное устройство периодического действия, предназначенное для сигнализации о наличии довзрывоопасных концентраций (до 20 % от НПВ) горючих газов, паров и их смесей в воздухе производственных помещений.

В работе сигнализатора используется принцип искусственного воспламенения горючей смеси во взрывной камере датчика. Метод искусственного воспламенения обеспечивает высокую универсальность сигнализатора за счет аддитивности горючих свойств компонентов сложной газовой смеси и полноты прохождения реакции сгорания при взрыве. Схема газоанализатора приведена на рис. 4.3.

В функции устройств газовой смеси входят:

- обеспечение и индикация прохождения исследуемого воздуха через датчик взрыва;

- обогащение исследуемого воздуха горючим газом в строго определенном соотношении и поддержание этого соотношения постоянным;

- обогащение исследуемого воздуха горючим газом до взрывной концентрации при автоматической и ручной проверках работоспособности прибора;

- выдача пневмоимпульса при взрыве в датчике.

Сжатый воздух под давлением подается к эжектору. Исследуемый воздух, очищенный от пыли и механических примесей в фильтре 1, с расходом  $90 \text{ л/ч} \pm 10 \%$  просачивается через диафрагму 9, нормально открытый клапан 10 и диафрагму 11 под действием разряжения, создаваемого эжектором (режим–анализ). Давление потока исследуемого воздуха воспринимается мембраной пневматического стабилизатора 7.

Обогащенный горючий газ из баллона или трубопровода, очищенный от пыли и механических примесей фильтром 2, поступает на редуктор (РГ–2А) 5, которым устанавливается необходимое рабочее давление, проходит через управляющий орган сопло–заслонку пневматического стабилизатора и диафрагму 8.

Пневматический стабилизатор поддерживает давление обогащающего горючего газа, равным давлению исследуемого воздуха, вследствие чего на диафрагмах 8, 9, 11 обеспечивается одинаковый перепад давлений, а следовательно, и постоянное соотношение расходов. Значение соотношения определяется размерами отверстий диафрагм.

Контролируемая смесь, обогащенная горючим продуктом, поступает через ротаметр 12 в камеру взрыва 4, а оттуда через эжектор на сброс в атмосферу. Количество добавляемого горючего газа выбирается такое, чтобы обеспечить заданную сигнальную точку прибора.

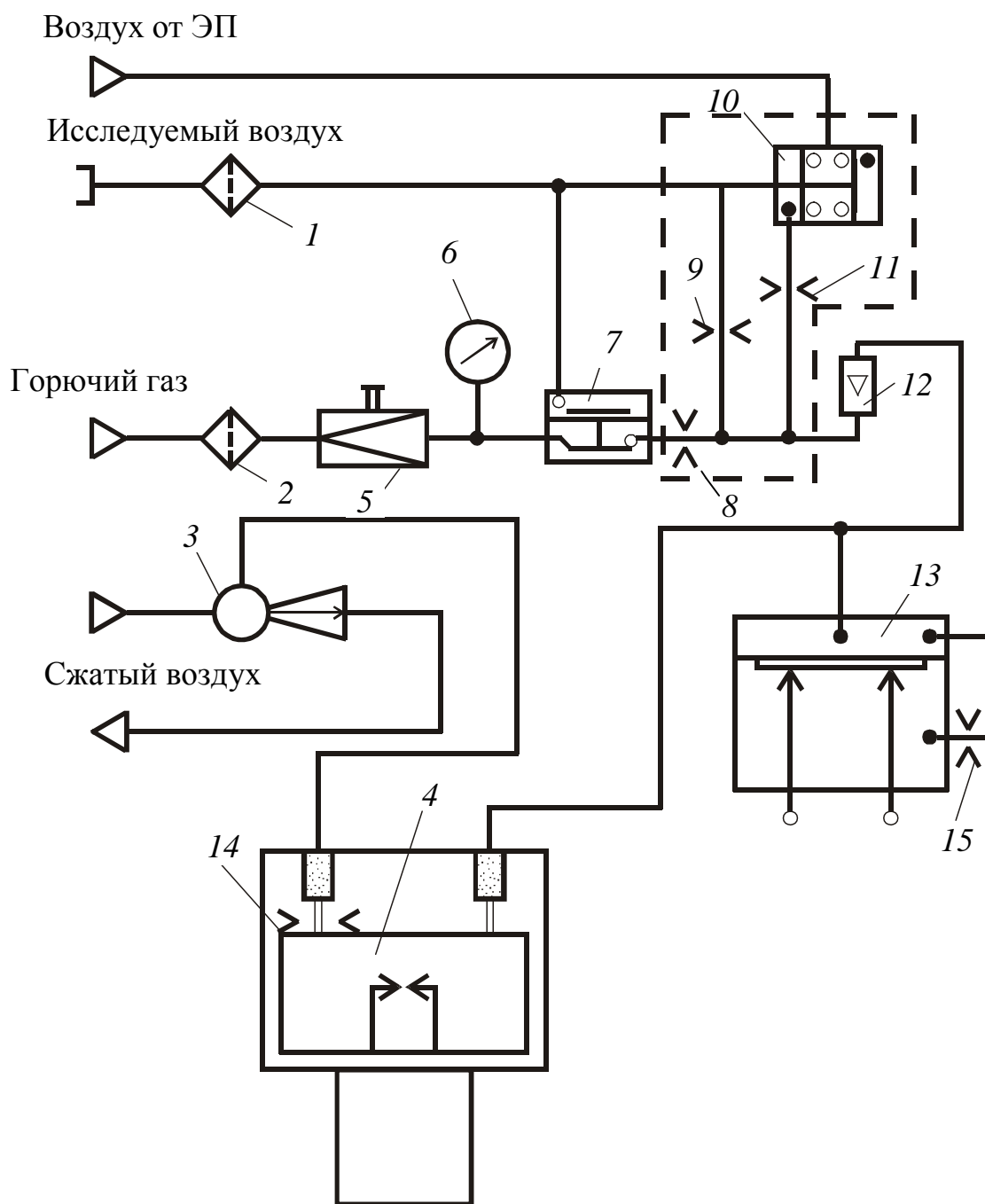


Рис. 4.3. Принципиальная схема СВИ:

1, 2 – фильтры; 3 – эжектор; 4 – камера сгорания (взрыва);  
 5 – редуктор газовый; 6 – манометр; 7 – пневматический стабилизатор;  
 8, 9, 11, 14, 15 – диафрагмы; 10 – клапан; 12 – ротаметр; 13 – детектор взрыва

Таким образом, если горючие продукты содержатся в воздухе в количестве, соответствующем сигнальной точке прибора, то газоанализатор обеспечивает сигнализацию при взрыве в камере.

Давление, возникающее в камере взрыва, воспринимается мембраной детектора 13, жесткий центр которой замыкает выходные контакты. При этом срабатывает сигнализация "опасность".

При проверке работоспособности основных узлов сигнализатора (автоматическая и ручная проверка) подается пневмосигнал от электропневматического клапана "воздух от ЭП" на клапан 10, который закрывается и поток контролируемого воздуха через диафрагму 11 не проходит.

В связи с уменьшением количества исследуемого воздуха (поток идет только через диафрагму 9) концентрация обогащающего горючего газа в смеси повышается до взрывной и при поджигании его в камере происходит взрыв.

При наличии неисправности в каком-либо узле прибора контрольного взрыва не происходит, и в этом случае срабатывает сигнализация "НЕИСПРАВНО".

Электрическая схема газоанализатора выполнена на полупроводниках. В функции устройств электрической схемы входит:

- периодическая подача искры во взрывную камеру датчика;
- фиксация взрыва в датчике и выдача сигнала "ОПАСНОСТЬ";
- автоматическая и ручная проверки работоспособности основных узлов изделий;
- отключение питания датчика при неисправности системы искрообразования.

Периодическая подача искры во взрывную камеру датчика производится по сигналам от командного устройства, которое один раз в 30 с включает на 0,2-0,5 с управляемый диод, и выпрямленный ток напряжением 350 В поступает в систему искрообразования. Фиксация взрыва в датчике осуществляется детектором взрыва нормального исполнения, который выдает сигнал в виде замкнутого контакта. При этом в цепи, соединяющей детектор взрыва с блоком управления, протекает ток искробезопасного значения, поступающий на вход усилителя мощности.

Усилитель мощности выполнен на транзисторе и магнитоуправляемом контакте, который замыкается при срабатывании детектора взрыва.

При включении магнитоуправляемого контакта срабатывает реле, которое блокируется и одновременно включается лампа индикатора "ОПАСНОСТЬ".

Ручная и автоматическая проверки работоспособности газоанализатора осуществляются следующим образом. Если при подаче в камеру датчика взрыва взрывоопасной смеси происходит контрольный взрыв, то это свидетельствует о работоспособности прибора, если взрыва нет, то выдается сигнал "НЕИСПРАВНОСТЬ".

**Газоанализатор-сигнализатор типа СДК** представляет собой стационарный прибор промышленного изготовления, предназначенный для

непрерывного контроля и автоматической сигнализации о наличии дозврывоопасных концентраций горючих паров или газов органических веществ, а также их смесей в воздухе производственных помещений. В зависимости от условий работы сигнальная концентрация варьируется в пределах 20–50 % от нижнего предела воспламенения. Поскольку чувствительность газоанализатора связана с величинами НКПР органических веществ, он отградуирован на дозврывоопасную концентрацию метана и сигнализирует о близких по значению дозврывоопасных концентрациях контролируемых органических веществ.

Газоанализатор состоит из блока преобразователя датчика и электронного блока. Работа датчика основана на ионизации молекул органических веществ в пламени водорода, созданном в ионизационной камере с последующим измерением ионизационного тока.

При отсутствии органических веществ водородное пламя обладает очень низкой электропроводностью, а возникающий при этом фоновый ионизационный ток составляет  $10^{-12}$  А. Появление в водородном пламени органических веществ и последующая их ионизация приводят к резкому увеличению ионизационного тока по сравнению с его фоновым значением до  $10^{-7}$  А. Изменение ионизационного тока пропорционально количеству органических веществ, поступивших в пламенно-ионизационную камеру датчика (рис. 4.4).

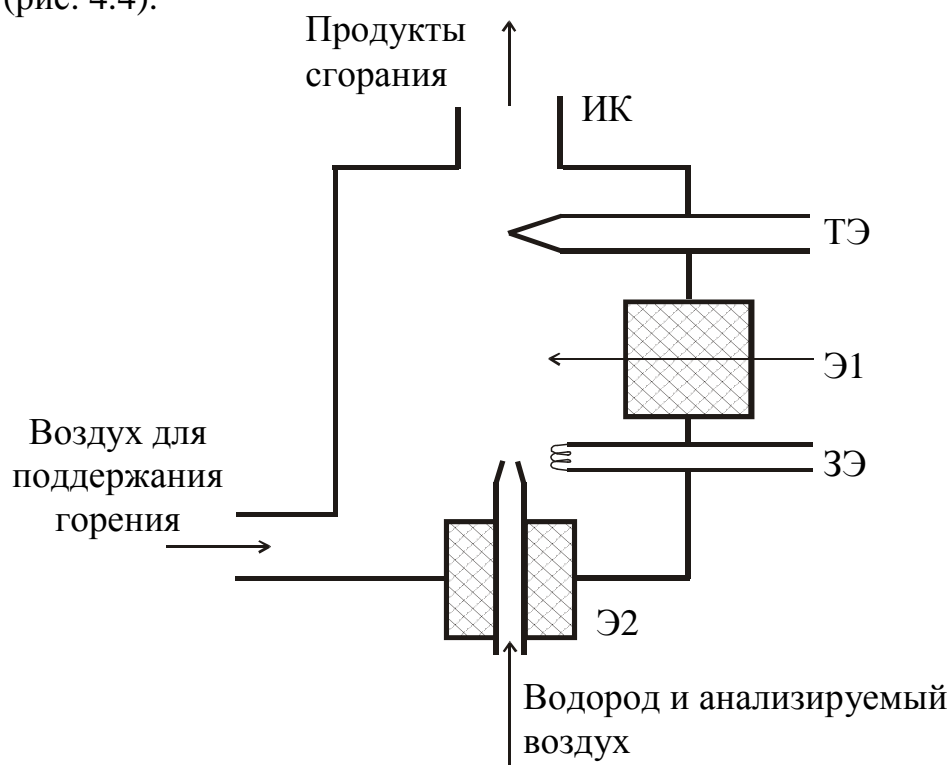


Рис. 4.4. Пламенно-ионизационная камера:  
ТЭ – термочувствительный элемент; ЗЭ – зажигающий элемент; Э1, Э2 – электроды

Пламенно-ионизационная камера содержит коллекторный электрод Э1, электрод Э2, зажигающий элемент ЗЭ и термоэлемент ТЭ. На электрод Э2 с блока электроники подается стабилизированное напряжение постоянного тока, равное 300 В. На зажигающий элемент в момент включения подается переменное напряжение, равное 6,3 В. Термоэлемент связан с миллиамперметром, который служит индикатором горения пламени. К ионизационной камере подводятся два газовых потока: поток смеси водорода с анализируемым воздухом и поток воздуха для поддержания горения.

Электропневматическая схема газоанализатора приведена на рис. 4.5.

Блок преобразователя-датчика (ПД) (см. рис. 4.5) представляет собой панель 1, на которой размещены: датчик типа ДКО (датчик контроля органики) 2 и элементы формирования, очистки и стабилизации газовых потоков, манометры 3, редуктор давления воздуха 4, фильтры контрольные 5, насос-осушитель 6, дроссель 7, регулятор перепада давлений 8, электронный блок 9.

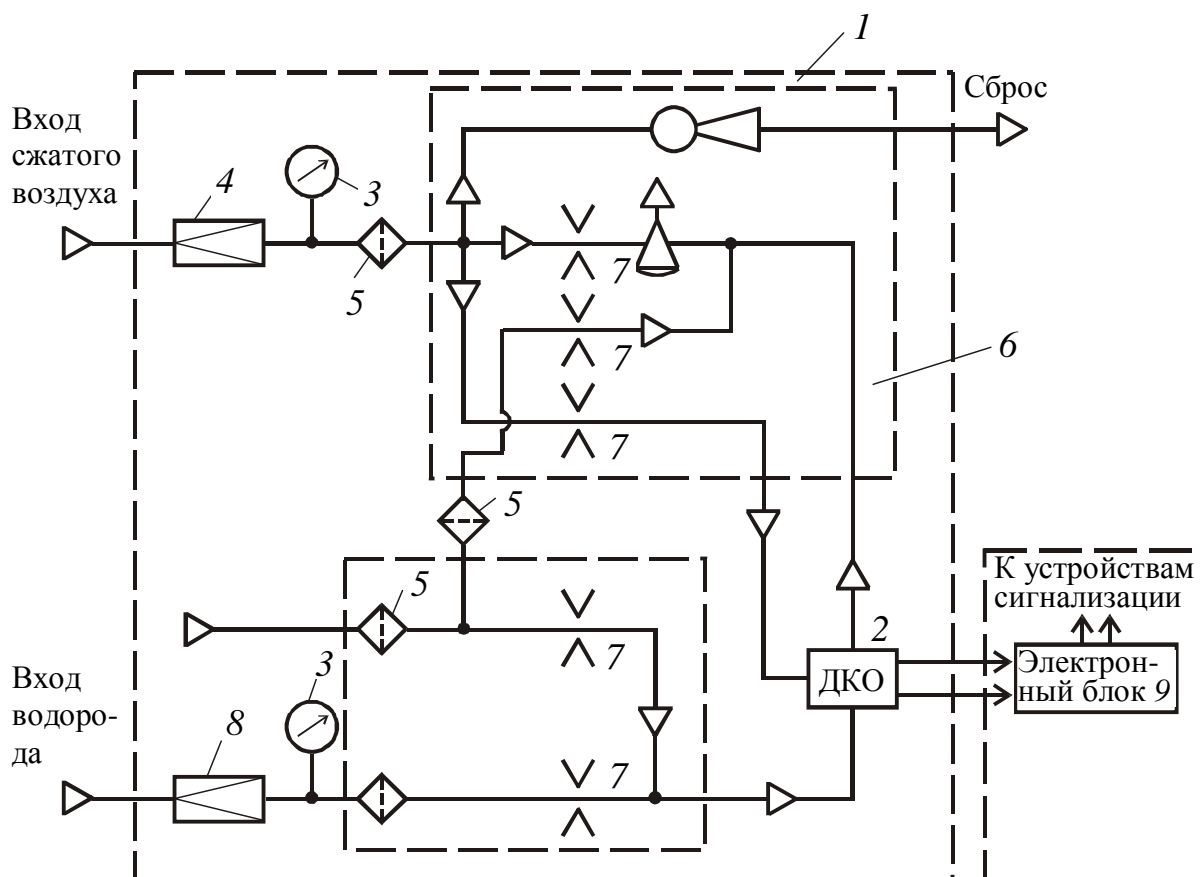


Рис. 4.5. Электропневматическая схема СДК:  
 1 – блок преобразователя-датчика; 2 – датчик контроля; 3 – манометры;  
 4 – редуктор давления; 5 – фильтры; 6 – насос-осушитель; 7 – дроссель;  
 8 – регулятор перепада давлений; 9 – электронный блок

Газовые потоки между элементами блока ПД имеют следующее назначение:

- подача водорода из регулятора перепада давлений в дроссель;
- подача водорода и контролируемого воздуха из дросселя в датчик;
- увеличение скорости отбора воздуха из помещения и уменьшение времени запаздывания газоанализатора (безопасный поток);
- подача сжатого воздуха из редуктора давления воздуха в насос-осушитель;
- подача воздуха для поддержания горения из насоса-осушителя в датчик;
- выброс продуктов сгорания из датчика в насос-осушитель.

Ионизационный ток измеряется полупроводниковым усилителем постоянного тока с пороговой регистрацией сигнала, выполненным по схеме с преобразованием сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока с последующим детектированием.

Усилитель состоит из измерительного резистора автогенераторного преобразователя, представляющего собой генератор с модулятором в цепи обратной связи, усилителя напряжения переменного тока, детектора, нагруженного на электромагнитное реле, и источника компенсационного опорного напряжения.

В электронном блоке, смонтированном в корпусе, расположены: усилитель постоянного тока, выпрямители питания ионизационной камеры и усилителя, источник питания зажигающего элемента и индикатор пламени. На панели блока расположены: тумблер "ВКЛЮЧЕНА СЕТЬ" с сигнальной лампой, кнопка зажигания и индикатор пламени.

Датчик газоанализатора СДК выполнен взрывобезопасным с уровнем взрывозащиты 1ExdibсІІСТ5. Электронный блок имеет нормальное исполнение и должен устанавливаться в невзрывоопасных помещениях на расстоянии от датчика до 100 м.

#### **4.4. Динамические характеристики автоматических газоанализаторов**

Показание газоанализатора должно соответствовать действительной концентрации измеряемого компонента. Однако на результаты измерения большое влияние оказывают параметры состояния: прежде всего температура, давление, а также изменение концентрации сопутствующих компонентов. В некоторых случаях на показание газоанализатора влияет изменение расхода. Для многих анализаторов необходимо стабилизировать напряжение электрического питания и исключить влияние колебаний частоты сети.

Влияние температуры на показания анализатора обычно устраняется термостатированием или дифференциальным измерением. В некоторых случаях применяются специальные способы для устранения влияния колебаний температуры и давления на показания прибора.

Влияние температуры будет тем слабее, чем больше дополнительное сопротивление по сравнению с внутренним сопротивлением измерительной системы. Обычно газоанализаторы и измерительные приборы устанавливают в местах, наиболее защищенных от колебаний температуры. Если показания газоанализатора зависят от давления, то необходимо учитывать изменения барометрического давления, а в отдельных случаях и влияние высоты над уровнем моря. Например, при разнице высоты над уровнем моря по сравнению с местом, где газоанализатор был отградуирован, в 10 м атмосферное давление воздуха изменится примерно на 0,12 %, и на такое же значение может измениться показание газоанализатора. При изменении высоты над уровнем моря на 500 м ошибка составляет около 5 %.

Количество подаваемой на анализ смеси является также важным фактором, сказывающимся на точности анализатора. Выбором конструкций газоанализаторов удастся исключить влияние расхода на показания. Особенно это касается газоанализаторов, работающих по принципу теплопроводности или теплоты реакции. Если применены так называемые диффузионные камеры, то влияние расхода будет минимальным. Наоборот, при использовании проточных камер необходимо обеспечить точное поддержание расхода.

Газоанализаторы предназначены для измерения величин, которые изменяются во времени. Между отбором пробы и достижением конечного (установившегося) значения всегда проходит время, которое нежелательно при использовании анализаторов в схемах автоматического регулирования, поскольку оно ухудшает устойчивость регулирования при сигнализации о наличии горючих паров или газов в производственных помещениях и на открытых площадках. В общее время запаздывания анализатора входит транспортное запаздывание и время запаздывания показаний анализатора [11]:

$$\tau_{\text{зап}} = \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{зап.газ}}, \quad (4.12)$$

где  $\tau_{\text{зап}}$  – общее время запаздывания;  $\tau_{\text{тр}}$  – транспортное запаздывание;  $\tau_{\text{зап.газ}}$  – время запаздывания газоанализатора.

Транспортное запаздывание – это время, необходимое для транспортирования анализируемой смеси от места отбора пробы до входа в корпус газоанализатора.

Транспортное запаздывание  $\tau_{\text{тр}}$  определяется по формуле

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{Spl}{Q}, \quad (4.13)$$

где  $l$  – длина подводящего трубопровода, м;  $p$  – давление в трубопроводе, Па;  $S$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход пробы, л/с.

В общем запаздывание входит и запаздывание показаний газоанализаторов. Каждый газоанализатор обладает определенным запаздыванием показаний, которое зависит от принципа его действия и от его конструкции.

Газоанализатор можно представить в виде многоемкостного звена, образованного последовательно соединенными емкостями и сопротивлениями. Динамические свойства такого звена можно с достаточной точностью выразить линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Для звена с  $n$  емкостями, т.е. для системы  $n$ -го порядка можно написать следующее дифференциальное уравнение:

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \dots + a_1 y^1 + a_0 y^0 = x, \quad (4.14)$$

где  $y$  – выходная величина (показание анализатора);  $x$  – входная величина (например, у анализатора – это концентрация);  $a_n, a_{n-1}, a_1, a_0$  – постоянные коэффициенты;  $y^n, y^{n-1}, y^1, y^0$  – соответствующие производные выходной величины.

Каждый газоанализатор является статической системой, т.е. при скачкообразном изменении измеряемой величины до некоторого значения показание анализатора также устанавливается на соответствующем новом значении.

#### 4.5. Условия эксплуатации и правила установки газоанализаторов

Условия эксплуатации, особенности монтажа и порядок установки автоматических стационарных газоанализаторов-сигнализаторов регламентированы "Правилами пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности" (ВНЭ 5-79), "Общими правилами взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (ПБ-09-170-97)", "Требованиями к установке сигнализаторов и газоанализаторов" (ТУ-газ-86) и инструкциями заводов-изготовителей. В соответствии с этими документами проектные организации определяют тип, количество газоанализаторов и места отбора проб газопаровоздушных смесей с учетом местных условий, физико-химических и взрывопожароопасных свойств обращающихся веществ и технологических особенностей производства.

Блоки сигнализации и питания газоанализаторов изготавливаются в обыкновенном исполнении с маркировкой IP00 или IP20 по ГОСТ 12997-84 и должны быть установлены за пределами взрывоопасных зон. Датчики и блоки датчиков выполнены взрывозащищенными с маркировкой взрывозащиты IExdIICT4 или IExdibIICT6 по ГОСТ 12.2.020-76 и могут эксплуатироваться во взрывоопасных зонах помещений всех классов и наружных



установок согласно "Правилам устройства электроустановок" (ПУЭ) и другим документам, регламентирующим применение электрооборудования во взрывоопасных условиях.

Содержание механических, агрессивных примесей: хлора, серы, фосфора, мышьяка, сурьмы и их соединений в окружающей и контролируемой среде, отравляющих каталитически активные элементы датчика, не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК).

Автоматические газоанализаторы могут эксплуатироваться в следующих условиях:

температура окружающей и контролируемой среды:

от  $-45$  до  $+50$  °С – для датчиков;

от  $+1$  до  $+50$  °С – для блока датчика и блока сигнализации и питания;

относительная влажность окружающей и контролируемой среды до 90 % при температуре 25 °С.

Газоанализаторы, укомплектованные датчиками с принудительной подачей контролируемой среды, требуют наличия в месте установки датчика линии сжатого воздуха давлением от 0,25 до 0,6 МПа (от 2,5 до 6 кгс/см<sup>2</sup>). Объемный расход контролируемой среды через датчик, в соответствии с техническим описанием прибора, устанавливается в пределах 25 – 48 л/ч.

Согласно ТУ-газ-86, сигнализаторы дозврывоопасных концентраций необходимо устанавливать во взрывоопасных зонах классов В-1а, В-1б, В-1г, а также в заглубленных помещениях с нормальной средой, куда возможно затекание горючих газов и паров. Вторичные приборы газоанализаторов должны автоматически включать светозвуковую сигнализацию, оповещающую о наличии опасных концентраций взрывоопасных и вредных веществ.

В случаях необходимости, определяемой проектной организацией, от импульса датчиков дозврывных концентраций предусматривается автоматическое отключение технологического оборудования или включение системы защиты.

Световой и звуковой сигналы о наличии взрывоопасных концентраций подаются для постоянно обслуживаемых помещений – в загазованное помещение, для периодически обслуживаемых помещений – у входа в помещение. Данные сигналы также одновременно подаются в операторную или пункт управления производственным комплексом.

Сигналы о срабатывании датчика сигнализатора дозврывных концентраций, установленного на открытой площадке, необходимо подавать в операторную или пункт управления производственным комплексом – световой и звуковой; на открытую площадку – только звуковой.

Световая сигнализация оформляется в виде светового табло, устанавливаемого в хорошо обзореваемом месте, отдельно от сигнализации параметров технологического контроля.

В производственных помещениях с наличием аварийной вытяжной вентиляции блоки сигнализации и питания блокируются с пуском аварийной вентиляции. Она должна автоматически включаться в работу при срабатывании датчиков газоанализаторов.

Монтаж газоанализаторов и подвод электрических цепей к ним проводится в строгом соответствии с действующими "Инструкцией по монтажу электрооборудования силовых и осветительных цепей взрывоопасных зон ВСН-332-74/ММС-СССР", гл.4.3 ПУЭ-2000, гл.ЭЗ-13 "Электроустановки взрывоопасных производств ПТЭ ПТБ" и с техническим описанием на приборы. Для соединения датчика с блоком сигнализации и питания рекомендуется использовать кабель типа РПШЭ 4×1,5 (РПШЕ 4×1,5) или любой другой четырехжильный кабель с наружным диаметром не менее 0,8 и не более 12,5 мм и сопротивлением каждой жилы не более 8 – 10 Ом при длине, равной расстоянию от датчика до блока сигнализации и питания. Электрическое сопротивление изоляции цепей датчика должно быть не менее 20 МОм.

Каждый блок сигнализации и питания заземляется с помощью заземляющего зажима медным проводом сечением 2 – 3 мм<sup>2</sup>. Сопротивление цепи заземления должно составлять не более 4 Ом.

Устанавливаются газоанализаторы в наиболее опасных производственных помещениях с точки зрения возможности образования взрывоопасных смесей (компрессорные горючих газов, насосные сжиженных газов, насосные и складские помещения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей). Поэтому отбор проб контролируемого воздуха к датчикам сигнализаторов и газоанализаторов предусматривается в местах наиболее вероятного выделения и скопления газов и паров в зависимости от их свойств, количества, а также конструктивных особенностей технологического оборудования с соблюдением при этом указаний, изложенных в гл.2 ТУ-газ-86.

В помещениях компрессорных датчик сигнализатора устанавливается у каждого компрессорного агрегата в районе возможных источников утечек перекачиваемой среды (сальники, лабиринтные уплотнения и т.д.) на расстоянии не более 1 м (по горизонтали) от них.

В помещениях насосных сжиженных газов монтируется один датчик сигнализатора довзрывных концентраций на насос или группу насосов при условии, если расстояние от датчика до наиболее удаленного места возможных утечек в этой группе насосов не превышает 3 м (по горизонтали).

В помещениях насосных легковоспламеняющихся жидкостей, а также в других взрывоопасных помещениях предусматривается одно пробоотборное устройство сигнализатора довзрывных концентраций на группу насосов, аппаратов или другого оборудования, при этом расстояние от пробоотборного устройства до наиболее удаленной точки возможных утечек в этой группе насосов, аппаратов или другого оборудования не должно превышать 4 м (по горизонтали). Пример размещения датчиков сигнализаторов во взрывоопасных помещениях приведен на рис. 4.6.

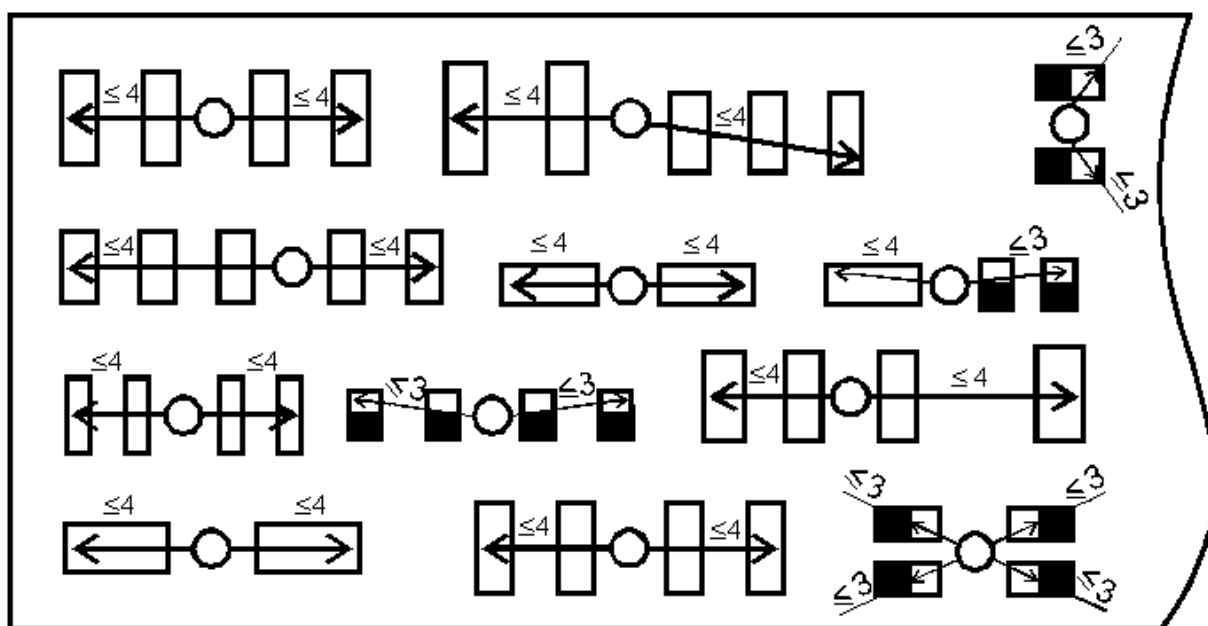


Рис. 4.6. Пример расположения датчиков сигнализаторов довзрывоопасных концентраций в насосных сжиженных газов и ЛВЖ (М:100):

○ – места установки датчиков; □ – насосы, перекачивающие ЛВЖ;  
 ■ □ – насосы, перекачивающие сжиженные газы

В заглубленных помещениях насосных сточных вод, оборотного водоснабжения и др., куда возможно затекание взрывоопасных газов и паров извне, а также складских помещениях при хранении в них ЛВЖ и горючих газов устанавливается по одному пробоотборному устройству на каждые  $100 \text{ м}^2$  площади помещения, но не менее одного датчика на помещение.

Пробоотборные устройства сигнализаторов довзрывных концентраций размещаются по высоте помещений в соответствии с плотностью газов и паров по воздуху (приложение 1 ТУ-газ-86) следующим образом:

при выделении легких газов с плотностью по воздуху не менее 1 – над источником;

при выделении газов с плотностью по воздуху от 1 до 1,5 – на высоте источника или ниже его;

при выделении газов и паров с плотностью по воздуху более 1,5 – не выше 0,5 м от пола.

При наличии в производственном помещении смеси горючих газов и паров с различными плотностями пробоотборные устройства сигнализаторов размещаются по высоте, исходя из плотности того компонента смеси, для которого величина соотношения  $C/\text{НКПР}$  – наибольшая, где  $C$  – концентрация компонента в смеси. НКПР и  $C$  независимо друг от друга могут быть в любых единицах измерения, но одинаковых для всех компонентов смеси.

Если установка сигнализаторов и газоанализаторов производится в помещениях с неплотными или решетчатыми междуэтажными перекрытиями, каждый этаж следует рассматривать как самостоятельное помещение. Допускается (за исключением компрессорных и насосных сжиженных газов) применять автоматические переключатели для попеременной подачи проб контролируемого воздуха от нескольких точек отбора к одному датчику. При этом периодичность анализа для каждой точки отбора не должна превышать 10 мин.

Газоподводящие линии к датчикам сигнализаторов и газоанализаторов выполняются из коррозионно–устойчивых труб с внутренним диаметром от 6 до 12 мм. В месте отбора проб анализируемого воздуха они заканчиваются обращенными вниз воронками высотой от 100 до 150 мм и диаметром от 50 до 100 мм. Время запаздывания поступления проб к датчику за счет длины газоподводящих линий не должно превышать 60 с.

Правила размещения датчиков газоанализаторов на открытых технологических установках (ОТУ) несколько отличаются от правил размещения датчиков в производственных помещениях. Это обусловлено, во-первых, высокой вероятностью образования зон взрывоопасных концентраций на промышленной территории ОТУ как при нормальном (регламентном) режиме работы технологического оборудования, так и при аварийной разгерметизации (полной или частичной) аппаратов, технологических трубопроводов, приводящей к мгновенному выбросу большого количества углеводородного топлива, загазованности территории и образованию облака топливовоздушной смеси (ТВС). Во-вторых, большим числом факторов, влияющих на рассеивание взрывоопасного облака (скорость и направление ветра на момент аварии, характеристика и производительность источника выброса, рельеф местности, состояние атмосферы и т.д.) и, следовательно, невозможностью точно предсказать время образования и координаты области сигнальной концентрации (5 – 50 % НКПР).

Критерием рационального размещения датчиков на промышленной территории является исключение неконтролируемого передвижения облака ТВС за границу технологической установки и предотвращение цепного механизма развития аварии.

Радиус обслуживания датчика  $R$  конвекционно–диффузионного типа характеризуется аналитической зависимостью

$$R = \left[ \frac{r_D^2 V_f - V_f^3}{U_v r_D \sin \gamma} \right]^{0.5} \left[ K \frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} g H \right]^{0.25}, \quad (4.15)$$

где  $r_D$  – расстояние от места аварийного выброса до датчика, м;  $V_f$  – расстояние от места аварийного выброса до границы установки, м;  $U_v$  – скорость ветра, м/с;  $\gamma$  – угол направления ветрового потока;  $\rho$  – плотность вещества в ТВС, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_a$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – высота облака ТВС, м;  $K$  – безразмерный коэффициент.

Результаты исследования данной зависимости показали, что величина радиуса обслуживания  $R$  датчика газоанализатора конвекционно–диффузионного типа в среднем составляет 10 м. Данная величина зафиксирована и в действующем нормативном документе ТУ-газ-86, определяющем требования к установке сигнализаторов–газоанализаторов. Согласно этому документу, при размещении датчика на промышленной территории ОТУ необходимо соблюдать следующие требования:

1. Размещать датчики только на той части площади открытой установки, где расположено оборудование с взрывопожароопасными продуктами.

2. Ближайшие датчики не должны удаляться более чем на 6 м от внешнего периметра открытой установки в сторону расположения на ней оборудования, за исключением случаев, когда оборудование не имеет взрывопожароопасных продуктов. Датчики каждого последующего ряда по отношению к предыдущему ряду датчиков должны быть сдвинуты на величину их радиуса обслуживания, т.е. расположены в шахматном порядке (рис. 4.7).

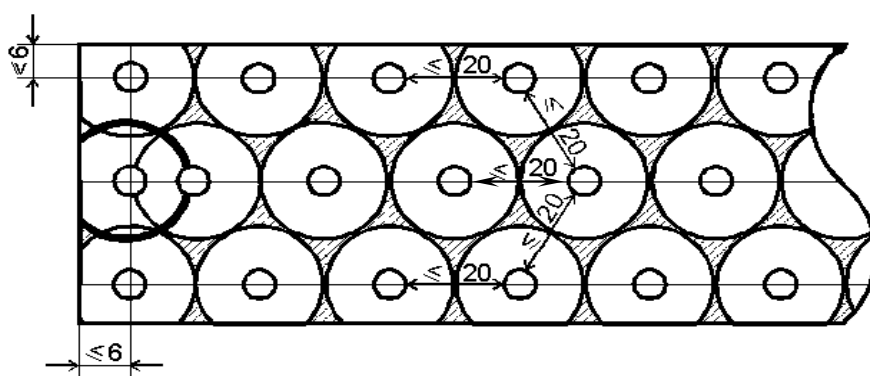


Рис. 4.7. Примерный порядок расположения датчиков сигнализаторов дозврывоопасных концентраций на открытой установке (М:500):

○ – места установки датчиков; // – пространства ("мертвые") зоны, которые не следует учитывать при расстановке датчиков

3. Датчики сигнализаторов дозрывных концентраций следует устанавливать в местах наиболее вероятного выделения и скопления горючих паров и газов, но во всех случаях радиус обслуживания одного датчика не должен превышать 10 м. При графическом определении требуемого количества датчиков образующиеся между кругами зон защиты пространства («мертвые зоны»), не обслуживаемые датчиками, учитывать не следует.

4. Датчики сигнализаторов следует располагать на высоте 0,5 – 1 м от нулевой отметки.

5. На многоярусных открытых этажерках датчики устанавливаются только на нулевой отметке.

6. По периметру наружной установки, обращенному к печам, должно быть установлено не менее одного датчика на печь, при этом датчики сигнализаторов устанавливаются против каждой стороны печи, обращенной к открытой установке.

7. Расстояние от места расположения датчиков сигнализаторов до печей должно быть не менее 15 м.

8. В открытых компрессорных горючих газов, насосных сжиженных газов и легковоспламеняющихся жидкостей, насосов, рассредоточенных по установке датчики сигнализаторов дозрывных концентраций устанавливаются аналогично датчикам в компрессорных и насосных, расположенных в производственных помещениях.

К открытым насосным и компрессорным относятся:

а) насосные и компрессорные, расположенные на открытых площадках или под навесами с частичным ограждением боковых сторон;

б) насосные с частичным ограждением боковых сторон, расположенные под постаментом открытых этажерок;

в) неотапливаемые компрессорные со съемным или раздвигающимся ограждением боковых сторон.

9. На сливноналивных эстакадах следует устанавливать один датчик на две цистерны на нулевой отметке вдоль каждого фронта налива и слива. При двухстороннем фронте налива или слива датчики располагать в шахматном порядке.

#### **4.6. Автоматический контроль запыленности воздушной среды на промышленных объектах**

Одним из источников загрязнения воздушного бассейна промышленных объектов и воздуха производственных помещений (цехов, складов и т.п.) является пыль. Пылью называют дисперсную систему, состоящую из мельчайших твёрдых частиц, находящихся в газовой среде во взвешенном состоянии. Можно выделить атмосферную и промышленную пыль. *Промышленная пыль* образуется в результате производственных процессов.

*Атмосферная пыль* включает промышленную (образующуюся вследствие загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий) и естественную, возникающую при выветривании горных пород, вулканических извержений, ветровой эрозии земель и т.п. К промышленным предприятиям, выбрасывающим пыль в атмосферу и в объём производственных помещений, относятся предприятия чёрной металлургии, теплоэнергетики, химической, нефтеперерабатывающей, керамической, горнорудной, текстильной, пищевой и ряда других отраслей промышленности.

Большое количество взвешенной пыли образуется в результате работы механизмов ударного действия (дробилок, мельниц, разрыхлителей), а также машин и установок, действие которых сопряжено с наличием воздушных потоков (пневмотранспорта, сепараторов и т.п.), узлов загрузки и выгрузки измельченной продукции, транспортёров и др.

Пыль в воздухе может быть причиной ряда заболеваний человека и приносит значительный социальный ущерб. Многие пыли во взвешенном состоянии способны образовывать взрывоопасные концентрации. Величины концентрационных пределов воспламенения пылевоздушных смесей зависят не только от химического состава вещества, но и в значительной мере от степени измельчённости пыли, её влажности, зольности и т.д. Наиболее важное значение имеет нижний концентрационный предел распространения пламени пылевоздушных смесей, так как величина верхнего предела очень высока и практически редко достижима.

Значительную опасность представляет и осевшая пыль, при взвихрении создающая взрывоопасные смеси. Самовозгорающая пыль может вызывать очаги самовозгорания.

Измерение концентрации пыли является трудной задачей. Это обусловлено тем, что пыль представляет собой сложную систему, которую в противоположность газовоздушной среде нельзя описать в достаточной степени одним или двумя параметрами. Прежде всего, пыль почти всегда является полидисперсной, т.е. характеризуется более или менее широким спектром размеров частиц (от  $1^{-2}$  до  $10^2$  мкм). Интервал концентраций является ещё более широким (от  $1^{-8}$  до  $10^5$ ) мг/м<sup>3</sup>. Кроме того, форма и физико-химические свойства частиц пыли могут быть самыми разнообразными. Возможно и временное изменение свойства пыли. Всё это исключает возможность создания универсального метода измерения концентрации пыли. Более того, пылегазовая среда является неустойчивой аэродисперсной системой, а это создаёт существенные трудности при определении пылевых эталонов. В отличие от газоанализаторов, которые основаны как на химических, так и на физических методах измерения, для пылемеров предпочтительными являются физические методы как наиболее полно соответствующие условиям измерения и метрологическим требованиям.

Для измерения концентрации пыли в потенциально взрывопожароопасных помещениях и технологических аппаратах пылемеры должны отвечать и ряду специфических требований: взрывозащищённости, представительности пробы, точности количественной оценки пробы и концентрации, минимальному транспортному запаздыванию, наличию предупредительной аварийной сигнализации и обратной связи для воздействия на источник запыления.

При изменении концентрации пыли важной стадией анализа является отбор проб, так как необходимо обеспечить представительность пробы и её идентичность по дисперсности, химическому составу и концентрации той пыли, из которой проба взята.

Методы измерения концентраций пыли разделяют на две группы: методы, основанные на предварительном её осаждении, и методы без предварительного осаждения пыли.

Преимуществом методов и приборов измерения концентрации пыли, основанных на предварительном её осаждении, является возможность измерения массовой концентрации пыли. К недостаткам следует отнести циклический характер измерения, высокую трудоёмкость, низкую чувствительность анализа. К основным методам измерения концентрации пыли, основанным на предварительном её осаждении, относятся: весовой, радиоизотопный, оптический, пьезометрический и ряд других.

**Весовой метод** измерения концентрации пыли заключается в выделении из полевоздушного потока частиц пыли и определении их массы путем взвешивания.

Концентрацию пыли рассчитывают по формуле

$$C = \frac{m}{V_{\text{в}} t}, \quad (4.16)$$

где  $m$  – масса пыли на фильтре;  $V_{\text{в}}$  – объемная скорость просасывания воздуха через фильтр;  $t$  – время отбора пробы.

Измерение концентрации пыли весовым методом включает отбор пробы запыленного воздуха, измерение ее объема, полное улавливание содержащейся в пробе пыли и взвешивание осажденной пыли.

Весовой метод широко используется для измерения запыленности как атмосферного воздуха и воздуха производственных помещений, так и отходящих газов промышленных выбросов.

**Радиоизотопный метод** измерения концентрации пыли основан на использовании свойства радиоактивного излучения поглощаться частицами пыли. Запыленный воздух предварительно фильтруют и затем определяют массу осевшей пыли по ослаблению радиоактивного излучения при



прохождении его через пылевой осадок. Концентрацию пыли рассчитывают по формуле (4.16), массу  $m$  осевшей на фильтре пыли определяют, исходя из зависимости

$$I_{\text{рад}} = I_{0\text{рад}} \exp(-\mu_m m), \quad (4.17)$$

где  $I_{\text{рад}}$  и  $I_{0\text{рад}}$  – интенсивность радиоактивного излучения после прохождения через пылевой осадок на фильтре и через чистый фильтр;  $\mu_m$  – массовый коэффициент поглощения радиоактивного излучения, равный  $\mu_m = aE_{\text{max}}^{-b}$ ;  $E_{\text{max}}$  – максимальная энергия радиоактивного излучения;  $a$  и  $b$  – константы.

При определении концентрации пыли радиоизотопным методом наиболее широко используют  $\beta$ -излучение, так как оно обладает наиболее широко проникающей способностью. При расчете массы осадка пыли на фильтре необходимо учитывать толщину фильтра, неоднородность его структуры, вследствие чего поглощение  $\beta$ -излучения вдоль фильтра происходит неравномерно. С учетом этих факторов уравнение (4.17) примет вид:

$$I_{\text{рад}} = I_{0\text{рад}} \exp(-\mu_m m - \mu_{\text{ф}} m_{\text{ф}}), \quad (4.18)$$

где  $\mu_{\text{ф}}$  – массовый коэффициент поглощения для фильтра;  $m_{\text{ф}}$  – масса единицы площади фильтра.

Выразив в формуле (4.17) массовые коэффициенты поглощения через слой половинного поглощения  $\beta$ -излучения, получим следующую формулу для определения массы пыли:

$$m = \frac{m_{1/2}}{0,693} \left[ \ln \frac{I_{0\text{рад}}}{I_{\text{рад}}} - \frac{0,693}{m_{1/2\text{ф}}} m_{\text{ф}} \right], \quad (4.19)$$

где  $m_{1/2}$  и  $m_{1/2\text{ф}}$  – слои половинного поглощения  $\beta$ -излучения в осадке пыли и фильтре соответственно.

Следует отметить некоторое преимущество радиоизотопного метода измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе по сравнению с весовым. Так как радиоизотопным методом определяют массу пыли, отнесенную к единице поверхности фильтра, то уменьшение площади последнего не снижает точности измерения, тогда как в весовом методе точность измерения снижается с уменьшением площади фильтра.

В радиоизотопном методе площадь фильтра определяется размерами источника излучения и не превышает  $1 \text{ см}^2$ .

Схема радиоизотопного пылемера приведена на рис. 4.8.

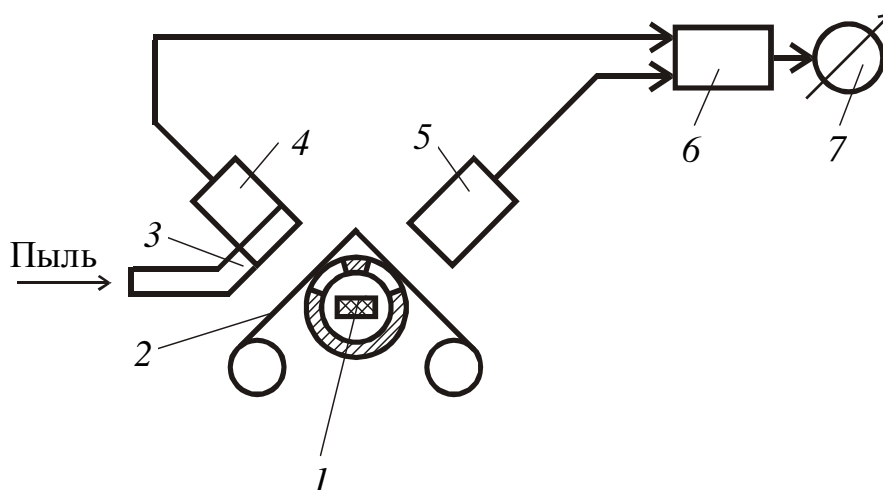


Рис. 4.8. Функциональная схема радиоизотопного пылемера:  
 1 – источник  $\beta$ -излучения; 2 – фильтрующая лента; 3 – газовый канал;  
 4 – измерительная ионизационная камера; 5 – компенсационная камера;  
 6 – усилитель; 7 – измерительный прибор

**Оптический метод** измерения концентрации пыли основан на предварительном ее освещении в фильтре и определении оптической плотности пылевого осадка. Метод включает операции, аналогичные операциям весового метода, но вместо взвешивания пылевого осадка проводят его фотометрирование. Оптическую плотность пылевого осадка можно определить путем измерения поглощения или рассеяния им света. Измерение оптической плотности пылевого слоя основано на определении снижения интенсивности света  $I$ , прошедшего через слой пыли:

$$I = I_0 \exp(-ECI), \quad (4.20)$$

где  $I_0$  – интенсивность нанесенного светового потока;  $C$  – концентрация пыли, накапливаемой на фильтре;  $E$  – показатель поглощения света, проходящий на единицу концентрации пыли;  $l$  – толщина слоя пыли.

Оптическая плотность  $D$  пылевого слоя равна

$$D = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = 0,434ECI. \quad (4.21)$$

Поскольку при осаждении пыли на фильтр изменяются как её концентрация  $C$ , так и толщина слоя  $l$ , то при измерении оптической плотности пылевого слоя можно определить суммарную величину  $Cl$ , являющуюся поверхностной концентрацией  $C_{\text{пов}}$  пыли на фильтре:

$$C_{\text{пов}} = Cl, \quad (4.22)$$

отсюда

$$D = 0,434EC_{\text{пов}},$$

т.е. между оптической плотностью образовавшегося пылевого слоя и поверхностной концентрацией пыли существует линейная зависимость. Измерив  $D$  и зная показатель  $E$ , можно определить  $C_{\text{пов}}$ :

$$C_{\text{пов}} = D/0,434E. \quad (4.23)$$

Концентрация пыли может быть также определена через коэффициент пропускания  $\tau = I/I_0$ , который связан с оптической плотностью следующим выражением:

$$D = \lg(l/\tau). \quad (4.24)$$

Подставив значение  $D$  в уравнение, получим:

$$C_{\text{пов}} = \lg(l/\tau)/0,434E. \quad (4.25)$$

Схема фотометрического пылемера приведена на рис. 4.9.

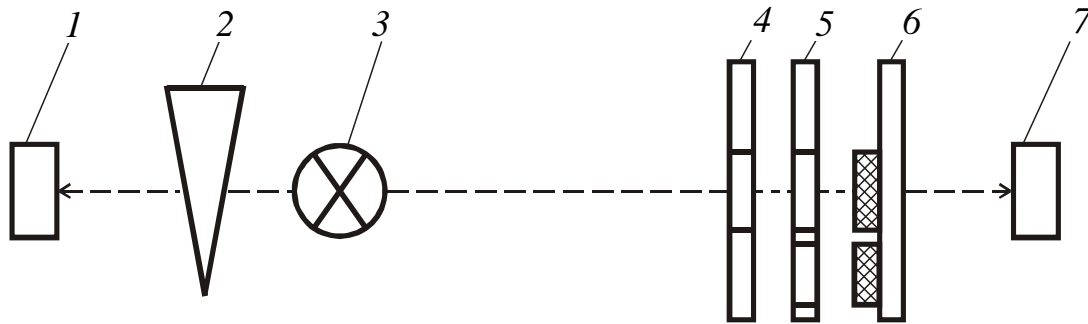


Рис. 4.9. Оптическая схема пылемера:

1 – фотоприемник сравнения; 2 – регулирующий винт; 3 – источник света;  
4 – заслонка; 5 – классификатор; 6 – фильтр; 7 – измерительный фотоприемник

**Пьезометрический метод** измерения концентрации пыли имеет два варианта:

**Пьезокристаллический метод.** Измерение изменений частоты колебаний пьезокристалла при осаждении на его поверхности частиц пыли и подсчет электрических импульсов, возникающих при соударении частиц пыли с пьезокристаллом. Пьезокристалл включают в контур резистора, настроенного на определенную частоту  $f$ . За измеренным кристаллом устанавливают компенсационный пьезокристалл, изолированный от пылевоздушного потока. Этот кристалл включен в контур резонатора, частота которого  $f_k$  отлична от  $f$ . Выходные колебания обоих резисторов подают на блок сравнения, выходной сигнал которого пропорционален разности  $\Delta f = f - f_k$ .

При осаждении пыли на измерительный кристалл частота колебаний последнего уменьшается на  $\Delta f_k$ , при этом изменяется разность

$$\Delta f_2 = f - f_k = \Delta f - \Delta f_1. \quad (4.26)$$

Установлено, что при малых амплитудах колебаний

$$\Delta f_1 = Am, \quad (4.27)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, т.е. изменение частоты измерительного кристалла прямо пропорционально массе  $m$  осевшей на нем пыли. Схема пьезокристаллического пылемера приведена на рис. 4.10.

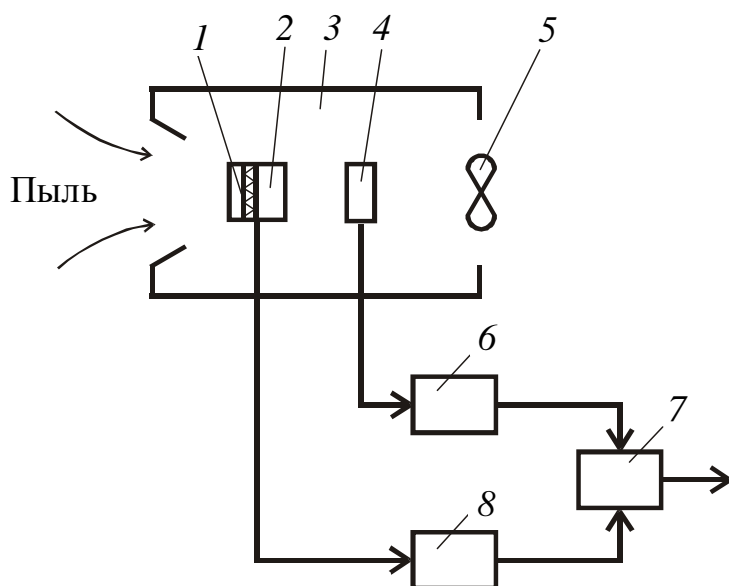


Рис. 4.10. Схема пьезокристаллического пылемера:  
1 – липкое покрытие; 2 – измерительный пьезокристалл; 3 – корпус;  
4 – компенсирующий кристалл; 5 – вентилятор; 6, 8 – резонаторы;  
7 – блок сравнения

Существенным преимуществом пьезокристаллического метода является то, что он позволяет измерить массовую концентрацию пыли.

Методы и приборы измерения концентрации пыли без предварительного ее осаждения также основаны на целом ряде методов.

Оптический метод основан на явлении поглощения света при прохождении его через пылевоздушную среду. Согласно закону Бугера–Ламберта – Бера, оптическая плотность  $D$  слоя пылевоздушной среды заданной толщины  $l$  прямо пропорциональна коэффициенту поглощения  $E$  и концентрации пыли  $C$  в этой среде. Данное утверждение справедливо, если предположить, что пыль состоит из абсолютно черных сферических частиц одинакового диаметра и коэффициент поглощения не зависит от концентрации.

Как следует из уравнения (4.20), чувствительность оптического метода равна

$$\frac{\Delta T}{\Delta C} = -EI l_0 \exp(-ElC) = -EI l. \quad (4.28)$$

Таким образом, чувствительность метода тем выше, чем больше коэффициент поглощения  $E$ , толщина поглощаемого слоя  $l$  и интенсивность изменения светового потока  $I$ , прошедшего через пылевоздушную среду. При измерении малых концентраций пыли для повышения чувствительности используют зеркальные системы, чтобы световой поток дважды проходил через измеряемую пылевоздушную среду. Для каждого вида пыли следует определить оптимальное значение  $l$ , при котором чувствительность измерения будет максимальной.

Интенсивность прошедшего светового потока при заданных  $E$  и  $l$  можно увеличить, используя мощный источник света, например лазер.

Оптический метод измерения концентрации пыли, использующий ослабление света, также имеет преимущества: малую трудоемкость, практически безинерционность измерения и возможность измерения непосредственно в пылевоздушной среде при полной автоматизации процесса. Метод позволяет определять мгновенные значения концентрации пыли без внесения возмущений в исследуемую среду (рис. 4.11).

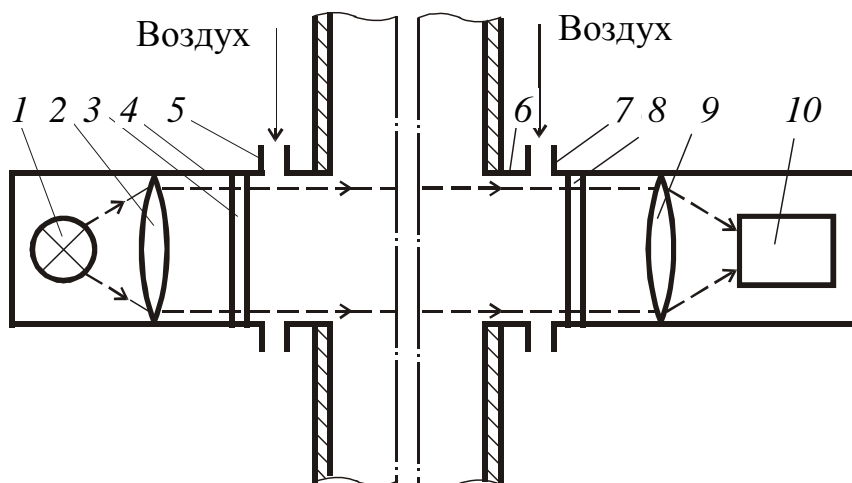


Рис. 4.11. Схема пылемера непрерывного действия:

1 – источник света; 2 – линза; 3, 8 – защитные окна; 4, 6 – патрубки; 5, 7 – отверстия для подачи чистого воздуха; 9 – объектив; 10 – фотоприемник

**Голографический метод.** Анализ аэрозольных частиц был одной из первых областей применения голографии (1964 г.). Голографический метод основан на получении голограммы, которая представляет собой нало-

жение дифракционной картины поля частиц и поля источника света. Метод позволяет получить информацию о счётной концентрации частиц, их размере и положении в пространстве. На рис. 4.12 дана схема установки для получения голограммы.

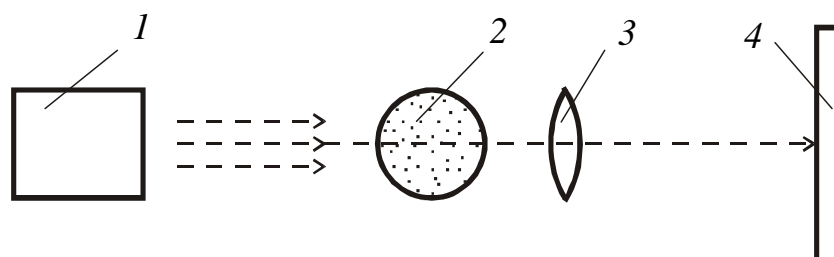


Рис. 4.12. Установка для получения голограмм частиц пыли:  
1 – лазер; 2 – измерительная камера; 3 – линза; 4 – голограмма

Для восстановления изображения по голограмме используют тест – неоновый кадр с непрерывным излучением, который освещает голограмму (рис. 4.13). Восстанавливаемое изображение помещают в фокус линзы, которая проецирует с увеличением одну из изображённых плоскостей на трубку телевизионной камеры. Изображение этой плоскости наблюдается на телевизионном экране. Общее увеличение достигает 300.

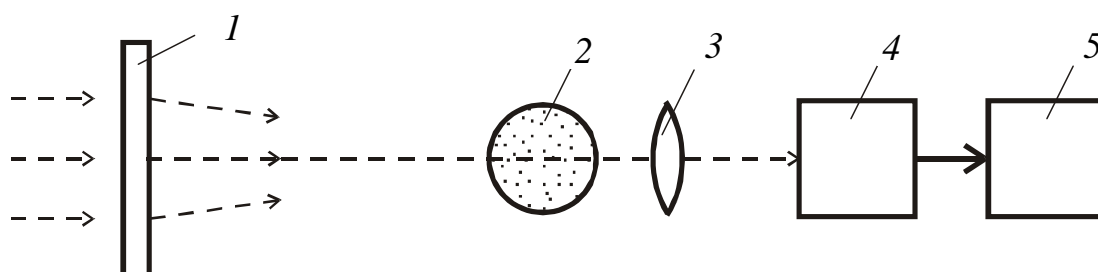


Рис. 4.13. Установка для восстановления изображения по голограмме частиц пыли:  
1 – голограмма; 2 – восстанавливаемое изображение; 3 – линзы;  
4 – телевизионная камера; 5 – телевизионный экран

Смещая голограмму по направлению к линзе и телевизионной камере, можно исследовать любую плоскость голографического изображения, анализируя при этом распределение частиц пыли в контролируемом пространстве. С помощью метода голографии можно измерить частицы в интервале 0,1 – 1000 мкм, при котором загрязнение атмосферного воздуха измеряется на больших расстояниях.

Съёмка частиц в любом объёме с помощью голографической установки осуществляется за время освещения  $10^{-8}$  с.

**Метод лазерного зондирования.** Для измерения концентрации атмосферной пыли на больших пространствах и пыли, выбрасываемой в атмосферу промышленными предприятиями, удалёнными от места измерения на расстояние до 10 км, используют оптические дистанционные методы. Наиболее пригодны для этой цели оптические методы анализа в видимой и ближней инфракрасной области спектра с применением лазерных роботов-лидаров.

Схема прибора приведена на рис. 4.14.

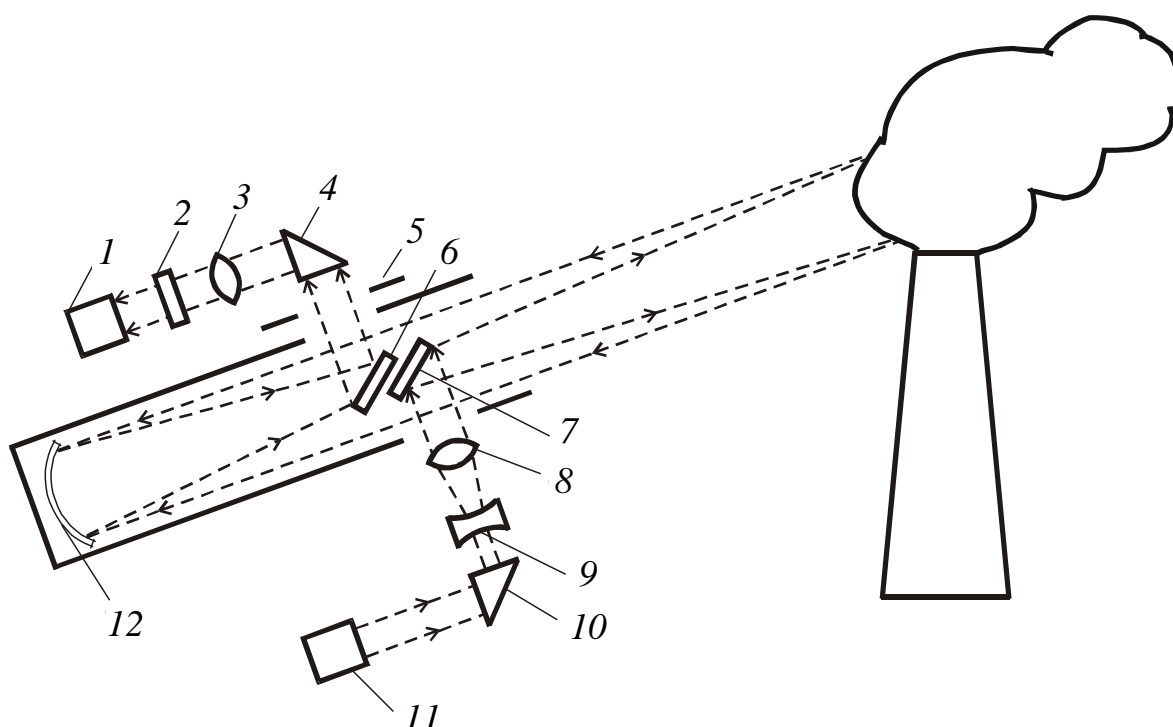


Рис. 4.14. Оптическая схема лазера:

1 – фотоумножитель; 2 – светофильтр; 3, 8, 9 – линзы; 4, 10 – призмы;  
5 – диафрагма; 6, 7, 12 – зеркала; 11 – лазер

Лазерное зондирование атмосферы впервые было осуществлено в 1963 г. Пылевые слои были обнаружены на высоте 60 – 120 км. Метод лазерного зондирования основан на свойствах частиц поглощать или рассеивать лазерное излучение. При изменении света, рассеянного частицами, лазер и фотоприёмник располагают рядом и последний регистрирует интенсивность обратнорассеянного излучения (метод обратного рассеяния). Измерение поглощения лазерного излучения частицами можно проводить двумя способами. Когда лазер и фотоприёмник удалены на значительное расстояние или когда лазер и фотоприёмник расположены рядом, а лучи

лазера отражаются от зеркального отражателя, удалённого на значительное расстояние. Принцип действия лазера аналогичен принципу действия радиолокатора. Основным элементом его является лазер, используемый в качестве источника импульсного излучения. Обычно применяются рубиновые или неодимовые лазеры. Мощность в импульсе этих лазеров достигает десятков мегаватт. Длительность зондирующих импульсов лежит в пределах  $(1 - 2)10^{-8}$  с. Импульсы направляются на исследуемый объект с помощью соответствующей оптической системы. Обратное излучение, рассеиваемое объектом, собирается с помощью линзовой и зеркальной системы и направляется на фотоумножитель и после усиления подаётся на осциллограф или для записи на магнитные диски. Метод лазерного зондирования имеет существенные преимущества перед другими методами измерения концентрации пыли, так как он позволяет исследовать пространственно-временную структуру запылённости воздуха и выявить источники пылевыделения.

Для измерения концентрации пыли в воздухе в непрерывном режиме используются и электрические методы.

**Индукционный метод.** В основу индукционного метода положено определение индуцированного на электроде измерительной камеры заряда, возникающего при движении через камеру заряженных пылевых частиц, что является мерой массовой концентрации пыли.

**Контактно-электрический метод** основан на способности пылевых частиц электризоваться при соприкосновении с твёрдым материалом. Основным элементом пылемера, основанного на контактно-электрическом методе, является электризатор, в котором электроду частицы пыли передают свой заряд.

Сила тока в цепи токосъёмного электрода является мерой концентрации частиц пыли.

**Ёмкостный метод** основан на измерении ёмкости конденсатора при введении частиц пыли между его пластинами. Если конденсатор включить в цепь колебательного контура, частота собственных колебаний которого сравнивается с эталонной, то по разности частот можно судить о концентрации пыли. При использовании ёмкостного метода следует учитывать электрические свойства пыли, так как проводящая пыль может изменить ёмкость конденсатора.

**Акустический метод** определения концентрации пыли основан на измерении изменений параметров акустического поля при наличии частиц пыли в пространстве между источником и приёмником звука. Потери ультразвуковой энергии, обусловленные влиянием взвешенных твёрдых частиц, зависят от ряда физических параметров: радиуса частиц, их плотности и концентрации и т.п.