

УДК 621.384 : 543.544 : 681.3 : 622.235.22.002

А. М. Онищенко, А. Ю. Онищенко

*(Люберцы Московской обл.)***НОВЫЙ МЕТОД ИНФРАКРАСНОГО МОНИТОРИНГА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Описан принципиально новый метод инфракрасного мониторинга содержания общей и угольной пыли, а также дымовых газов в выбросах промышленных предприятий. Метод основан на измерении интенсивности инфракрасного излучения, рассеянного в направлении вперед и прошедшего через контролируемый слой воздуха. Искомая концентрация пыли или газа определяется по величине отношения интенсивностей в разных диапазонах длин волн. Метод позволяет расширить функциональные возможности путем определения разных концентраций одновременно и в несколько раз уменьшить погрешность.

Многокомпонентный бесконтактный контроль вредных веществ с высокой представительностью содержания в выбросах в атмосферу необходим на многих предприятиях. Стремление снизить суммарную погрешность измерения обычно усложняет прибор, и вследствие этого увеличивается стоимость измерения, снижается надежность по внезапным отказам, ухудшается технологичность конструкции, снижается быстродействие, усложняются градуировка и обслуживание, увеличиваются стоимость и время разработки прибора, а также его габариты и вес. Эти противоречия наиболее эффективно преодолеваются в процессе корректной оптимизации прибора [1].

Одновременный сопоставительный анализ задач контроля, требований к информационно-измерительным приборам (ИИП) и возможностей различных принципов и методов измерений содержания компонентов в выбросах предприятий показал, что наиболее перспективно использование разных эффектов взаимодействия инфракрасного излучения (ИК) с материалом выброса предприятия. С этой точки зрения наиболее важными являются три особенности взаимодействия ИК-излучения с продуктами выброса предприятия. Первая особенность заключается в наличии полос (поглощения, отражения, рассеивания) различных газов, пыли и влаги (паров воды) в спектре ИК-излучения. Вторая особенность связана с неодинаковыми изменениями коэффициентов поглощения (рассеивания) ИК-излучения различными компонентами от длины волны. Особо отметим при этом, что состав пыли в дыме любого предприятия остается практически постоянным в течение длительного времени. Он может измениться при изменении марок угля либо технологии горения. В обоих случаях необходима переградуировка, включающая определение новых значений коэффициентов поглощения (рассеивания) ИК-излучения различными компонентами на разных длинах

волн. Третья особенность взаимодействия ИК-излучения с продуктами выброса заключается в очень важной для повышения точности измерений возможности получения двух противоположных зависимостей интенсивностей регистрируемого ИК-излучения от содержания различных компонентов в выбросах (первая интенсивность растет с увеличением содержания компонента, вторая – падает).

Интенсивность прошедшего через слой загрязненной выбросом атмосферы толщиной d ИК-излучения I_n экспоненциально уменьшается с ростом содержания (концентрации) C измеряемого компонента (интенсивности здесь и далее приняты безразмерными величинами):

$$I_n = I_0 \exp(-K_n d C), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность прошедшего ИК-излучения при нулевом содержании контролируемого компонента $C = 0$; K_n – приборная константа, физический смысл которой соответствует коэффициенту ослабления ИК-излучения компонентом (например, в единицах $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$, если d измеряется в метрах, а C – в $\text{г}/\text{м}^3$).

Авторами впервые предложен и доведен до практического применения новый метод рассеянного в направлении вперед излучения (в отличие от метода обратного рассеивания излучения) [2]. Основной особенностью метода является расположение источника излучения (И) и детектора (Д) (фотоприемника (ФП)) с противоположных сторон от объекта контроля (ОК), имеющего конечную толщину d . На рис. 1 показаны основные варианты геометрий нового метода для узкого пучка излучения (a), параллельного пучка излучения (b и c) и коллимированного с помощью коллиматора (К) пучка от близкого к точечному источника (d и e). В более сложных геометриях И может быть точечным или плоским косинусоидальным. Детектор (фотоприемник) может находиться как за пределами пучка излучения, так и в его пределах, если перед детектором установлен экран (Э), препятствующий прохождению прямого излучения от источника к детектору. При этих геометриях метода рассеянного в направлении вперед излучения на детектор попадают лишь те кванты излучения, которые при прохождении через объект контроля претерпели, по крайней мере, одно рассеивание ИК-излучения на частицах или молекулах компонентов выброса и в результате изменили направление своего первоначального распространения.

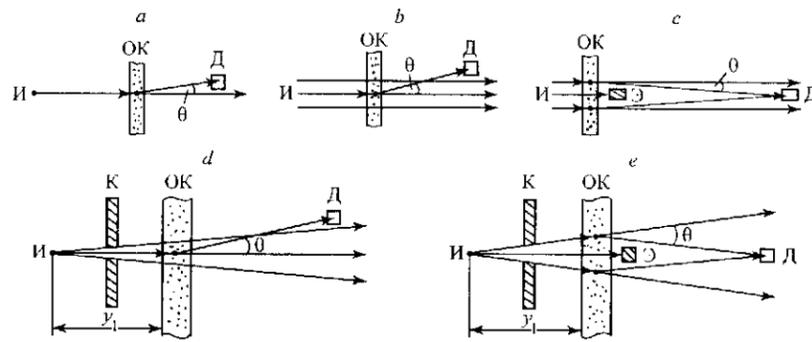
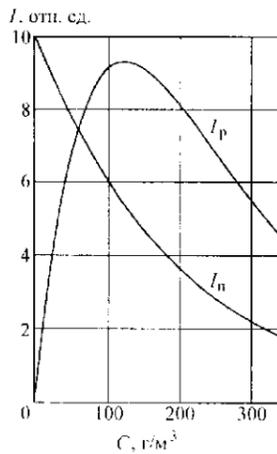


Рис. 1. Геометрии измерений метода рассеянного в направлении вперед излучения

Рис. 2. Зависимости интенсивностей $I_n = f(C)$ и $I_p = f(C)$ инфракрасного излучения, прошедшего через слой пыли, при $\lambda = 7,6-8,4$ мкм



Зависимость интенсивности рассеянного вперед и регистрируемого ФП ИК-излучения I_p от содержания C измеряемого компонента описывается выражением

$$I_p = I_0' + \sigma d C \exp(-K_n' d C), \quad (2)$$

где σ и K_n' — соответственно коэффициенты рассеивания вперед и ослабления ИК-излучения измеряемым компонентом в $\text{м}^2/\text{г}$.

На рис. 2 приведены графики зависимостей $I_n = f(C)$ при $I_0 = 10, d = 1$ м и $K_n = 0,005 \text{ м}^2/\text{г}$ и $I_p = f_1(C)$ при $I_0' = 0,1, d = 1$ м, $K_n' = 0,008 \text{ м}^2/\text{г}$ и $\sigma = 0,2 \text{ м}^2/\text{г}$. Видно, что I_n экспоненциально уменьшается с ростом C во всем диапазоне изменения содержания, причем относительная чувствительность к содержанию

$$S_n = \frac{dI_n}{dC} \frac{1}{I_n} = -K_n d I_0 \exp(-K_n d C) [I_0 \exp(-K_n d C)]^{-1} = -K_n' d \quad (3)$$

равна $(-K_n' d)$ и не зависит от C . Для приведенной на рис. 2 зависимости $I_n = f(C)$ относительная чувствительность к содержанию компонента равна $-4,88 \%$ изменения сигнала, приходящегося на изменение содержания на $10 \text{ г}/\text{м}^3$.

На зависимости $I_p = f_1(C)$ наблюдается пологий максимум, середина которого соответствует значению $K_n' d C = 1$ (т. е. значению $C = 125 \text{ г}/\text{м}^3$ для кривой $I_p = f_1(C)$ на рис. 2). Относительная чувствительность рассеянного в направлении вперед ИК-излучения определяется по формуле

$$S_p = \frac{dI_p}{dC} \frac{1}{I_p} = \sigma d \exp(-K_n' d C) (-K_n' d C + 1) [I_0' + \sigma d \exp(-K_n' d C)]^{-1}. \quad (4)$$

Анализ формулы (4) показывает, что относительная чувствительность S_p рассеянного в направлении вперед ИК-излучения к искомой концентрации положительна в пределах изменения C от $C_{\min} = 0$ до C_{\max} , определяемого из условия $K_n' C_{\max} d = 1$, причем значение S_p плавно уменьшается от $S_p = 1968 \%$ при изменении $\Delta C = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ до $S_p = 0$ при $C = (K_n' d)^{-1} = 125 \text{ г}/\text{м}^3$. При увеличении $C > (K_n' d)^{-1}$ относительная чувствительность S_p плавно увеличивается от 0 до $S_p = -4,64 \%$ изменения сигнала на величину C на $10 \text{ г}/\text{м}^3$. Зависимости $|S_n| = f(C)$ и $|S_p| = f_1(C)$, соответствующие графикам на рис. 2, показаны на рис. 3.

При контроле содержания C по интенсивности ИК-излучения основные изменения интенсивности при $C = \text{const}$ вызваны тремя причинами (загряз-

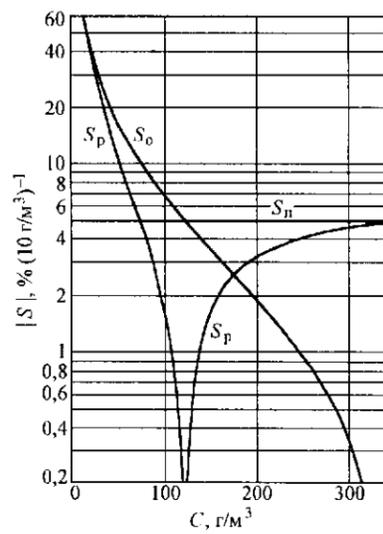


Рис. 3. Зависимости чувствительностей к интенсивности инфракрасного излучения от концентрации при поглощении и рассеивании инфракрасного излучения в направлении вперед $|S_n| = \varphi(C)$, $|S_p| = \varphi_1(C)$, $|S_o| = \varphi_2(C)$

нением окон И и ФП, изменением интенсивности ИК-излучения от источника и изменением температуры облака при взрывании массива), приводящими к возникновению недопустимо большой погрешности. Сопоставительный анализ многочисленных эвристических приемов уменьшения различных погрешностей, описанных в [1, 2], показывает, что свести эту погрешность к минимуму наиболее эффективно можно использованием метода отношений. Если измеряемую концентрацию C

определять по величине отношения η двух сигналов I_p и I_n :

$$\eta = I_p I_n^{-1} = [I'_0 + \sigma d C \exp(-K'_n d C)] [I_0 \exp(-K_n d C)]^{-1}, \quad (5)$$

то она не будет зависеть от одинаковых относительных изменений I_n и I_p , вызванных тремя указанными причинами. Этот подход к повышению точности контроля продуктов выбросов предприятий в окружающую среду вводится впервые. Характер зависимости $\eta = f(C)$ (для приведенных на рис. 2 графиков) показан на рис. 4, а, б. На рис. 3 приведена также зависимость от-

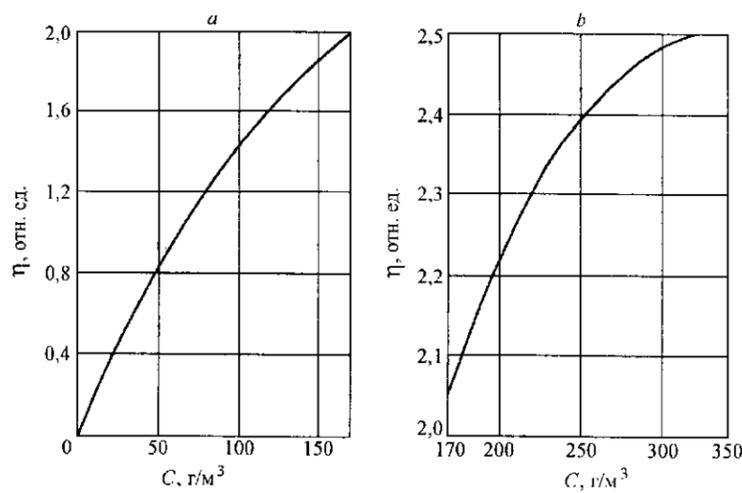


Рис. 4. Зависимости величины отношения интенсивностей рассеянного вперед и прошедшего через контролируемый слой инфракрасного излучения

носительной чувствительности величины отношения $\bar{S}_c = \frac{dn}{dC} \frac{1}{\eta}$ от концентрации C . Видно, что метод отношений позволяет с высокой точностью контролировать C при $d = 1$ м в пределах концентраций от 0 до 175 г/м^3 , для которых выполняются условия $|S_o| > |S_n|$ и $|S_o| > |S_p|$.

В качестве примера оптимизации рассмотрим конкретную задачу контроля состава дыма крупных ТЭЦ и ТЭС, работающих на угле, мазуте или на том и другом. Пусть, например, в приоритетный ряд необходимого контроля входят: содержание углерода (мелкодисперсной угольной пыли в дыме) C_y , общее содержание всей разнообразной пыли в дыме C_o , водяных паров C_v , углекислого C_k и угарного C_r газов. Зависимости ослабления инфракрасного излучения угольной $K_{\text{ТУ}}$, известняковой $K_{\text{ПИ}}$ и песчаниковой $K_{\text{ПП}}$ пылью показаны на рис. 5. Особо отметим при этом, что приведенные на рисунке спектры ослабления ИК-излучения не изменяют присущий им характер в течение очень длительного времени. Это объясняется тем, что ситовый состав частичек дыма остается практически постоянным, причем подавляющее большинство частичек имеет размеры в узком диапазоне 15–20 мкм (более 95 % частиц по массе).

Как следует из графиков на рис. 5 и литературных данных, в диапазоне длин волн около 8 мкм коэффициенты рассеивания (ослабления) ИК-излучения угольной, известняковой и песчаниковой пылью почти одинаковы, полосы поглощения ИК-излучения дымовыми газами (угарным, углекислым, сернистым и др.) отсутствуют, а у паров воды в этом диапазоне длин волн они малы. Поэтому контроль суммарного содержания пыли в отработанных газах ТЭЦ и ТЭС до и после фильтрации целесообразно проводить по величине отношения η в диапазоне длин волн от 7,6 до 8,4 мкм, что и показано на рис. 3 и 4.

Для селективного контроля содержания частиц углерода в отработанных газах наиболее перспективны (информативны) длины волн около 3,2 и 10,5 мкм, где коэффициенты ослабления ИК-излучения контролируемыми газами и парами воды отсутствуют. Видно, что при длине волны около 3,8 мкм коэффициенты ослабления ИК-излучения углеродом (углем) $K_{\text{ТУ}}$ намного меньше соответствующих коэффициентов ослабления известняковой $K_{\text{ПИ}}$ и песчаниковой $K_{\text{ПП}}$ пылью, когда $K_{\text{ПИ}} = K_{\text{ПП}} \gg K_{\text{ТУ}}$, причем

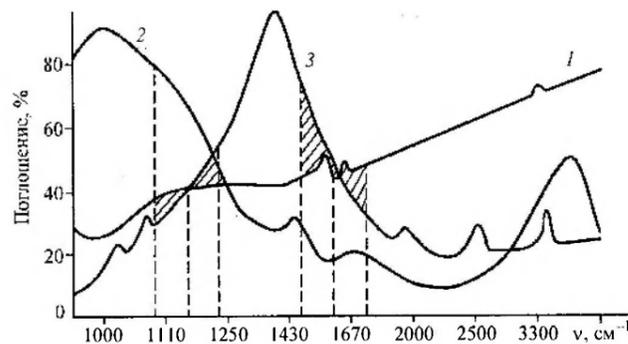


Рис. 5. Спектры ослабления инфракрасного излучения угольной $K_{\text{ТУ}}$ (кривая 1), известняковой $K_{\text{ПИ}}$ (кривая 2) и песчаниковой $K_{\text{ПП}}$ (кривая 3) пылью

$K_{\text{пи}} K_{\text{пу}}^{-1} \rightarrow \max$ при $\lambda \rightarrow 3,5$ мкм. Поэтому если измерить отношение $\eta = I_p I_{\text{п}}^{-1}$ при $\lambda = 7,6-8,4$ мкм, определить по нему общую концентрацию пыли C и измерить отношение $\eta_1 = I'_p (I'_{\text{п}})^{-1}$ при $\lambda_1 = 3,0-3,4$ мкм, то по двум сигналам η и η_1 можно определить и общую концентрацию пыли C , и концентрацию угольной пыли C_y в выбросе предприятия.

Контроль концентраций паров H_2O , CO и CO_2 наиболее перспективно проводить на длинах волн ИК-излучения соответственно около 1,5; 4,67 и 4,3 мкм, которые соответствуют сильным полосам поглощения ИК-излучения H_2O , CO и CO_2 и в которых коэффициенты ослабления ИК-излучения известняковой и песчаниковой пылью близки между собой. Для задач контроля других газов по ИК-излучению отметим следующее. Для контроля концентрации паров воды можно также использовать полосы поглощения ИК-излучения (мкм): 1,095–1,165; 1,32–1,95; 2,52–2,85; 4,24–4,4; 5,25–7,5, а для контроля концентрации углекислого газа – полосы поглощения (мкм): 1,38–1,5; 1,52–1,67; 1,92–2,1; 2,64–2,87; 4,63–4,95; 5,05–5,35 и 12,5–16,4. Окись углерода можно контролировать также на длине волны около 4,7 мкм, закись азота – на длинах волн около 4; 4,5 и 7,8 мкм. Концентрацию метана наиболее целесообразно контролировать на длинах волн около 3,1; 3,5 и 7,7 мкм. При этом необходимо учитывать также, что в случае контроля на длинных трассах в десятки метров наиболее целесообразно работать в окнах прозрачности атмосферы (мкм): 1,15–1,35; 1,5–1,8; 2,1–2,4; 3,3–4,2; 4,5–5,1 и 8–13.

Определение концентрации C по величине отношения двух интенсивностей ИК-излучения в разных диапазонах длин волн имеет три важных преимущества по сравнению с известными инфракрасными методами измерений. Во-первых, метод отношений позволяет резко уменьшить мультипликативную погрешность из-за изменений напряжения питания, влажности и давления воздуха, если измерительная схема сосредоточена в общем корпусе и имеет общий блок питания. Во-вторых, метод отношений двух интенсивностей дает возможность резко уменьшить погрешность вследствие флуктуаций многих неконтролируемых влияющих параметров объекта контроля, параметров окружающей среды и самого прибора, если эти параметры приводят к односторонним (в идеальном случае к одинаковым относительным) изменениям обоих измеряемых сигналов X_1 и X_2 с выходов фотоприемников ФП. В-третьих, метод отношений позволяет резко повысить точность за счет увеличения чувствительности к измеряемой концентрации путем обеспечения разных по знаку чувствительностей к C для обоих сигналов, когда в функции $f(X_1/X_2)$ одновременно увеличивается числитель и уменьшается знаменатель с ростом C (или наоборот, как это имеет место для интенсивностей I_p и $I_{\text{п}}$). Однако в большинстве реальных случаев сигналы X_1 и X_2 при $C = \text{const}$ распределены по нормальному (гауссовому) закону и в той или иной степени стохастически связаны между собой. Поэтому необходимо рассмотреть в теоретическом плане сущность повышения точности метода отношений для случая определения искомой концентрации по величине двух интенсивностей инфракрасного излучения.

В общем случае сигналы X_1 и X_2 при $C = \text{const}$ являются непрерывными случайными величинами и флуктуируют по нормальному закону, когда выполняются соотношения: $Y = \varphi(X_1, X_2) = X_1/X_2$, $X_1 = \psi(Y, X_2) = X_2 Y$ и $|d\psi(Y, X_2)/dY| = |X_2|$. Если известна совместная плотность вероятности двумерного распределения сигналов $p(x_1, x_2)$, то, следуя [3], плотность

распределения отношения инфракрасных сигналов $p(y)$ определяется по формуле

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x_2/y, x_2) |x_2| dx_2 \quad (6)$$

при функции $Y = \varphi(X_1, X_2)$, монотонной относительно X_1 и X_2 . Это выполняется при условии, когда I_p монотонно увеличивается с ростом C . Если же функция $Y = \varphi(X_1, X_2)$ немонотонна ни относительно X_1 , ни относительно X_2 , то интервал возможных значений какого-либо из случайных сигналов, например X_1 , разбивают на строго монотонные участки, на каждом из которых эта функция строго монотонна относительно X_1 . При этом плотность распределения отношения находится из формулы

$$p(y) = \sum_j \int_{-\infty}^{\infty} p(\psi_j(y, x_2), x_2) |d\psi_j(y, x_2)/dx_2| dx_2, \quad (7)$$

где j – монотонные участки функции. Если, например, $Y = \varphi(X_1, X_2)$ немонотонна относительно X_2 на интервале $(-\infty, \infty)$ возможных значений X_2 , то интервал разбивают на два участка $(-\infty, 0)$ и $(0, \infty)$, на которых функция $Y = \varphi(X_1, X_2) = X_1/X_2$ строго монотонна относительно X_2 . На этих участках существуют строго монотонные функции $X_2 = \psi_1(Y, X_1) = X_1/Y$ и $X_2 = \psi_2(Y, X_1) = X_1/Y$, обратные исходной функции $Y = \varphi(X_1, X_2)$. Принимая во внимание эти результаты и учитывая, что $|d\psi_1(Y, X_1)/dY| = |d\psi_2(Y, X_1)/dY| = |X_1|/Y^2$, с помощью формулы (7) получим

$$\begin{aligned} p(y) &= \int_{-\infty}^0 p(x_1, x_1/y) |x_1|/y^2 dx_1 + \int_0^{\infty} p(x_1, x_1/y) |x_1|/y^2 dx_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_1/y) |x_1| dx_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Формулы (5)–(8) позволяют вывести плотность распределения отношения (X_1/X_2) для любого заданного двумерного закона плотности совместного распределения сигналов $p(x_1, x_2)$. Однако до настоящего времени плотности вероятности $p(y)$ выведены лишь для наиболее простых видов распределений $p(x_1, x_2)$ и в большинстве случаев для независимых центрированных непрерывных случайных величин (сигналов).

Для отношения двух независимых нормально распределенных сигналов X_1 и X_2 с математическими ожиданиями \bar{X}_1 и \bar{X}_2 и дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 плотность распределения при условии, когда область изменений X_2 имеет пределы $\pm 3\sigma_2$ и ограничена положительными значениями (что соответствует рассматриваемому случаю), запишется в виде

$$\begin{aligned} p_1(y) &= (1/\sqrt{2\pi}) (\bar{X}_2 \sigma_1^2 + \bar{X}_1 \sigma_2^2 y) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 y^2) \times \\ &\times \exp((\bar{X}_1 - \bar{X}_2 y)^2 / (2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 y^2))), \end{aligned} \quad (9)$$

причем величина $(\bar{X}_1 - \bar{X}_2 Y)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 Y^2)^{-1/2}$ распределена нормально с нулевым средним и единичной дисперсией. В общем виде формулы математического ожидания, дисперсии, асимметрии и эксцесса для распределения $p_1(y)$ до настоящего времени не получены.

Формула распределения отношения нормально распределенных центрированных относительно математических ожиданий сигналов X_1 и X_2 , коррелированных между собой с коэффициентом корреляции ρ , имеет вид:

$$p_2(y) = \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1 - \rho^2} (\pi(\sigma_2^2 y^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_1^2))^{-1}. \quad (10)$$

В частном случае для независимых центрированных сигналов из (10) получим распределение Коши.

Определим математическое ожидание $M_2(y) = \bar{Y}_2$ отношения центрированных сигналов с плотностью вероятности $p_2(y)$ согласно (10):

$$\begin{aligned} M_2(y) = \bar{Y}_2 &= \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1 - \rho^2} [\pi]^{-1} \left[\int_0^{\infty} - \int_{-\infty}^0 \right] y dy [\sigma_2^2 y^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_1^2]^{-1} = \\ &= \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1 - \rho^2} [\pi]^{-1} [\ln|\sigma_2^2 y^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_1^2|] [2\sigma_2^2]^{-1} + \\ &+ \rho [\sigma_2^2 \sqrt{1 - \rho^2}]^{-1} \arctg[\sigma_2 y - \rho\sigma_1] [\sigma_1 \sqrt{1 - \rho^2}]^{-1} \Big|_{-\infty}^{\infty} = \rho\sigma_1 [\sigma_2]^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Моментов больше второго порядка распределение плотности вероятности $p_2(y)$ не имеет, а теоретическая дисперсия отношения центрированных непрерывных случайных величин равна бесконечности. Поэтому для установления зависимости дисперсии отношения центрированных коррелированных друг с другом случайных сигналов (X_1'/X_2') от σ_1 и σ_2 и ρ были построены зависимости $p_2(y)$.

Влияние коэффициента корреляции ρ на вид плотности распределения $p_2(y)$ иллюстрируется рис. 6. Так как площадь под кривой распределения всегда должна оставаться постоянной и равной единице, то при увеличении $|\rho|$ кривая $p_2(y)$ вытягивается вверх, одновременно сужаясь с боков, и становится более иглообразной. При уменьшении абсолютного значения коэффициента корреляции кривая распределения $p_2(y)$ становится более плоской, растягиваясь вдоль оси абсцисс. Поэтому с ростом $|\rho|$ среднеквадратическое отклонение σ отношения (X_1/X_2) уменьшается (особенно сильно при увеличении $|\rho| > 0,9$), а с уменьшением $|\rho|$ величина σ растет. С уменьшением величины отношения среднеквадратических отклонений σ_2/σ_1 распределение $p_2(y)$ становится более пологим, т. е. увеличивается σ и энтропийное значение случайной погрешности определения контролируемого параметра, например влажности, по величине отношения пары инфракрасных сигналов (X_1, X_2) . Если соотношение среднеквадратических отклонений сигналов приближается к условию $\sigma_2 = \rho\sigma_1$, то кривая плотности вероятности отношения сигналов $p_2(y)$ очень резко вытягивается вверх, сжимаясь с боков, а величина погрешности σ быстро уменьшается.

Поэтому для повышения точности определения любого компонента в дымовых трубах ТЭЦ и ТЭС по величине отношения инфракрасных сигнала-

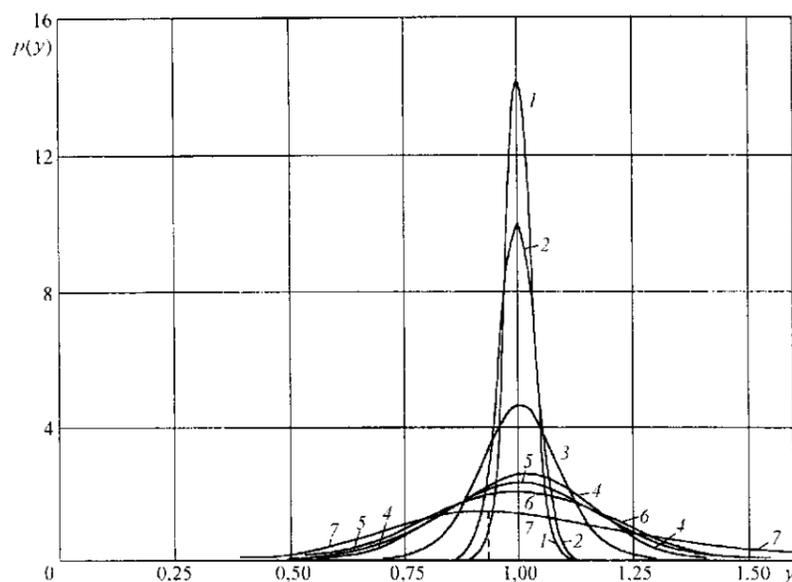


Рис. 6. Зависимости плотности распределения отношения нормально распределенных сигналов (X_1 , X_2) от изменений коэффициента корреляции между сигналами: 1 - $\rho = 0,9$; 2 - $0,6$; 3 - $0,4$; 4 - $0,3$; 5 - $0,2$; 6 - $0,1$; 7 - $0,06$

лов (X_1/X_2) путем уменьшения погрешности σ нужно выбирать сигналы X_1 и X_2 с большими значениями абсолютных коэффициентов корреляции $|\rho| \rightarrow \max$ и с малыми среднеквадратическими отклонениями флуктуаций сигналов при постоянном значении контролируемого параметра σ_1 и σ_2 , причем σ_2 следует устремлять к значению произведения $\rho\sigma_1$.

Для общего случая нормально распределенных коррелированных друг с другом сигналов плотность распределения их отношения имеет вид:

$$p_3(y) = \frac{\sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1-\rho^2}}{\pi(\sigma_1^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 y + \sigma_2^2 y)} \exp\left\{ \frac{-\bar{X}_1^2 \sigma_2^2 - 2\rho\bar{X}_1 \bar{X}_2 \sigma_1 \sigma_2 + \bar{X}_2^2 \sigma_1^2}{2(1-\rho^2)\sigma_1^2 \sigma_2^2} \right\} \times [1 + \sqrt{2\pi} Z F_0(Z) \exp(Z^2/2)], \quad (12)$$

где

$$Z = (\bar{X}_2 \sigma_1^2 - \rho \bar{X}_1 \sigma_1 \sigma_2 + \bar{X}_1 \sigma_2^2 y - \rho \bar{X}_2 \sigma_1 \sigma_2 y) \times \{ \sigma_1 \sigma_2 [(1-\rho^2)(\sigma_2^2 y^2 - 2\rho\sigma_1 \sigma_2 y + \sigma_1^2)]^{1/2} \}^{-1},$$

$$F_0(Z) = (2\pi)^{-1} \int_0^y \exp(-Z^2/2) dZ = F(y) - 1/2 = (1/2)\Phi(y/\sqrt{2}),$$

$F(y)$ - интеграл Лапласа; $\Phi(y)$ - интеграл вероятности. Видно, что при $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0$ формула (12) преобразуется в (10), а при выполнении дополнительного условия независимости нормально распределенных центрированных

сигналов $\rho = 0$ формула (10) преобразуется в распределение Коши. Анализ формулы (12) показывает, что σ резко уменьшается как при увеличении $|\rho|$, так и при приближении отношения (σ_2/σ_1) к значению ρ .

Для уточнения количественного влияния относительных среднеквадратических отклонений σ_1 и σ_2 сигналов X_1 и X_2 и коэффициента корреляции ρ между сигналами на величину относительного среднеквадратического отклонения σ отношения (X_1/X_2) значение σ , следуя [4], рассчитывают по приближенной формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2}. \quad (13)$$

Проведенные исследования распределения отношения сигналов позволили получить следующие простые по интерпретации и важные для повышения точности инфракрасного контроля окружающей среды выводы.

Резкое уменьшение всех составляющих погрешности определения любой контролируемой концентрации обеспечивает выбор таких сигналов X_1 и X_2 , значения которых изменяются в противоположные стороны с ростом контролируемой концентрации, причем чем больше значения этих относительных изменений, тем информативнее сигналы. Объясняется это тем, что при увеличении чувствительности отношения (X_1/X_2) к контролируемой концентрации обратно пропорционально уменьшаются все составляющие погрешности, если они выражены непосредственно в единицах контролируемой концентрации.

Для существенного уменьшения погрешности из-за флуктуаций неконтролируемых и влияющих параметров компонентов выбросов в окружающую среду сигналы X_1 и X_2 выбирают с таким расчетом, чтобы относительные чувствительности к этим параметрам были одинаковыми по знаку и по возможности более близкими по относительной величине.

Снижение случайной погрешности отношения (X_1/X_2) достигается выбором положительно коррелированных друг с другом сигналов $\rho > 0$ при $C = \text{const}$ с малыми случайными погрешностями σ_1 и σ_2 , а дополнительное уменьшение погрешности обеспечивается приближением σ_2 к произведению $(\sigma_1\rho)$ (что следует из графиков на рис. 6) и строгим выполнением неравенства $(\bar{X}_2 - 3\sigma_2) > 0$, усиление которого при прочих равных условиях вытягивает кривые плотности распределения отношения $p_2(y)$ или $p_3(y)$ вверх и сжимает с боков.

Для снижения инструментальной составляющей погрешности отношения сигналов (X_1/X_2) целесообразно иметь сигналы X_1 и X_2 из идентичных первичных измерительных преобразователей (одного типа, выполненных из одного материала фотоприемников и т. п.) и обрабатывать их для получения $C = f(X_1/X_2)$ в идентичных электронных блоках. Минимальное значение инструментальной погрешности обеспечивают фотоприемники, изготовленные из единого кристалла, например, разрезанием кристалла на пары фотоприемников лазером.

На рис. 7 приведена функциональная схема прибора для одновременного контроля общего содержания пыли C_p , угля в облаке взрыва C_y , влаги C_v , угарного C_r и углекислого C_k газов. Поток полиэнергетического ИК-излучения от электрического источника (И) коллимируется коллиматором (К) на многодиапазонный фотоприемник (ФП1). Рядом с пучком коллимированного ИК-излучения установлен аналогичный многодиапазонный фотопри-

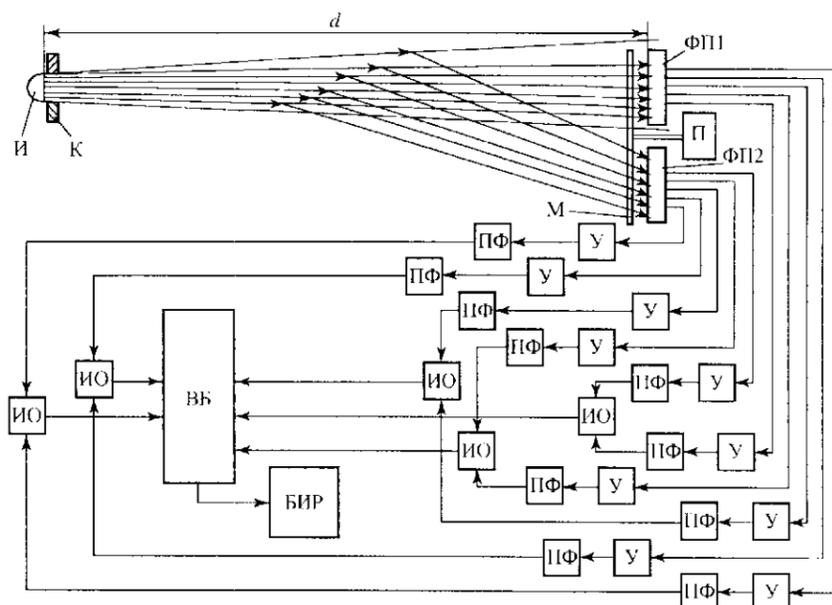


Рис. 7. Функциональная схема прибора для комплексного контроля состава продуктов взрыва-ния на разрезах

емник (ФП2). Перед фотоприемниками ИК-излучения установлен модулятор (М) с приводом (П). Сигналы с фотоприемников через усилители (У) подаются на полосовые фильтры (ПФ), выделяющие сигналы с фотоприемников с частотой модуляции. Выходы полосовых фильтров фотоприемников ФП1 и ФП2 с сигналами, соответствующими одинаковым длинам волн, соединены со входами измерителей отношений (ИО), выходы которых, в свою очередь, соединены с входами вычислительного блока (ВБ). Результаты вычислений содержания (концентраций) компонентов индицируются и регистрируются в блоке индикации и регистрации (БИР).

Конструкция многодиапазонных фотоприемников (ФП1 и ФП2) показана на рис. 8. ФП1 представляет собой линейку (болометры из Ge, охлаждаемые фотодиоды из PbSnTe и т. д., например, типа ФКМ-1) 2–6 и узкополосные интерференционные фильтры 14–18, каждый из которых приклеен к входному окну соответствующего фотоприемника. Фильтры выполнены на диапазоны пропускания соответственно длин волн 7,6–8,4; 3,0–3,4; 1,3–1,7; 4,5–4,7 и 4,1–4,5 мкм. Фотоприемники 2–6 установлены в пределах прямого пучка ИК-излучения. ФП2 представляет собой аналогичную линейку фотоприемников 7–11 с узкополосными интерференционными фильтрами 19–23 на те же диапазоны длин волн. Все фотоприемники 2–6 и 7–11 выполнены из единого кристалла и после его приклеивания к подложке 1 разрезаны лазером по линиям 12 и 13. Фотоприемники 7–11 установлены за пределами пучка ИК-излучения в непосредственной близости от края пучка, который проходит по середине линии разреза 13. Выходы 24 фотоприемников 2–6 и выходы 25 фотоприемников 7–11 соединены со входами усилителей. Выходы усилителей соединены со входами измерителей отношений.

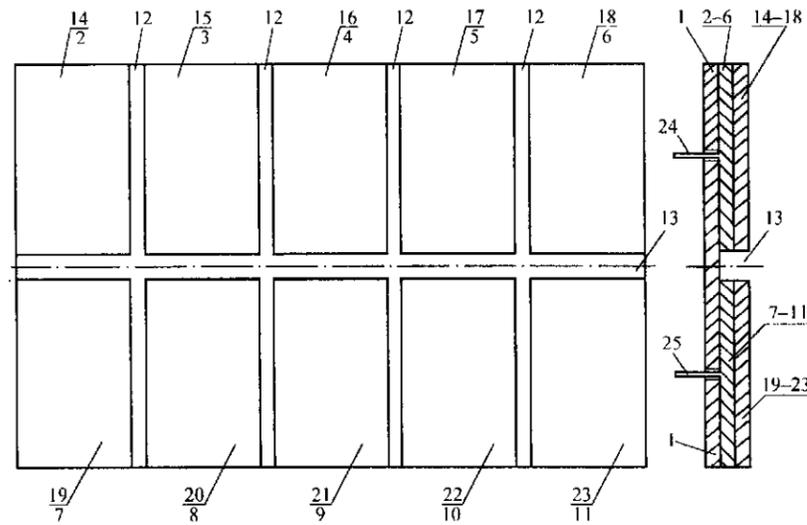


Рис. 8. Конструкция линеек фотоприемников и фильтров

Интенсивности прошедшего через слой дыма толщиной d ИК-излучения на ФП1 в каждом из пяти диапазонов длин волн (7,6–8,4 мкм для C_n , 3,0–3,4 мкм для C_y , 1,3–1,7 мкм для C_b , 4,5–4,7 мкм для C_r и 4,1–4,5 мкм для C_k) экспоненциально уменьшаются с ростом соответствующего содержания (концентраций), и сигналы на выходах ФП1 определяются аналогично формуле (1) по выражениям:

$$I_n = I_{0n} \exp(-K_{П1} d C_n), \quad I_y = I_{0y} \exp(-K_{П1} d C_y), \quad I_b = I_{0b} \exp(-K_{П1} d C_b),$$

$$I_r = I_{0r} \exp(-K_{П1} d C_r), \quad I_k = I_{0k} \exp(-K_{П1} d C_k). \quad (14)$$

Интенсивности рассеянного вперед в слое дыма толщиной d ИК-излучения на ФП2 в каждом из пяти диапазонов длин волн изменяются с изменениями соответствующих концентраций по аналогичным (2) формулам:

$$I_{П1} = I'_{0П1} + \sigma_n d C_n \exp(-K'_{П1} d C_n), \quad I_{П2} = I'_{0П2} + \sigma_y d C_y \exp(-K'_{П2} d C_y),$$

$$I_{П3} = I'_{0П3} + \sigma_b d C_b \exp(-K'_{П3} d C_b), \quad I_{П4} = I'_{0П4} + \sigma_r d C_r \exp(-K'_{П4} d C_r), \quad (15)$$

$$I_{П5} = I'_{0П5} + \sigma_k d C_k \exp(-K'_{П5} d C_k).$$

На выходах пяти измерителей отношений формируются сигналы соответствующих отношений, которые выражаются по аналогичным (5) формулам:

$$\eta_n = [I'_{0П1} + \sigma_n d C_n \exp(-K'_{П1} d C_n)] [I_{0П1} \exp(-K_{П1} d C_n)]^{-1},$$

$$\eta_y = [I'_{0П2} + \sigma_y d C_y \exp(-K'_{П2} d C_y)] [I_{0П2} \exp(-K_{П2} d C_y)]^{-1},$$

$$\eta_b = [I'_{0П3} + \sigma_b d C_b \exp(-K'_{П3} d C_b)] [I_{0П3} \exp(-K_{П3} d C_b)]^{-1}, \quad (16)$$

$$\eta_r = [I'_{OГ} + \sigma_r dC_r \exp(-K'_{ПГ} dC_r)] [I_{OГ} \exp(-K_{ПГ} dC_r)]^{-1},$$

$$\eta_k = [I'_{OК} + \sigma_k dC_k \exp(-K'_{ПК} dC_k)] [I_{OК} \exp(-K_{ПК} dC_k)]^{-1}.$$

Как следует из приведенных на рис. 4, a и b графиков, зависимости (16) могут быть аппроксимированы параболой вида $\eta = -aC^2 + bC$. В действительности каждое отношение по уравнениям (16) зависит одновременно от нескольких концентраций компонентов, хотя чувствительность отдельных отношений к одной соответствующей концентрации компонента и является преобладающей. Поэтому более точные аппроксимирующие уравнения, в каждом из которых учтены основные по влияющему действию компоненты, имеют вид:

$$\eta_n = -a_{ПП} C_n^2 + b_{ПП} C_n - a_{ПУ} C_y^2 + b_{ПУ} C_y,$$

$$\eta_y = -a_{УП} C_n^2 + b_{УП} C_n - a_{УУ} C_y^2 + b_{УУ} C_y,$$

$$\eta_v = -a_{ВВ} C_v^2 + b_{ВВ} C_v - a_{ВК} C_k^2 + b_{ВК} C_k - a_{ВУ} C_y^2 + b_{ВУ} C_y - a_{ВП} C_n^2 + b_{ВП} C_n,$$

(17)

$$\eta_r = -a_{ГГ} C_r^2 + b_{ГГ} C_r - a_{ГУ} C_y^2 + b_{ГУ} C_y - a_{ГП} C_n^2 + b_{ГП} C_n,$$

$$\eta_k = -a_{КК} C_k^2 + b_{КК} C_k - a_{КУ} C_y^2 + b_{КУ} C_y - a_{КП} C_n^2 + b_{КП} C_n.$$

В пределах концентраций пыли от 0 до 175 г/м³ погрешность аппроксимации уравнений (17) не превышает 1 % от измеряемой концентрации, а для содержаний водяных паров в пределах от 0 до 100 % и угарного и углекислого газов от 0 до 20 % по объему не превышает 0,6 %. Такие погрешности аппроксимации являются вполне допустимыми.

По пяти сигналам с выходов ИО в вычислительном блоке, согласно (17), определяется пять неизвестных концентраций компонентов. Из первого уравнения системы (17) однозначно определяется содержание общей пыли C_n в облаке взрыва. Подставив этот результат C_n во второе уравнение системы (17), определим содержание угольной пыли в выбросе предприятия C_y и общее содержание породной пыли: $C_{пор} = C_n - C_y = C_{изв} + C_{пес}$, где $C_{изв}$ и $C_{пес}$ – содержание известняковой и песчанниковой пыли в выбросе предприятия. Зная C_n , C_y и $C_{пор}$, из трех остальных уравнений системы (17) находим содержание (концентрацию) водяного пара C_v , угарного C_r и углекислого C_k газов в выбросе предприятия. По значениям отношений η_n и η_r определяется также температура в выбросе предприятия, так как эти отношения лежат по разные стороны от пика ИК-излучения материала выброса и их значения наиболее информативны для определения температуры дыма выброса. В процессе градуировки прибора определяют значения всех коэффициентов в системе уравнений (17), например, по описанной в работе [1] методике градуировки при нелинейных зависимостях.

Дополнительного снижения инструментальной составляющей суммарной погрешности достигают выбором идентичных пар многодиапазонных фотоприемников ФП1 и ФП2, а также идентичных для каждого диапазона длин волн пар усилителей и полосовых фильтров. Желательно подбирать та-

кие близкие по параметрам измерители отношений для каждого прибора. Для увеличения значений измеряемых концентраций можно уменьшить толщину контролируемого слоя дыма, а для уменьшения диапазона измеряемых концентраций при одновременном увеличении чувствительностей к концентрациям и как следствие при уменьшении погрешности увеличивают толщину контролируемого слоя дыма.

Пример реализации устройства для контроля дыма на трассе 3 м при использовании источника ИК-излучения в виде глобара мощностью 2 Вт. Определялось общее содержание пыли в отработанных газах C_p и содержание угольной пыли C_y в пределах изменения концентраций от 0,1 до 340 г/м³ со среднеквадратической погрешностью не более 0,5 % от измеряемой концентрации. Содержание углекислого и угарного газов находилось в диапазоне от 0,2 до 20 % по объему со среднеквадратической погрешностью не более 0,6 % от измеряемой концентрации. Определялась относительная влажность отработанных газов в диапазоне от 1 до 100 % со среднеквадратической погрешностью не более 0,6 % от измеряемой относительной влажности.

Отметим при этом, что до настоящего времени ни в России, ни за рубежом не созданы приборы для одновременного непрерывного определения содержаний C_p , C_y , $C_{г}$, $C_{к}$ и $C_{в}$. Кроме того, существующие приборы инфракрасного контроля концентраций газов (например, типа ГОА-4 или ГИАМ-5М) имеют обычно основную погрешность более чем ± 2 % при верхнем значении диапазона в 100 % и более чем ± 4 % при других меньших верхних значениях диапазона [5], т. е. описанный пример реализации устройства имеет основную погрешность, в 3–10 раз меньшую, нежели известные приборы инфракрасного контроля. Это подтверждает правильность заложенных в созданный способ технических решений.

Описанный принципиально новый метод мониторинга окружающей среды может быть успешно реализован в диапазонах видимого света, радиоволн, нейтронного и γ -излучений. Метод перспективен также при создании лазерных систем мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Онищенко А. М.** Оптимизация приборов для контроля состава веществ. М.: Машиностроение, 1990.
2. **Онищенко А. М.** Методы повышения точности приборов с источниками ионизирующего излучения. М.: Изд-во стандартов, 1987.
3. **Гнеденко Б. В.** Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1988.
4. **Худсон Д.** Статистика для физиков: Пер. с англ. /Под ред. Е. М. Лейкина. М.: Мир, 1967.
5. **Промышленные приборы и средства автоматизации:** Справочник /Под ред. В. В. Черенкова. Л.: Машиностроение, 1987.

*Институт горного дела
им. А. А. Скочинского РАН*

*Поступила в редакцию
24 мая 1998 г*