

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
имени А.И.ВОЕЙКОВА

Выпуск 477

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ
АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

ЛЕНИНГРАД
ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
1984

7-78

УДК 55Г.510.42 + 543.27

Сборник посвящен актуальной проблеме создания автоматизированных систем контроля загрязнения воздушного бассейна города, а также вопросам разработки технических средств газового анализа с целью количественной оценки загрязнения города. Рассматриваются вопросы математического моделирования загрязнения применительно к использованию в автоматизированных системах наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха и использование их для контроля.

Сборник представляет интерес для научных и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и применением аппаратуры автоматизированного контроля загрязнения воздушной среды, а также для студентов и аспирантов ВУЗОВ соответствующих специальностей.

The book is dedicated to the actual problem of developing the automatized systems for urban basin pollution control as well as to the tasks of developing gas analysis instrumentation for urban pollution assessment. The problems of pollution mathematical models used in air pollution control automatized systems are considered.

The publication will be of interest to researchers and engineering stuff engaged in developing and employing instrumentation of automatized air pollution control as well as to students and postgraduates specializes in appropriate fields.

101
327021

М $\frac{1903040000=039}{069(02)=84}$ 40=82(2)

© Главная геофизическая
обсерватория
имени А.И.Воейкова, 1984

В.И. Красов

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ГОРОДА

Важным направлением природоохранной деятельности в настоящее время является системный подход к управлению различными природными средами: водой, почвой и атмосферой. При этом система мониторинга, предназначенная для наблюдения, оценки и прогноза состояния окружающей среды, все чаще используется как важнейшая составная часть управления средой и регулирования ее качества [6].

Значительные успехи имеются в создании автоматизированных систем контроля и управления качеством атмосферного воздуха различного назначения: для регулирования загрязнения воздушного бассейна отдельными крупными предприятиями (например, металлургическим заводом в г. Куре и в районе г. Кобе, Япония [12, 22]); для управления воздушной средой промышленного района города (например, в окрестностях Лиона, Франция [19]) и города в целом (Осака, Япония [18]); наконец, для управления воздушной средой отдельных регионов (например, в префектуре Тиба, Япония [23]).

Анализ перечисленных систем, а также опыт разработки систем контроля загрязнения атмосферы в нашей стране позволяют сделать следующие выводы: все известные системы строятся по одному принципу и имеют сходный состав. В состав систем входят диспетчерский пункт с ЭВМ и связанная с ним линиями связи распределенная в пространстве сеть станций контроля. Системы различаются по количеству измеряемых компонентов загрязнения и выбросов, метеорологических характеристик атмосферы и характеру обработки полученной информации, зависящей от выполняемых задач. Структурная схема типовой системы представлена на рис. 1, где О - объект управления, В - возмущения, действующие на объект, ИС_в - измерительные станции загрязнения (АСКЗА), ИС_в - измерительные станции выбросов (АСКЗВ), ИП - измерительные преобразователи загрязнения и метеопараметров, АЦП - аналого-цифровые преобразователи, ЛС - линии связи, К - коммутатор, УО - устройство обработки, УП - устройство прогнозирования, УУ - устройство управления, УИ - устройство индикации (дисп-

лей, цифровое табло), УР - устройство регистрации (телетайп, перфоратор, ЦПУ), Р - регуляторы уровня выбросов, ИУ - исполнительные устройства.

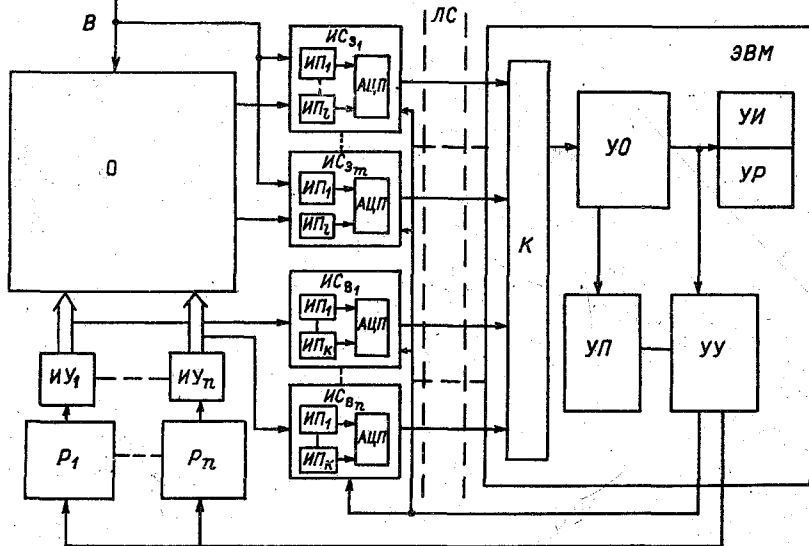


Рис. 1. Структурная схема системы контроля и управления атмосферой

Концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, количество выбросов, а также метеорологические параметры воспринимаются измерительными преобразователями (газоанализаторами и метеодатчиками) станций контроля, преобразуются в дискретный сигнал и в соответствии с командами, поступающими с диспетчерского пункта передаются по линиям связи городской АТС в ЭВМ, где производится обработка сигналов, выдача на выходные устройства информации о текущих значениях загрязнения, прогноз уровня загрязнения на ближайшее время в зависимости от метеорологических условий, а также формирование (при необходимости) управляющего воздействия на регуляторы источников выбросов.

Особенности системы (рис. 1) определяются свойствами объекта управления - воздушного бассейна города. К ним относятся: характер распределения в пространстве полей регулируемых компонентов загрязнения, взаимодействие полей при определенных условиях, влияние на характер распределения полей регулируемых компонентов возмущающих воздействий (прежде всего полей ветра и температуры). Объекты такого класса относятся к распределенным и описание их в матричной

осуществляется с помощью системы уравнений в частных производных или в дискретной форме в виде системы уравнений в конечных разностях.

С целью определения этапов разработки системы регулирования преобразуем схему, изображенную на рис. 1 к форме, принятой в теории автоматического регулирования, полагая, что в системе реализуется сформулированный ранее принцип двухуровневого управления [9]. Функциональная схема системы приведена на рис. 2.

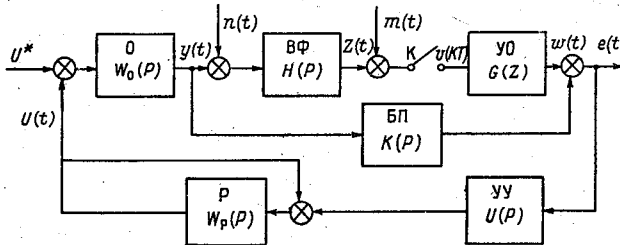


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля и управления.

Здесь $y(t)$ - действительное значение измеряемого параметра; $h(t, \tau)$ - импульсная переходная функция измерительного преобразователя входного фильтра (ВФ), по которому берутся отсчеты; K - импульсный элемент (ключ), осуществляющий преобразование непрерывного сигнала в импульсный; $K(t, \tau)$ - импульсная переходная функция блока, производящего преобразование выходного сигнала $y(t)$ к желаемому виду $L(t)$ (в нашем случае $L(t)$ приведено к среднему значению за данный интервал с помощью оператора K и равно $Ky(t)$); $n(t)$ - помеха, действующая на объект (например, ветер, температура, радиация и т.д.), приведенная ко входу измерительного преобразователя; $m(t)$ - помеха измерения (например, ошибка квантования по уровню сигнала $z(t)$ на выходе датчика. В указанной структурной схеме регулируемая переменная $y(t)$, управляющая переменная $U(t)$ и другие являются распределенными сигналами, а блоки, в которых производятся операции преобразования сигналов, являются распределенными блоками [3]; это необходимо учитывать при выполнении структурных преобразований.

Как видно из рис. 2, рассматриваемая система управления является многомерной, дискретной, динамической системой, в которой как полезный сигнал, так и помехи измерения носят случайный характер.

Основными задачами при создании системы управления объектами такого типа являются: идентификация объекта, т.е. создание математической модели воздушного бассейна, адекватно отражающей динамические свойства процесса загрязнения атмосферы в управляемой области; синтез оптимальной системы управления качеством воздушной среды города, обеспечивающей оперативное формирование регулирующих воздействий при опасных для загрязнения атмосферы метеорологических условиях.

Методы математического моделирования по данным, полученным в результате эксперимента - идентификация, получили широкое распространение при управлении и прогнозе состояния сложных объектов (технических, физиологических, биологических). Естественно поэтому использовать теорию идентификации для управления рассматриваемого природного объекта - воздушного бассейна города.

С помощью математической модели описывают реальный процесс загрязнения атмосферы при известных условиях (см. рис. 3), измеряют $y^*(kT)$ и $U(t)$, определяют статистические характеристики шумов $n(t)$ и $m(t)$ и устанавливают физическое соотношение между $y^*(kT)$, $y(t)$ и $m(t)$. Сведя к минимуму ошибку $\varepsilon(kT)$, можно отыскать $g(kT)$, при котором выходная координата $y_{k_0}(t)$ максимально приближается к реальному выходу $y^*(kT)$. Обычно используется квадратичный критерий

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T \varepsilon^2(kT) dt.$$

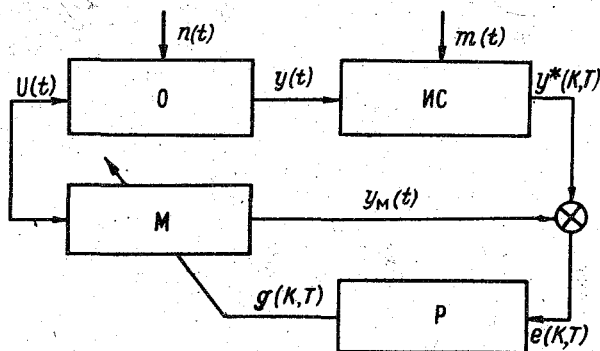


Рис. 3. Схема системы идентификации.

При решении задачи необходимо определить модель процесса, которая обеспечит возможность оперативного управления воздушным бассейном. Специальными требованиями на модель являются:

- оценка состояния загрязнения атмосферы в реальном времени;
- краткосрочный прогноз загрязнения;

- учет динамических особенностей процесса загрязнения воздушного бассейна города;

- учет влияния на загрязнение метеорологических параметров и других характеристик воздушной среды в пограничном слое атмосферы города.

Специфической особенностью воздушного бассейна как объекта регулирования, является зависимость распространения загрязняющих веществ в городской атмосфере от характеристик метеорологических параметров, их пространственно-временной изменчивости в приземном и пограничном слое, влияния притока солнечной радиации, осадков и т.д. Кроме того временные колебания метеорологических параметров носят сложный характер и включают в себя различные аperiodические и периодические составляющие суточного, сезонного и годового хода. Наиболее полное их описание дают статистические методы с применением различных видов нестационарных моделей.

Статистический анализ наблюдений [4] позволяет установить, что, например, суточные колебания температур представляют собой случайный процесс, нестационарность которого проявляется не только в изменении математического ожидания и дисперсии, но и в зависимости нормированной корреляционной функции от временного сдвига и начала отсчета.

По своей природе пульсации метеозаэментов связаны с атмосферной турбулентностью и имеют чрезвычайно широкий спектр, особенностью которого является наличие в нем двух максимумов: синоптического, соответствующего колебаниям с периодом около 4 дней и микрометеорологического, отвечающего пульсациям с периодом около 1 мин. и разделяющего их мезометеорологического минимума в области колебаний с периодами от нескольких минут до нескольких часов. Такая особенность метеорологических спектров имеет важное значение для получения оценок средних значений метеозаэментов.

Большое внимание следует уделить не абсолютным средним оценкам, характеризующим множество возможных ситуаций, а частным, относящимся к определенному сезону, определенному времени при определенных метеорологических условиях. Вопрос об оптимальном выборе интервала осреднения, позволяющего сгладить микропульсации параметров и, в то же время, учесть вклад низкочастотных составляющих спектра, имеет важное значение при проектировании измерительного комплекса и позволяет повысить точность измерения [4, 14].

На основе обработки экспериментальных данных статистический характер изменения метеорологических параметров и измеряемых параметров загрязнения принимается соответствующим нормальному (гауссовскому) закону распределения [4], причем параметры распределения

загрязняющих веществ могут быть выражены через вероятностные характеристики метеорологических элементов [1]. Сами процессы, например, скорость и направление ветра [15], имеют корреляционные функции, аппроксимируемые обычно по экспоненциальному закону.

Важной особенностью анализируемого процесса является его многомерность, проявляющаяся во взаимосвязи измеряемых параметров загрязнения с метеорологическими элементами. Для оценки воздействия метеорологических элементов на объект управления в общем случае необходимо построение многомерного распределения возмущающих функций. Однако в практических задачах можно ограничиться их числовыми характеристиками [7]. Например, если на объект воздействуют случайные возмущения, то полное описание их дают математическое ожидание и матрицы авто- и взаимокорреляционных функций.

Отметим еще один показатель измеряемого процесса, связанный с особенностями получения измерительной информации и влияющий на методику её обработки. По своей природе измеряемые параметры атмосферы, являющиеся в основном непрерывными функциями времени, получают в виде непрерывных записей на лентах самописцев приборов: газоанализаторов, датчиков метеопараметров и др. Однако информация, получаемая устройством обработки в ЭВМ диспетчерского пункта, как мы уже отмечали, носит дискретный характер в связи с её квантованием по уровню, кодированием при передаче по линии связи, переключением в коммутаторе станций контроля и, наконец, обработкой в самой вычислительной машине. Определение оптимальной частоты квантования сигналов измерения и оценка погрешности выходной информации системы в зависимости от неё является одной из основных задач разработки измерительного комплекса [14].

В настоящее время известен целый ряд математических моделей, используемых для определения загрязнения атмосферного воздуха. Некоторые модели нашли практическое применение в составе автоматизированных систем контроля и управления уровнем загрязнения городской воздушной среды [18, 21]. Большинство имеющихся моделей относится к гауссовскому типу с эмпирически установленными стандартными отклонениями и удовлетворительно описывает поле загрязнения в реальной атмосфере, но лишь в стационарных условиях и для равнинной местности. Использование их для воздушного бассейна города и орографически сложной местности приводит к значительным ошибкам.

В связи с этим было показано [5], что основу программно-математического обеспечения автоматизированной системы должна составлять модель, базирующаяся на уравнении турбулентной диффузии, которая к настоящему времени достаточно хорошо исследована [2] и не обладает недостатками эмпирической гауссовской модели. Применяемые обычно разновидности диффузионной модели, отражающие физические за-

кономерности распространения загрязняющего вещества в воздушном бассейне, исходят из заданной структуры объекта и детерминированного подхода к процессу загрязнения. Вместе с тем, истинные значения или характеристики входящих в модель параметров: коэффициентов дифференциальных уравнений, различных констант, начальное состояние, граничные условия, внешние воздействия и др., вследствие отсутствия данных наблюдений и недостаточной изученности процессов загрязнения в городе, известны весьма приблизительно.

В этом плане создание системы оперативного управления качеством воздушного бассейна в реальном времени, включающей контроль за параметрами, характеризующими вход, выход и возмущения в объекте, позволяет ввести в модель обратную связь, обеспечивающую подстройку ее параметров и, таким образом, решить задачу идентификации.

Определим критерий качества модели (рис. 3) в виде функционала, характеризующего величину отклонения между измеренными и вычисленными с помощью модели значениями компонент вектора состояния. Обозначим через x - вектор состояния, вычисленный с помощью модели, а x_m - вектор, компоненты которого получены в результате измерений в реальной системе. Компоненты вектора x задаются на некотором дискретном множестве точек $\mathcal{X}_t^m \in \mathcal{X}_t$. При наличии данных измерений функционал качества можно записать

$$\Phi_0(x) = \left\| [x]_m - x_m \right\|_{\mathcal{X}_t^m}^2 \quad (1)$$

Символ $[x]_m$ обозначает, что компоненты вектора состояния переводятся на множество \mathcal{X}_t^m . Для этой цели используется процедура интерполяции, поскольку сам вектор x в результате вычисления получается на регулярной сетке. Таким образом, результаты моделирования подстраиваются к измеряемому данным.

Задача идентификации будет заключаться в минимизации критерия

$$\min \Phi_0(x) = \left\{ \frac{d \Phi_0(x)}{d \alpha_i} \right\} \quad (i=1, \dots, n), \quad (2)$$

где α - параметр системы, n - число компонент вектора α в дискретном выражении.

Известно несколько подходов к решению указанной задачи, например, метод наискорейшего спуска [13], способ воспроизведения вектора состояния [24] и др. Такой подход формируется исходя из существования неизвестных параметров объекта. При известной структуре и состоянии обычно применяется подход с позиций управляемости и наблюдаемости [11].

Для объекта (рис. 3), описываемого разностными уравнениями

$$x(k+1) = F(x(k), k) + H(k)u(k), \quad (3)$$

$$y(k) = C(x(k), k) + m(k), \quad (4)$$

при условии отсутствия априорной информации о процессе и шуме наблюдения запишем

$$e_1(k) = x^*(k+1) - F(x^*(k), k), \quad (5)$$

$$e_2(k) = y(k) - C(x^*(k), k). \quad (6)$$

Здесь $x^*(k)$ (где $k = 0, 1, \dots, i$) представляет собой оценку параметров процесса. Если бы значение $x^*(k)$ соответствовало истинному значению параметров $U(k) \equiv 0$ и $m(k) \equiv 0$ при $k = 0, 1, \dots, i$, то $C_1(k) \equiv C_2(k) \equiv 0$. Поэтому можно выбрать следующую форму критерия (2), подлежащего минимизации, являющуюся общим выражением критерия наименьших квадратов:

$$\Phi = \sum_{k=0}^i [e_1^T(k) Q e_1(k) + e_2^T(k) R e_2(k)]. \quad (7)$$

Если $n(k)$ и $m(k)$ являются гауссовскими и векторными случайными величинами с нулевыми средними значениями и ковариационными матрицами вида

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[n(k)n^T(\ell)] &= V(k)\delta^k\ell, \\ \mathcal{E}[m(k)m^T(\ell)] &= M(k)\delta^k\ell, \\ \mathcal{E}[u(k)m^T(\ell)] &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

можно использовать байесовский подход и сформулировать следующий критерий [17]:

$$\begin{aligned} \Phi_i^1 &= \frac{1}{2} \|x(0) - x_0\|_{P_0^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^i \|y(k) - C(x(k), k)\|_{M^{-1}(k)}^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{i-1} \|u(k)\|_{V^{-1}(k)}^2 + \lambda^T(k) [x(k+1) - F(x(k), k) - H(k)u(k)], \end{aligned} \quad (9)$$

$k = 0, \dots, i-1,$

где $\lambda(k)$ - вектор множителей Лагранжа.

Весовые матрицы P_0^{-1} , $M^{-1}(k)$ и $V^{-1}(k)$ в (9) дают количественную характеристику относительного вклада этих составляющих в ошибку Φ_i^1 .

Минимизация (9) дает оценку вектора параметров и состояния в момент времени ℓ по наблюдениям $0, 1, \dots, i$.

При использовании для вычислений ЭВМ хорошие результаты получаются при градиентном методе минимизации, так как при оптимизации составляющие вектора $\text{grad}_x \Phi_0(x)$ представляют собой функции чувствительности функционала к вариациям параметров.

Можно получить [13] систему дифференциальных уравнений, связывающих изменения параметров модели во времени с изменениями критерия качества в режиме обратной связи.

$$d_{k+1}^i = d_k^i - \left(\frac{\partial \Phi_0}{\partial x^i} \right) \frac{d \Phi_0(x)}{d x^i}, \quad (10)$$

$i = 1, \dots, N,$

где Δt - шаг по времени, с которым осуществляется интегрирование.

Замыкание цикла вычислений требует задания коэффициента пропорциональности γ . При измерениях вектора состояния системы целесообразно использовать последовательный метод оценки параметров, при котором все процедуры идентификации рассматриваются на одном шаге длиной Δt . Схема удобна при последовательном поступлении измерительных данных и необходимости их обработки по мере поступления, а также при непрерывном слежении за функционалом качества, когда необходимо вводить корректировку параметров модели в режиме самонастраивания ее по заданному критерию.

При наличии данных измерений решается задача минимизации функционала (1), который учитывает информацию только на интервале $[t_j, t_{j+1}]$. В результате вычислений находятся новые значения компонентов вектора параметров

$$d_{k+1} = d_k + \gamma \Delta d_k, \quad (11)$$

где

$$\Delta d_k = \left\{ \Delta d_k^i = - \frac{\Delta t}{\gamma^i} \frac{d \Phi_0(x)}{d x^i} \right\}_{x=x_k} \quad (i=1, \dots, N) \quad (12)$$

Для вычисления приведенных критериев можно применить методы [11, 16], разработанные в теории оптимального управления: динамическое программирование, принцип максимума, вариационный метод и др. Рассмотренный подход в несколько модифицированном виде был применен при идентификации модели загрязнения воздушного бассейна города и оказался весьма эффективным [24].

Полученная в результате решения задачи идентификации математическая модель объекта позволяет приступить к разработке оптимального управления процессом загрязнения атмосферы города, которая включает две задачи: анализ состояния процесса и синтез оптимальной системы.

Анализ требует знания структуры построения системы управления

и может быть выполнен после ее определения и описания в терминах передаточных функций составляющих блоков с использованием аппарата теории автоматического управления для распределенных систем [3].

Рассмотрим упрощенную задачу управления качеством атмосферы в жилом районе города, прилегающем к автотрассе для иллюстрации возможного подхода к анализу системы регулирования воздушного бассейна. Полагаем, что основным источником загрязнения воздуха являются выхлопные газы автотранспорта, переносимые ветром. Учет влияния переноса в воздушную среду района загрязняющих веществ от других источников эмиссии будем учитывать включением фоновых концентраций.

Цель регулирования состоит в обеспечении такого режима движения по трассе, чтобы во всех возможных метеорологических ситуациях уровень загрязнения воздушной среды жилого района $C(x, t)$ не превышал установленных санитарно-гигиенических норм ПДК - $c = \text{const}$.

Ориентируем координатные оси в пространстве таким образом, чтобы ось y проходила вдоль средней линии автотрассы, а ось x проходила горизонтально на уровне земли. Примем направление ветра перпендикулярным автотрассе, что будет соответствовать наибольшему повышению загрязнения воздуха в районе.

Тогда, в случае легкой примеси ($u = 0$) и при переносе в горизонтальной плоскости в направлении ветра ($v = 0$) и при пренебрежении диффузией по оси x ($K_x = 0$), для источника примеси линейного характера с равномерной эмиссией по длине трассы (M) уравнение переноса загрязняющего вещества принимает вид:

$$\frac{dc(x, t)}{dt} + u \frac{dc(x, t)}{dt} = \frac{d}{dz} K_z \frac{dc(x, t)}{dz} - Rc(x, t) + F(t), \quad (13)$$

где $c(x, t)$ - среднее значение концентрации на уровне земли; u - горизонтальные составляющие средней скорости ветра; K_z - коэффициент турбулентной диффузии в вертикальном направлении; t - время; R - коэффициент, характеризующий изменение концентрации за счет превращений примесей; $F(t)$ - показатель уровня эмиссии вредных веществ автомагистрали.

С граничными условиями

$$K_z \frac{dc(0, t)}{dz} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0, t \geq 0, \quad (14)$$

$$K_z \frac{dc(h, t)}{dz} = g(t) \quad \text{при} \quad z = h, t \geq 0, \quad (15)$$

(где h - высота приземного слоя) и начальным условием (при $t = c$)

$$c(x, 0) = c_0(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (16)$$

где L - заданное удаление от магистрали, $c_0(x)$ - функция, учитывающая фоновое загрязнение атмосферы в районе.

Функция $g(t)$ в граничном условии (15) и начальное условие (16) являются возмущающими воздействиями для систем управления.

Уравнения (13) - (16) с помощью специальной процедуры стандартизации [3] можно преобразовать к стандартному виду с целью включения неоднородностей от начальных и граничных условий в неоднородность основного уравнения процесса.

Для этого в качестве входа системы $u(t)$ берется стандартизирующая функция:

$$u(t) = f(x, t) + l_0[c_0(x)] + l_{m-1}[c_{m-1}(x)] + l_m[g(x, t)], \quad t \geq t_0, \quad (17)$$

где $f(x, t)$ - управляющее воздействие; $c_0(x), \dots, c_{m-1}(x)$ - возмущение от начальных условий; $g(x, t)$ - возмущение от граничных условий; l_0, \dots, l_m - стандартизирующие операторы.

В стандартной форме уравнения объекта будут иметь вид:

$$\frac{dc(x, t)}{dt} + \mathcal{U} \frac{dc(x, t)}{dt} - \frac{d}{dz} K_z \frac{dc(x, t)}{dz} + R c(x, t) = \mathbf{1}(x) F(t) + \delta(x) g(t) + c_0(x) \delta(t) \quad (18)$$

при нулевых граничных и начальных условиях:

$$K_z \frac{dc(0, t)}{dz} = 0, \quad (19)$$

$$K_z \frac{dc(L, t)}{dz} = 0, \quad (20)$$

$$c(x, 0) = 0. \quad (21)$$

Решение уравнений (18) - (21) в терминах передаточной функции объекта имеет вид:

$$\bar{c}(x, \bar{p}) = W(x, \xi, p) \otimes [\mathbf{1}(x) \bar{F}(p) + \delta(x) \bar{g}(p) + c_0(x)], \quad (22)$$

где $W(x, \xi, p)$ - передаточная функция распределенной системы с аргументом выхода - x , входа - ξ , комплексной переменной - p ;

знак \otimes обозначает операцию пространственной композиции передаточной и входной функций или интегрирования в пространственной области.

В соответствии с чем можно записать:

$$\bar{c}(x, p) = \int_0^T W(x, \xi, p) d\xi \bar{F}(p) + W(x, 0, p) \bar{g}(p) + \int_0^T W(x, \xi, p) C_0(\xi) d\xi. \quad (23)$$

Систему управления качеством атмосферного воздуха в работе можно построить следующим образом. С использованием газоанализаторов, распределенных по территории микрорайона, измеряется загрязнение воздуха $C(x, t)$. В устройстве централизованной обработки информации проводится сравнение измеренной концентрации вредных веществ $C(x, t)$ с заданной нормативной характеристикой C^* , которая в общем виде может изменяться во времени. Сигнал рассогласования $(C(x, t) - C^*)$ преобразуется по определенному закону в регуляторе и используется для воздействия на эмиссию автомагистрали $F(t)$ (например, путем изменения скорости движения или изменения интенсивности транспортного потока, как это осуществлено во Франции [20]).

Используя преобразование Лапласа, зададим связь между $F(t)$ и $(C(x, t) - C^*)$ в виде уравнения

$$\bar{F}(p) = W(p) [\bar{c}(x, p) - C^*], \quad (24)$$

где $W(p)$ - передаточная функция регулятора, учитывающая динамику газоанализаторов, регулятора и инерционность исполнения управляющих команд.

Уравнение объекта (23) вместе с уравнением регулятора (24) образует замкнутую систему уравнений, которой соответствует структурная схема системы регулирования, изображенная на рис. 4. Подставляя в решение (22) выражение для управляющего воздействия $\bar{F}(p)$ из (24), получим уравнение

$$\bar{c}(x, p) = W(x, \xi, p) \otimes 1(x) W(p) [\bar{c}(x, p) - C^*] + W(x, \xi, p) \otimes \delta(x) g(p) + W(x, \xi, p) \otimes C_0(x), \quad (25)$$

описывающее структуру распределенной системы управления в целом. Из уравнения (25), для структурной схемы (рис. 4), можно получить передаточные функции по различным входам и выходам, провести анализ устойчивости и качества переходных процессов в системе управления. Аналогично рассмотренному случаю линейного источника

эмиссии можно решить задачу и для точечного источника, при этом должны быть внесены соответствующие изменения в математическую модель объекта.

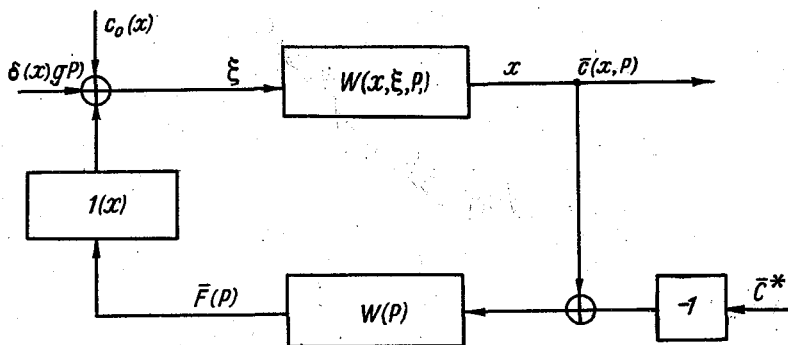


Рис. 4. Структурная схема системы управления.

Задача управления заключается в переводе процесса из одного состояния, которому соответствовали определенные ранее уровни эмиссии источников выбросов, в другое состояние, соответствующее новому прогнозируемому уровню опасных возмущений и обеспечивающее оптимизацию установленного критерия качества, и в поддержании этого состояния при действующих возмущениях в процессе, т.е. в разработке нового программного управления установками регуляторов эмиссии источников выбросов и его стабилизации [9].

Ранее было показано, что управление процессом должно разрабатываться с учетом существующих возмущений в объекте. Имеющиеся экспериментальные данные о параметрах состояния атмосферы, позволяют рассматривать эти возмущения как случайный нестационарный процесс с заданными вероятностными характеристиками [4]. Поэтому естественно рассматривать задачу управления возмущенным процессом загрязнения воздушного бассейна города, как задачу оптимального управления конечным состоянием системы, на которую действуют случайные возмущения, в состав которых входят как случайные величины (начальный разброс параметров процесса), так и случайные процессы (флуктуации ветра, температуры и др.), вероятностные характеристики которых известны.

Наметим в общем виде процедуру синтеза оптимального управления [10].

1. Проводится анализ возмущающих процессов и их формализация, например, с помощью формирующих фильтров — дифференциальных линейных уравнений, включающих "белый шум". При этом коэффициенты уравнений и интенсивность белого шума определяются из условия сов-

падения вероятностных характеристик случайных процессов на выходе фильтров и исходных процессов возмущения.

2. Осуществляется преобразование исходной модели в виде уравнения в частных производных, включающее линеаризацию возмущенного процесса относительно заранее рассчитанной траектории в фазовом пространстве и приведение к дискретному виду.

3. Формируется минимизируемый функционал качества процесса, например, как среднеквадратичная ошибка отклонений переменных состояний – концентраций загрязняющих веществ от их нормированных значений.

4. Записывается алгебраическое уравнение для измерительной системы, определяющее наблюдаемую часть вектора состояния процесса и включающее **вектор случайных** ошибок измерения, которые также линеаризуются и **дискретизируются**.

Задача управления процессом сводится к исследованию динамической системы, для которой требуется определить оптимальный вектор управления – эмиссии источников выбросов.

Оптимальный регулятор возмущенного процесса должен включать два последовательных блока: оптимальной оценки вектора состояния и оптимального управления, осуществляющий синтез матрицы коэффициентов управления.

Практическая реализация оптимального управления загрязнением атмосферного воздуха требует решения целого ряда конкретных теоретических, экспериментальных и технических задач [8] и составляет основу выполняемой в настоящее время программы работ по созданию типовой автоматизированной системы управления качеством воздушного бассейна в стране.

Выводы

1. Решение поставленной задачи идентификации объекта – (воздушного бассейна города) позволяет в рамках выбранной структуры определить математическую модель, необходимую для разработки системы управления качеством атмосферного воздуха.

2. Использование алгоритма идентификации в составе системы, обеспечивающей получение оперативной информации о загрязнении и состоянии атмосферы в пограничном (приземном) слое городского воздуха, дает возможность на основе принципа обратной связи реализовать адаптацию параметров модели к изменениям характеристик атмосферных условий.

3. Задача управления качеством воздушного бассейна города может быть решена методом стохастического оптимального управления дискретными распределенными системами и включает задачи оценки состояния объекта и синтеза оптимальной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б е з у г л а я Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. - Л.: Гидрометеоздат, 1980. - 184 с.
2. Б е р л я н д М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеоздат, 1975. - 448 с.
3. Б у т к о в с к и й А. Г. Структурная теория распределенных систем. - М.: Наука, 1972. - 320 с.
4. Ж у к о в с к и й Е. Е. Статистический анализ случайных процессов. - Л.: Гидрометеоздат, 1976. - 407 с.
5. З и в А. Д., К р а с о в В. И. К выбору математической модели распространения примеси для использования в автоматизированной системе контроля загрязнения воздуха. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 12-20.
6. И з р а э л ь Ю. А., Ф и л и п п о в а Л. М. Оценки и пути достижения желаемого качества окружающей природной среды. - Труды Советско-английского симпозиума "Мониторинг состояния окружающей природной среды". - Л.: Гидрометеоздат, 1977, с. 34-40.
7. К о б ы ш е в а Н. В. Косвенные расчеты климатических характеристик. - Л.: Гидрометеоздат, 1971. - 191 с.
8. К р а с о в В. И. Основные направления решения проблемы автоматического регулирования загрязнения воздушного бассейна. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 3-11.
9. К р а с о в В. И. Принципы автоматического регулирования качества воздушного бассейна города. - Труды ГГО, 1982, вып. 464, с. 3-10.
10. Л е б е д е в А. А. и др. Оптимальное управление движением космических летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1974, - 199 с.
11. Л и Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. - М.: Наука, 1966. - 176 с.
12. М е р о п р и я т и я п о б о р ь б е с з а г р я з н е н и е м окружающей среды на заводе "Ниссин сэйко в Курэ". - Тэккокай, 1974, т. 24, № 4, с. 112-115. Пер. № 8669, ГИИТБ СССР, М., 1975.
13. П е н е н к о В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. - Л.: Гидрометеоздат, 1981. - 352 с.
14. П е р с и н С. М. Основы теории и проектирования автоматических измерительных систем. - Л.: Гидрометеоздат, 1975. - 320 с.
15. П р о т о п о п о в Н. Г. Проектирование ветроизмерительных приборов. - Л.: Гидрометеоздат, 1976. - с. 11-23.

16. Розенброк Х., Сторн С. Вычислительные методы для инженеров - химиков. - М.: Мир, 1968. - 443 с.
17. Эйкхофер П. Основы идентификации систем управления. - М.: Мир, 1975. - 683 с.
18. Akashi H., Kumamoti H. Optimal discharge control for SO₂ gas pollution of Osaka city. - *Envir. Syst. Plann., Des. and Control. Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.2, Oxford e.a., 1978, 655.*
19. Bourgogne P., Sarteur R. Un outil efficace: Alpolair pour mieux surveiller la pollution par SO₂ de Lyon-Sud. - *Nuisan. et environ., 1978, N 67, 29-32.*
20. Faugere J.G. Surveillance de la pollution dans l'agglomeration bordelaise. - *Pollut. Atmos., 1980, 22, N 85, p. 98-102.*
21. Kai-Ching Chu, Real-time urban power dispatch with ambient air quality constraints. - *Envir. Syst. Plann., Des. and Control. Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.1, 309-316.*
22. Katsumi S., Juro O. Pollution monitoring system of Kobe Steel LTD. - *Fujitsu, 1976, 27, N 2, 177-179.*
23. Moriyama S. et al. Stack gas monitoring system for warning and control. - *Envir. Syst. Plan., Des. & Control, Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.1, 129-134.*
24. Oshima J., Monri N. Prediction of pollutant concentration for air pollution control. - *Envir. Syst. Plann., Des. & Control, Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.2, 645-653.*
25. Rasse D., Legrand M. The Belgian automatic air pollution network. - *Syst. & models air and water pollution symp., London, 1976, London, s.a. 15/1-15/8.*

А. Н. Ясенский

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРЫ ГОРОДА**

Одним из этапов создания автоматизированной системы управления качеством воздушного бассейна города является формирование оптимальной структуры системы и согласование действий её звеньев. Двухуровневый принцип управления качеством воздушного бассейна, включающий стабилизацию промышленных выбросов на уровне предельно допустимых выбросов (ПДВ) и программное управление выбросами при

неблагоприятных метеорологических условиях, может быть обеспечен автоматизированной системой управления качеством атмосферы (АСУКА) [2]. Однако эта система выполняет лишь задачу оперативного регулирования. Для более полного решения проблемы защиты атмосферного воздуха города в условиях роста его промышленного потенциала и изменчивости его качественных и количественных характеристик структура системы управления качеством воздушного бассейна должна быть дополнена звеньями, учитывающими и долгосрочные изменения характеристик контролируемой территории.

Для реализации указанной задачи система должна включать в себя следующие подсистемы: контроля и регулирования промышленных и транспортных выбросов; контроля атмосферы; долгосрочного прогноза загрязнения и планирования мероприятий по охране атмосферного воздуха.

Структурная схема системы (рис. 1) включает в себя два контура управления: оперативный и долгосрочный.

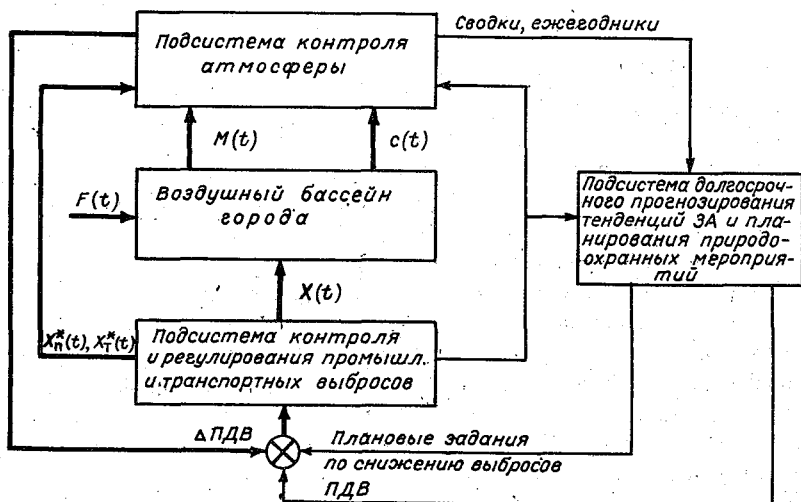


Рис. 1. Структура системы управления качеством воздушного бассейна.

Пользуясь терминологией, принятой в теории автоматического регулирования, дадим определение основным звеньев системы.

Регулируемым объектом является воздушный бассейн контролируемой территории, а регулируемой величиной $C(t)$ - концентрация n контролируемых примесей, измеренных в n пунктах (причем концентрации основных примесей n^* измеряются только в m^* пунктах).

Регулируемый объект подвержен различным воздействиям. Управляющее (или регулирующее) воздействие $X(t)$ характеризуется суммарной массой выбросов контролируемых примесей в единицу времени. В этом случае источники выбросов вредных веществ на промышленных предприятиях и автомагистралях можно рассматривать как исполнительные элементы.

Возмущающее воздействие $F(t)$ характеризуют метеорологические параметры, обуславливающие перенос и рассеяние примесей.

Чувствительный элемент системы – сеть контроля, содержащая m станций, производящих сбор и обработку метеоданных и информации о загрязнении атмосферы.

Задающим воздействием служит показатель качества атмосферного воздуха, за который можно принять либо ЦДК контролируемых примесей, либо показатель, учитывающий их суммарное действие.

Рассмотрим структуру основных подсистем, входящих в систему управления качеством воздушного бассейна города.

Подсистема контроля атмосферы

Подсистема контроля атмосферы состоит из следующих звеньев: сеть контроля загрязнения атмосферы и метеорологических параметров; краткосрочного прогноза загрязнения атмосферы; обработки оперативной информации о загрязнении атмосферного воздуха и промышленных выбросов; принятия оперативных решений; обработки информации с сети ручного пробобора; подготовки сводных данных о загрязнении. Структурная схема подсистемы приведена на рис. 2.

Подсистема контроля атмосферы должна обеспечивать:

- прогноз ожидаемых уровней концентрации на основе информации, полученной с сети оперативного контроля загрязнения атмосферы, метеоинформации и данных о фактических значениях выбросов контролируемых примесей;
- расчет значений ЦДВ для каждого источника, включенного в контур регулирования, при неблагоприятных метеорологических условиях;
- оперативное принятие решений о проведении комплекса мер по снижению уровня выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях;
- сбор и обработку информации о загрязнении воздушного бассейна и передачу обобщенных данных заинтересованным организациям для принятия административных мер и составления планов природоохранных мероприятий.

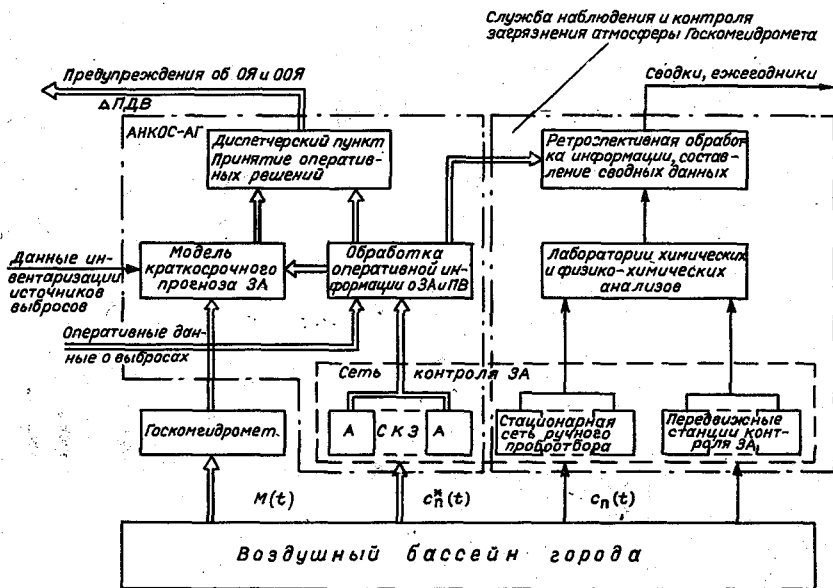


Рис. 2. Структурная схема подсистемы контроля атмосферы.

Для оперативного регулирования сеть контроля должна быть чувствительной к изменению режима работы каждого источника загрязнения атмосферы и давать возможность локализации "виновников" повышенных концентраций примесей. Для получения осредненных характеристик поля загрязнения структура сети контроля, наоборот, должна быть такой, чтобы влияние отдельных источников промышленных выбросов было исключено. Подобные противоречивые требования определяют сложность структуры сети контроля.

Сеть оперативного контроля загрязнения атмосферного воздуха должна обеспечивать подготовку оперативной информации о концентрациях основных примесей: CO , SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , ΣCH , O_3 ; обладать наибольшей чувствительностью к изменениям режима работы основных источников промышленных выбросов, расположенных на контролируемой территории; пространственная структура сети контроля подсистемы должна обеспечивать возможность выявления источников выбросов, создающих повышенные концентрации примесей в атмосферном воздухе.

Временные характеристики станций контроля должны быть согласованы с характеристиками временной изменчивости поля концентраций.

Перечисленные выше требования характеризуют пространственно-временную структуру сети оперативного контроля. При формировании сети необходимо учитывать различия в методах контроля различных типов примесей [3].

На сети контроля, функционирующей в контуре долгосрочного регулирования, ведется наблюдение за большим числом примесей, определяемых спецификой промышленности контролируемого региона. Вследствие того, что здесь не требуется высокой оперативности при получении данных, а также учитывая то, что существующие автоматические газоанализаторы предназначены для контроля только основных загрязняющих веществ, сеть должна базироваться на ручном пробоотборе с последующим анализом в химических лабораториях. Основной задачей сети ручного пробоотбора является получение данных, характеризующих поля средних месячных и средних годовых значений концентраций примесей.

При выборе места установки станций контроля необходимо по возможности исключить влияние отдельных источников промышленных выбросов, т.е. результаты контроля должны отражать средний уровень загрязнения территории.

Стационарная сеть ручного пробоотбора, передвижные станции контроля загрязнения атмосферы, лаборатории химического и физико-химического анализа, подразделения, производящие обработку информации и составление сводок о загрязнении атмосферы, представляют ныне действующую службу наблюдения и контроля загрязнения атмосферного воздуха Госкомгидромета. Основой подсистемы, осуществляющей оперативный сбор и обработку информации, краткосрочный прогноз и принятие оперативных решений, должна стать автоматизированная система контроля загрязнения атмосферного воздуха АНКОС-АГ.

Для программно-математического обеспечения АНКОС-АГ была разработана модель, устанавливающая связь между параметрами источников выбросов (массовый расход примесей в единицу времени), метеорологическими параметрами и концентрациями примесей в атмосферном воздухе. Эта модель должна решать задачи: краткосрочного прогноза концентрации примесей; локализации источников выбросов, создающих при данных метеоусловиях повышенные уровни концентраций примесей; пересчет значений ПДВ для промышленных предприятий при опасных метеоусловиях. Для осуществления оптимального регулирования источников выбросов модель должна учитывать влияние метеорологических

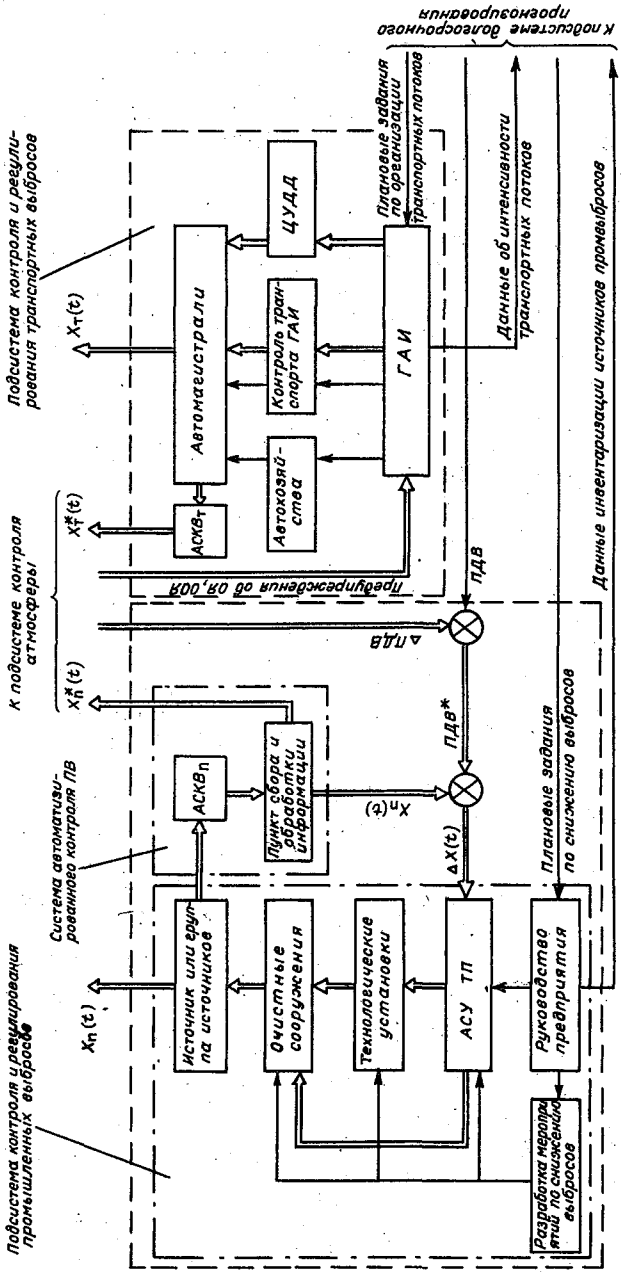


Рис. 3. Структурная схема подсистемы контроля и регулирования промышленных и транспортных выбросов.

параметров и оценивать вклад отдельных источников в поле загрязнения.

Подсистема контроля и регулирования промышленных и транспортных выбросов

Рассматриваемая подсистема обеспечивает стабилизацию объема выбросов промышленных предприятий на заданном уровне. Подсистема объединяет источники промышленных выбросов, вносящих основной вклад в загрязнение воздушного бассейна, и, в первую очередь, ТЭС, предприятия нефтеперерабатывающей, металлургической и химической промышленности. На рис. 3 приведена структурная схема одного звена подсистемы регулирования. Подсистема может содержать от одного до нескольких десятков и даже сотен таких звеньев (в Токио подсистема регулирования промышленных выбросов включает в себя 200 заводов, которые сжигают около 90 % промышленного топлива [1]). Часть подсистемы (обведена пунктиром) имеет типовую структуру крупного промышленного предприятия. В процессе организации системы регулирования качества атмосферы города подсистема должна быть дополнена звеном автоматизированного контроля промышленных выбросов и центром сбора и обработки информации о выбросах основных примесей. Текущие данные о значениях выбросов источника (или группы источников) примесей передается как в АСУ ТП предприятия для осуществления регулирования технологическими процессами, так и в подсистему контроля атмосферы для использования в прогнозных моделях. Задающим воздействием подсистемы регулирования промышленных выбросов является норма предельно допустимых выбросов (ПДВ) для данного предприятия. При неблагоприятных метеорологических условиях, способствующих высоким концентрациям загрязняющих веществ, подсистемой контроля атмосферы выдается сигнал об уменьшении ПДВ предприятия. По этому сигналу АСУ ТП регулирует технологический процесс или работу газоочистных установок, обеспечивая снижение объема выбросов до нового значения ПДВ. Оценка эффективности принятых мер производится с помощью подсистемы контроля атмосферы.

Специфическим источником загрязнения атмосферного воздуха окисью углерода, окислами азота и углеводородами является автотранспорт. Влияние автотранспорта рассматривается как влияние линейного источника с большой изменчивостью характеристик. Работа двигателей внутреннего сгорания, практически неуправляема извне (кроме контроля выбросов при технических осмотрах и выборочного контроля на автомагистралях органами ГАИ), поэтому оперативное управление этим источником выбросов возможно только путем регулирования интенсивности потоков на основных транспорт-

ных магистралях или их перераспределения.

Таким образом, подсистема регулирования транспортных выбросов (рис. 3) включает основные автомагистрали, парк транспортных средств, автохозяйства, ГАИ и центр управления дорожным движением (ЦУДД).

Подсистема долгосрочного прогноза загрязнения атмосферы (ЗА) и планирования природоохранных мероприятий

Для реализации программ долгосрочных природоохранных мероприятий, учитывающих как вариации характеристик промышленного потенциала, так и изменения в застройке контролируемой территории, используется подсистема долгосрочного прогноза загрязнения атмосферы и планирования природоохранных мероприятий. В целях уменьшения загрязнения атмосферы предприятиям выдаются плановые задания по снижению вредных выбросов, рассматриваются и согласовываются схемы размещения новых промышленных объектов, рационально решаются градостроительные задачи (строительство объездных дорог, расширение улиц, создание подземных переходов, озеленение, более широкое использование электротранспорта). Основной задачей подсистемы является нормирование ПДВ (либо временно согласованных выбросов (ВСВ)) для всех предприятий - источников вредных выбросов, расположенных на контролируемой территории.

Процесс создания комплексной системы управления качеством воздушного бассейна города очень длительный и требует проведения значительного объема организационных работ и работ по созданию и внедрению соответствующих технических средств и проведению научных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б р е н д а к о в В. Ф., К у з ь м и н ы х И. П., П е т р о в Э. Н., С о л о м о н и я Ю. В. Зарубежные телеметрические системы контроля загрязнения воздуха. - Изд. Информ. центра, Обнинск, 1976.
2. К р а с о в В. И. Принцип автоматического регулирования качества воздушного бассейна. - Труды ГГО, 1981, вып. 464, с. 3-12.
3. L u d w i g F. L. Siting air monitoring stations. - Environ. Sci. and Technol., 1978, vol.12, n 7, pp.774-778.
4. S e i n f e l d J. H. Optimal location of pollutant monitoring station in an airshed. - Atmosph. Envir., 1972, vol.6, n11, pp.847-848.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Задача повышения эффективности систем контроля загрязнения воздуха приводит к необходимости создания автоматизированных систем контроля промышленных выбросов (АСКПВ). Приближение средств измерений и обработки измерительной информации к источникам выбросов создает предпосылки к практической реализации задачи регулирования процессов загрязнения атмосферного воздуха. Первыми шагами при решении этой задачи являются инвентаризация и классификация источников выбросов, а также разработка и определение норм предельно-допустимых выбросов (ПДВ) для предприятий различных отраслей промышленности [7].

Основная задача АСКПВ – получение информации о загрязнении атмосферы для принятия необходимых решений по обеспечению предприятиями установленных норм ПДВ на большом временном интервале. Очевидно, что эффективность АСКПВ при решении этой задачи определяется методами и средствами, используемыми при ее создании, а также общим уровнем развития отрасли. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при оценивании промышленного выброса как последней ступени технологического процесса.

Операционная система АСКПВ, так же как и автоматизированная система наблюдения и контроля окружающей среды (АНКОС) [1], представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из комплекса технических средств (КТС), математического (МО), информационного (ИО), метрологического (Мт О) и организационного обеспечения (ОО), иерархические структуры которой (информационная, организационная, функциональная) будут изменяться с изменением задач и функций, решаемых системой. КТС АСКПВ может быть разделен на четыре основные части:

- контрольно-измерительные станции (КИС);
- ядро системы, содержащее информационно-управляющий вычислительный комплекс (ИУВК) или центральную станцию (ЦС) и устройства отображения и накопления информации;
- линии связи, средства сопряжения и обмена информацией между системой и оперативным персоналом и др.;
- исполнительные устройства.

МО АСКПВ представляет собой комплекс алгоритмических и программных средств. Комплекс алгоритмов состоит из описаний отдельных функций, их сочетаний, общего алгоритма функционирования и комплекта вычислительных алгоритмов. Программное обеспечение является

реализацией алгоритмов на машинных языках и в свою очередь подразделяется на стандартное (СПО) и прикладное (ППО).

Задача ИО АСКПВ состоит в разработке форм и методов информационного отображения данных о промышленных выбросах, технологических параметрах и др. и в обеспечении информационного обмена внутри системы и между АСКПВ и АСУ П и другими потребителями информации. ИО системы практически реализуется с помощью комплекса программ, входящих в состав ППО, предназначенного для формирования, контроля, печати и подготовки к использованию информационных массивов данных, содержащих сведения, необходимые для функций управления.

АСКПВ должна состоять из устройств с нормированными метрологическими характеристиками. Одна из основных задач Мт 0 этого класса систем – разработка методов нормирования и определения результирующих метрологических характеристик систем.

Измерительные комплексы (ИК) должны размещаться на предприятиях различных отраслей. Если многокомпонентные газовые смеси выбросов предприятий химической, нефтяной и газовой промышленности имеют приблизительно одинаковый состав, то состав выбросов предприятий других отраслей постоянно меняется. Поэтому для успешного решения задачи измерений многокомпонентных газовых смесей в рамках системы должны создаваться специальные системы газового анализа, в которых, наряду с измерением концентраций вредных веществ в выбросах, должны также осуществляться функции пробоотбора и пробоподготовки. Рассмотрим некоторые примеры практически реализованных АСКПВ.

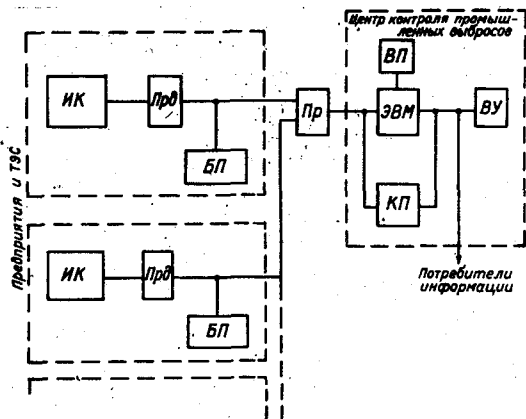


Рис. 1. Структурная схема системы контроля промышленных выбросов.

На рис. I изображена структурная схема АСНПВ, расположенная в префектуре Тиба (Япония) [8], где ИК - измерительный комплекс, Прд - передатчик, Пр - приемник, БП - блок предупреждений, КП - контроллер предупреждений, ВП - внешняя память, ВУ - внешние устройства. Система внедрена в 1974 г. В промышленном регионе находятся шесть ТЭС, четыре нефтеочистных и два сталелитейных завода и химическое предприятие. К началу проектирования системы разработчики располагали моделью для исследования взаимной связи между уровнем выброса и концентрациями примесей SO_x и NO_x в окружающем пространстве, что позволило непрерывно получать информацию об опасных уровнях загрязнения воздуха и выявить основные источники выбросов, подлежащие контролю, вклад которых в загрязнение окружающей среды составляет примерно 95 % всего объема выбросов. Система обеспечивает выполнение двух основных функций: тревожное предупреждение заводов и непрерывное измерение концентраций примесей в технологических выбросах.

Газоанализаторы размещены вблизи наиболее мощных источников промышленных выбросов префектуры. Отбор анализируемых газовых смесей производится из дымоходов и дымовых труб. Наряду с концентрациями окислов серы и азота в отходящих газах в системе измеряются: потребление нефти и других природных материалов, содержание серы в исходном продукте, плотность нефти, температура газа в трубе и его скорость. На ТЭС измеряется также генерируемая электроэнергия.

Система должна с большой надежностью определять основную характеристику каждого источника выбросов - массовый расход, изменяющийся во времени. Измерительная информация от датчиков с помощью передающего устройства поступает в центр контроля промышленных выбросов (ЦКПВ) предприятия (см. рис. I). Туда же поступает предупреждение о возможных высоких уровнях загрязнения воздуха из блока предупреждений каждого предприятия для принятия своевременных мер по снижению выбросов. В основу закона регулирования выбросов этой системы положено имеющееся соглашение между предприятиями и властями префектуры о мерах по снижению выбросов для достижения стандарта качества воздуха по SO_x и NO_x . Система допускает установку до 100 передатчиков и 150 предупреждающих устройств.

Исследования структур систем подобного типа [2, 8, 3] показывают, что достоинством таких систем является сравнительно невысокая стоимость. К недостаткам необходимо отнести: неравномерное распределение задач и функций по иерархическим уровням, высокие требования к характеристикам линий связи и относительно невысокую достоверность измерительной информации. Система относится к ин-

формационно-предупреждающим, поэтому эффективность управления выбросами в ней невысока.

Известно, что опасные метеорологические условия могут привести к значительному (5-8 = кратному) повышению концентраций примесей при постоянном уровне удельных выбросов. Исходя из этого факта иногда представляется целесообразным в основу алгоритма регулирования выбросов положить формализованные общие закономерности рассеяния примесей в атмосферном воздухе (с учетом характера конкретного источника выбросов). При введении в эту модель полученной измерительной информации о режиме работы источника, например, ТЭС, и метеорологических условиях можно получить гипотетическую ситуацию загрязнения атмосферного воздуха в требуемых точках пространства. Сопоставляя расчетные данные с данными измерений концентраций примесей в этих точках пространства, получим приращения, которые используются для коррекции параметров модели, и позволяют в конечном итоге определить расчетное значение параметров выброса. При выбросах, превышающих ПДВ, система вырабатывает решение о регулировании уровня выбросов. Рассмотренный в работе [4] пример показывает возможность применения ситуационных методов при решении оперативных задач регулирования выбросов. Очевидно, что в случае размещения ТЭС на территории города алгоритм регулирования выбросов должен учитывать вклад других источников выбросов города в конкретную ситуацию загрязнения воздуха.

Эти системы решают обратную задачу - по измеренным концентрациям примесей в атмосферном воздухе определяются величины выбросов промышленных предприятий. Система такого типа создается на Запорожской ГРЭС [6]. Опыт разработки системы показывает, что для реализации задачи в полном объеме необходимо располагать большим числом измерений, т.е. достаточно густой сетью КИС, что практически трудно осуществить.

К более перспективным структурам АСНПВ следует отнести структуры, в которых функции сбора и обработки информации осуществляются процессорами на первых двух иерархических уровнях систем. Такое построение системы позволяет равномерно сбалансировать задачи и функции по всем иерархическим уровням, а при наличии на предприятии АСУ II практически передать функции регулирования выбросов самому предприятию. В этом случае центр контроля загрязнения окружающей среды города должен сохранить за собой функции накопления и анализа данных измерений за длительный период времени и контроля за работой АСНПВ предприятий.

Примерное распределение задач и функций этого типа систем и направления потоков информации приведены на рис. 2.

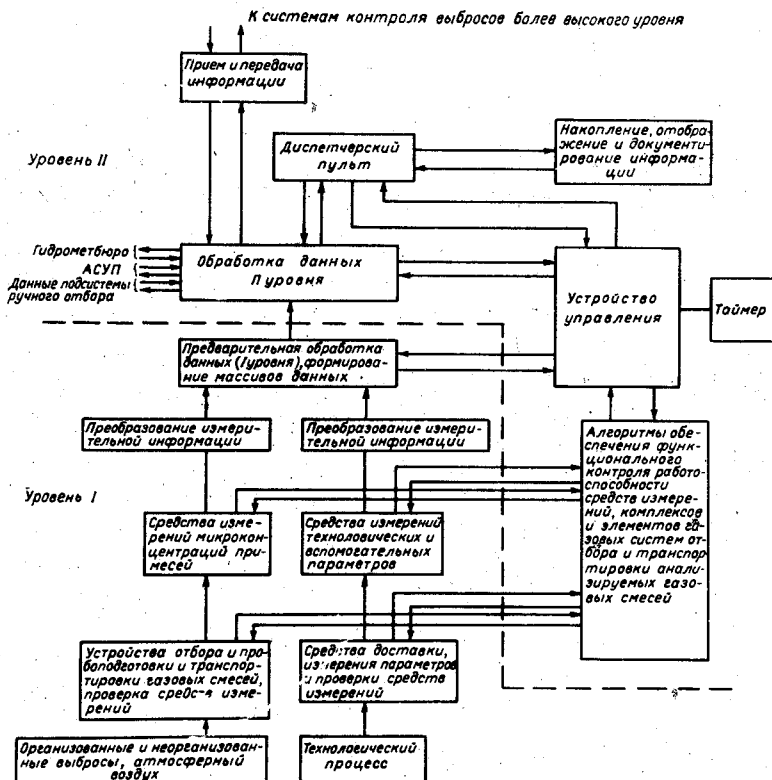


Рис. 2. Распределение задач и функций по иерархическим уровням перспективных АСПВ и направления информационных потоков данных.

АСПВ состоит из двух иерархических уровней:

- пробоподготовка, измерение, дискретизация и преобразование данных, предварительная обработка измерительной информации, проверка средств измерений и оценка достоверности данных измерений, кодирование и передача информации;
- декодирование, анализ достоверности, корректирование и обработка данных, формирование сигнала регулирования выбросов, накопление и отображение данных, обмен информацией с другими системами.

Создание интегрированных систем контроля промышленных выбросов, включающих АСУ II, с использованием современных средств сбора и обработки данных позволяют спроектировать достаточно гибкую систему. В отличие от системы в префектуре Тиба, такая система может обеспечить получение измерительной информации с более высо-

кой достоверностью и решение большого круга задач, включая задачу регулирования выбросов.

При создании измерительных сетей из КИС за основу могут быть приняты два способа организации связи КИС и ЦК ПВ предприятий: линейная групповая (рис. 3 а) и радиальная (рис. 3 б). При создании систем более высокого уровня может быть применен другой способ организации связи - древовидная сеть (рис. 3 в).

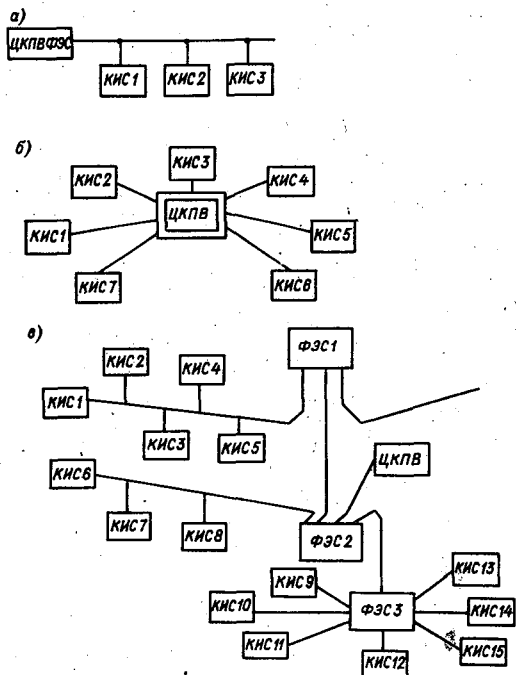


Рис. 3. Типовые конфигурации измерительных сетей. ФЭС - функциональный элемент связи, КИС - контрольно-измерительная станция, ЦКПВ - центр контроля промышленных выбросов.

Выбор типа конфигурации сети зависит от нескольких факторов, в том числе от типов разделения каналов и методов формирования канальных сигналов, начальных капитальных затрат, стоимости эксплуатации станций, мест размещения КИС и узлов обмена информацией, технических возможностей сети, требований потребителей информации. Наиболее рациональным типом линий связи в двухуровневой АСМПВ следует считать выделенные (реже коммутируемые) телефонные линии и

радиолинии.

Сопоставимость измерений является одним из важнейших показателей системы. При разработке метрологических характеристик получают развитие статистические методы. В [5] с помощью методов статистических проверок статистических гипотез находится погрешность многоканальной системы по экспериментальным данным, полученным на малом временном интервале (между двумя опросами). В этой работе также рассматривается случай, когда выборки погрешностей образуются из данных системы в режиме реальной эксплуатации на большом временном интервале. Эти результаты позволяют подойти к созданию автоматизированных систем с адекватными вероятностными метрологическими характеристиками.

Имеются также и другие аспекты разработки систем, например в системе АСНПВ - АСУ ТЭС - АСУ "Энергообъединение", рассмотренные в работе [4]. Создание таких систем может привести к перераспределению функций экономического управления между АСУ ТЭС "Энергообъединение", так как регулирование выбросов ТЭС не должно привести к уменьшению вырабатываемой электрической энергии за любой промежуток времени в рамках единой энергетической системы.

Из проведенного анализа следует, что структура и параметры АСНПВ в общем случае определяются:

- действующей системой управления технологическими процессами;
- типом источников выбросов;
- свойствами объектов измерения (пространственными, временными, динамическими, климатическими и др.);
- составом, физико-химическими и токсическими свойствами отходящих газов;
- требованиями к величинам допусков на рассеяние измеряемых параметров выбросов;
- числом измеряемых параметров, методами и средствами измерений;
- методами и средствами разделения каналов и методами формирования сигналов;
- методами и средствами проверки и контроля работоспособности АСНПВ;
- выбором мест измерений и их пространственным распределением;
- требуемой срочностью доставки и периодичностью обновления данных;
- методами и средствами пробоотбора, пробоподготовки и транспортировки анализируемых газовых смесей;
- требованиями потребителей информации;
- экономическими показателями контролируемого производства.

Таким образом, среди общих элементов систем АСНПВ, создаваемых для различных отраслей производства, должны находиться: типовой комплекс технических средств, отдельные комплекты программного обеспечения (управления, информационный и др.), руководящие общетраслевые методические материалы по проектированию АСНПВ и др., разработка которых производится в настоящее время.

Создание технической базы для систем контроля загрязнения окружающей среды и разработка принципов классификации источников выбросов с системных позиций обеспечат возможность синтеза систем на основе агрегатирования, а также разработку типовых функциональных и технических структур АСНПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А н у ф р и е в В. И. Методы реализации задач и функций автоматизированной системы контроля загрязнения атмосферного воздуха. - В кн.: Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения. - Киев: Наукова думка, 1980, вып. 6, с. 34-41.
2. А н у ф р и е в В. И. Исследование структур автоматизированных систем контроля атмосферного воздуха. - В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. - М.: Гидрометеоздат, 1981, т. III, с. 3-7.
3. А н у ф р и е в В. И. Вопросы построения структур перспективных автоматизированных систем контроля загрязнения воздуха. - Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции, Киев: Наукова думка, 1979, с. 27-28.
4. А н у ф р и е в В. И. Основные задачи и функции автоматизированной подсистемы (системы) контроля загрязнения воздуха АСУ ТЭЦ. - В кн.: Повышение качества топлива и охрана воздушного бассейна от загрязнения вредными выбросами ТЭС. Краткие тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания, Л., 1977, с. 106-110.
5. А н у ф р и е в В. И. Статистические оценки погрешности измерительных каналов автоматизированной системы контроля загрязнения воздуха. - В кн.: Метрологическое обеспечение измерений для контроля окружающей среды. Тезисы докладов Международного симпозиума, Л., 1981, с. 25-26.
6. В о л к о в Э. П., К о р м и л и ц и н В. И., С а п а р о в М. И. Разработка автоматизированной системы контроля загрязнения воздушного бассейна выбросами тепловых электростанций. - Труды МЭИ, 1979, вып. 435, с. 8-13.

7. Временная методика нормирования промышленных выбросов в атмосферу (расчет и порядок разработки нормативов предельно допустимых выбросов). Государственный комитет по гидрометеорологии и контролю природной среды. - М., 1981, с. 59.

8. Moriyama S. et al. Stack gas monitoring system for warning and control. - Environ. Syst. Plann., Des. and Control. Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1-5 Aug., 1977, pp.129-134.

В. А. Глазунов, Ю. В. Федоров, А. Л. Хомяков

ВЫБОР АППАРАТУРЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Опыт применения экспериментальных АСКЗ свидетельствует о том, что достоверность измерений определяется в первую очередь качеством передачи данных. Поэтому актуальной является задача выбора оптимального комплекса аппаратуры передачи информации (ПИ). Выбор аппаратуры ПИ необходимо осуществлять с учетом как технических, так и экономических показателей. Задача выбора оптимального комплекта технических средств ПИ может быть сведена к задаче векторного синтеза. Предлагаемая методика позволяет на основе декомпозиционного метода оптимизации решить задачу синтеза подсистемы ПИ в два этапа.

Первый этап, системный: формулировка оптимизационной задачи для системы и технических характеристик АСКЗ по элементам, в частности, для комплекса аппаратуры ПИ.

Система АСКЗ представляет собой сеть радиальной структуры с фиксированными направлениями передачи информации от периферийных датчиков $(D_1, \dots, D_k)_n$, $n = 1, N$, в центр сбора информации (информационно - вычислительный центр - ИВЦ) [1] (рис. 1). Основной функцией АСКЗ является сбор метеоданных и получение информации о загрязняющих компонентах. Система включает в себя три подсистемы ($j = 3$): станции контроля (СК), аппаратуру ПИ и ИВЦ. Вычислительный центр включает в себя устройства сопряжения (УС), аппаратуру передачи данных (АПД) и ЭВМ. Количество пунктов N , их месторасположение, число измеряемых параметров K и, следовательно, объем информации, подлежащей передаче, считается известным, а алгоритмы работы АСКЗ соответствуют алгоритмам системы массового обслуживания с прерываниями. Таким образом, при заданных алгоритмах функционирования для исходного объема передаваемой информации необходимо найти оптимальную структуру системы сбора: выбрать тип

канала связи (радиорелейный, телефонный коммутируемый или выделенный, телеграфный) и принцип его работы (техническая совместимость, режимы обмена и т.п.).

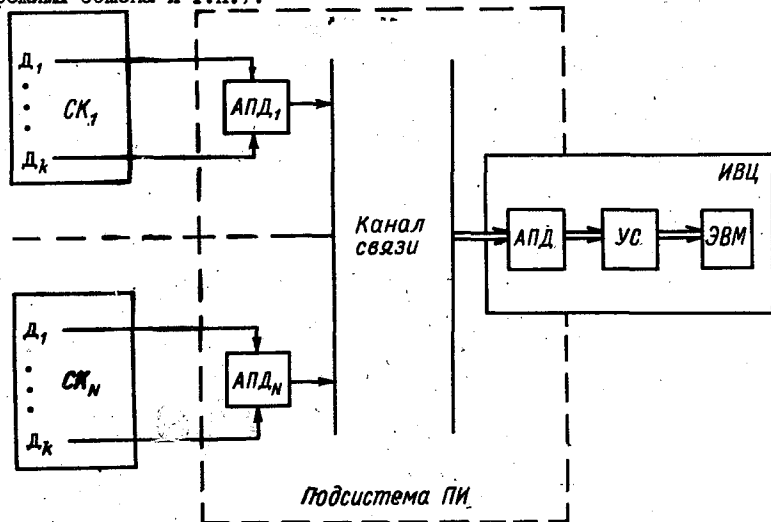


Рис. 1. Структура АСКЗ.

Основной задачей АСКЗ является получение достоверной информации в заданное время при минимальных затратах. Результирующая погрешность АСКЗ δ_0 и периодичность получения информации T_0 могут быть найдены по модели процесса загрязнения и прогноза состояния окружающей среды. Поэтому задачей системного синтеза является оптимальное распределение точностных характеристик и времени между элементами АСКЗ, обеспечивающее минимум суммарных затрат C :

$$\min \sum_j C_j(\delta_j, T_j), \quad j=1, 3 \quad (1)$$

при $\sum_j \delta_j^2 \leq \delta_0$, $\sum_j T_j \leq T_0$.

Практически в рамках задачи (1) может быть решена оптимизационно-распределительная задача для одного параметра — точности. Для этого установим функциональные зависимости между затратами C_j и техническими характеристиками АСКЗ, определяющими точность выходной информации (точность измерения $\delta_1 = \delta_n$, достоверность передачи информации по каналу связи P и длина разрядной сетки ЭВМ R):

$$C(\delta_{1n}) = \frac{a_{1n}}{a_{2n}\delta_{1n} + a_{3n}}, \quad C(\rho) = b_1\rho + b_2,$$

$$C(R) = d_1R^2 + d_2R + d_3,$$

где

a_n, b_n, d_n - постоянные, $\rho = V [1 + (1-\rho)\log(1-\rho) + \rho\log\rho]$ - пропускная способность канала связи, V - скорость передачи информации [2, 3]. Дополнительно необходимо установить взаимосвязь между параметрами δ_2 и ρ , δ_3 и ρ : $\delta_2 = F(\rho, m, z)$ [1], $\delta_3 = \theta \cdot 2^{-2R}$ [2]. Вид функции F определяется параметрами используемого в подсистеме ПИИ кода (длиной информационной m и избыточной z кодовых комбинаций). Коэффициент θ характеризует алгоритмическую структуру обработки информации на ЭВМ [4].

Таким образом, задача системного синтеза АСКЗ запишется в виде

$$\min \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{a_{1n}}{a_{2n}\delta_{1n} + a_{3n}} + b_1 V F(\rho, m, z) + b_2 + d_1 \log^2 \delta_3 - (d_2 + d_1 \log \theta) \log \delta_3 + d_3 + \frac{1}{2} d_2 \log \theta + \frac{1}{4} d_1 \log^2 \theta \right\} \quad (2)$$

при $\frac{1}{N} \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 \leq \delta_0$.

В полученной задаче скорость передачи информации V определяется временными соотношениями в АСКЗ исходя из заданного времени получения выходной информации T_0 . Однако в силу дискретности значений $V = 50, 200, 600, 1200, 2400$ и 4800 бод можно зафиксировать параметр $V = V_\ell$, $\ell = 1, \dots, \Delta$, и в результате решения задачи (2), получить несколько значений $P_\ell = P_1, \dots, P_\Delta$, $\ell = 1, \dots, \Delta$, по которым производится расчет остальных технических характеристик подсистемы ПИ.

Второй этап - локальный: формулировка задачи синтеза аппаратуры ПИ, расчет требуемых технических характеристик и выбор оптимального набора средств для проектирования канала связи.

Параметры, характеризующие качество ПИ, вычисляются по найденным из системного анализа значениям P_ℓ , $\ell = 1, \dots, \Delta$ и фиксированным параметрам V_ℓ , $\ell = 1, \dots, \Delta$.

Время передачи информации $T_{прд}$ находится по общему числу (M) двоичных символов в блоке передаваемой информации:

$$T_{\text{прг}/\ell} = \frac{M}{\gamma \cdot B_{\ell}}, \quad \ell = 1, \dots, L, \quad (3)$$

где $M = KM + Z + M_s + M_0$; $\gamma < 1$ - коэффициент снижения пропускной способности, учитывающий влияние переспросов; M_s - число двоичных символов синхронизации; M_0 - число двоичных символов, соответствующих времени ожидания квитанции (подтверждения приема от центрального пункта).

По данным [5] $m = 8$, $Z = 3KM$ (трехкратное повторение информационного блока), $M_s = 3\zeta$ (синхронизация осуществляется с помощью синхронизирующего префикса длиной $\zeta = 10$ бит в каждом блоке), $M_0 = KM$ (время ожидания квитанции равно длительности информационной части блока), $\gamma = 0,9$ (суммарные потери из-за переспросов определяются вероятностью искажения префикса и сигналов квитанции, и составляют около 10%). Тогда для $K = 14$ и $B = 600$ бод получим

$$T_{\text{прг}/600} = \frac{14 \cdot 8 + 3 \cdot 14 \cdot 8 + 3 \cdot 10 + 14 \cdot 8}{0,9 \cdot 600} = 1,1 \text{ с.} \quad (3')$$

Время вызова и установления связи $T_{\text{уст}}$ включает в себя время передачи сигнала вызова от центральной ЭМ на первичный пункт, время установления связи и время получения от первичного пункта подтверждения связи. Для расчета $T_{\text{уст}}$ используем соотношение

$$T_{\text{уст}/\ell} = \frac{T_{\text{ц}} - N T_{\text{прг}/\ell}}{N}, \quad (4)$$

где $T_{\text{ц}}$ - цикл опроса, определяемый как разность между промежутком времени между двумя соседними замерами (24 - 30 мин) и интервалом осреднения первичной информации (20 мин) [1]; таким образом, цикл опроса может быть равен 4 - 10 мин.

При $N = 10$ и $T_{\text{прг}/600} = 1,1$ с $T_{\text{уст}/600}$ равно 23 - 59 с.

Правильность оценок $T_{\text{прг}/\ell}$ и $T_{\text{уст}/\ell}$ проверяется по системному неравенству

$$T_{\text{прг}/\ell} + T_{\text{уст}/\ell} \leq T_0 - T_{\text{обр.}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{обр.}}$ - время обработки информации.

Выбор типа канала связи производится с учетом требований по скорости передачи информации B и достоверности передачи P , определяемых из решения задачи (2), времени установления связи, рас-

считываемому по формулам (3) - (5) и заданной надежности функционирования системы λ_0 :

$$B \geq B_\ell, P \leq P_\ell, T_{уст} \leq T_{уст/\ell}, \ell = 1, \dots, L, \lambda \leq \lambda_0. \quad (6)$$

Использование системы неравенств (6) для сопоставления рассчитанных технических характеристик с реальными данными позволяет выбрать тип канала связи для различных скоростей передачи информации.

Таким образом, задача проектирования подсистемы ПИ может быть решена поэтапно в следующем порядке (рис. 2):

- 1) проведение системного анализа и расчет P при различных фиксированных значениях скоростей B_ℓ , $\ell = 1, \dots, L$;
- 2) расчет времени передачи информации и времени установления связи и проверка найденных значений по неравенству (5);
- 3) выбор комплекса технических средств ПИ согласно (6).

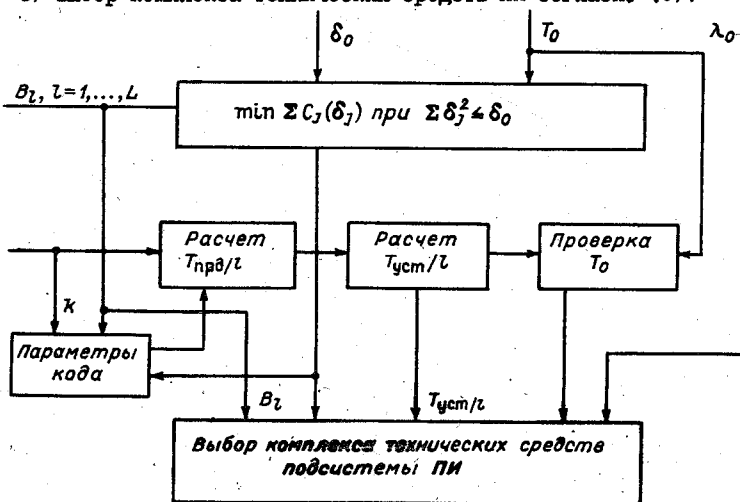


Рис. 2. Методика комплексного синтеза подсистемы ПИ.

Для примера проведена оценка характеристик АСКЗ Ленинграда. При разработке блока ПИ для АСКЗ были учтены следующие характеристики аппаратуры: скорость передачи информации (50 бод), количество абонентов (24), цикл опроса (10 мин), число повторений информационного блока (3), вероятность появления ошибки (достоверность передачи информации) (10^{-5}). В результате расчета времени передачи

информации и времени установления связи по соотношениям (3) - (6) получены следующие значения: $T_{\text{пр}/50} = 12$ с, $T_{\text{уст}/50} = 13$ с. При этом на опрос восьми существующих постов должно затрачиваться 3,5 мин. Реально (в условиях загруженной городской АТС) на опрос затрачивается 4 - 5 мин. Отсюда следует, что количество постов может быть увеличено не более чем в два раза. При дальнейшем увеличении количества постов и сохранении $T_{\text{ц}} = 10$ мин не будет выполняться неравенство (5) в реальных условиях и потребуются увеличение скорости передачи. Примером может служить система АНКЭС-АГ, где применены АПД со скоростями передачи 600 и 1200 бод.

Рассмотренная методика позволяет достаточно простыми способами выбрать оптимальный комплекс технических средств подсистемы ПИ, учитывая при этом как особенности подсистемы, так и влияние технико-экономических показателей системы АСКЗ в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербань А. Н., Примаков А. В., Копейкин В. И. Автоматизированные системы контроля загрязненности воздуха. - Киев: Техника, 1979.
2. Глазунов В. А., Федоров Ю. В. Выбор типа ЭВМ в системе сбора и обработки информации как оптимизационная задача. - В кн.: Исследования по акустике, электрофизике и радиоэлектронике. - Куйбышев, 1977, вып. 5, с. 129-131.
3. Красов В. И. Автоматизированный контроль загрязнений атмосферы и его приборное обеспечение. - Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 3-12.
4. Федоров Ю. В. Оптимизация алгоритмической структуры ИИС по комплексному показателю. - Изв. ВУЗов. Приборостроение, 1978, № 11, с. 17-20.
5. Шило Н. Х. Выбор скорости передачи информации в автоматизированных системах контроля загрязнения воздуха. - В кн.: Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. Киев, 1978, вып. 4, с. 35-38.

А. Д. Зив, В. И. Красов, О. К. Тихомирова

ВЫБОР МОДЕЛИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ АНКОС-АГ

Важной задачей системы контроля загрязнения воздушного бассейна АНКОС-АГ является краткосрочный оперативный прогноз опасных уровней загрязнения, что позволит обеспечить своевременное снижение уровня выбросов вредных веществ в атмосферу промышленными источниками.

В настоящее время в СССР разработаны методы прогноза ЗА, основанные на статистической обработке многолетних сетевых наблюдений с использованием лабораторных химических методов анализа [7, 8]. Целый ряд работ зарубежных авторов [9, 14] посвящен методам прогноза на основе данных автоматизированных систем. Целью прогноза ЗА является предсказание последующих значений временного ряда концентрации загрязняющих веществ или показателя загрязнения в целом по городу по информации о предыдущих его значениях и метеорологических условиях. При этом с успехом используются линейная и графическая регрессии, метод распознавания образов и т.п. Однако такой подход обладает одним существенным недостатком: он не позволяет оперативно управлять уровнем эмиссии источников выбросов, а следовательно, не обеспечивает управление качеством воздушного бассейна.

Принципиально иным является прогноз с помощью модели атмосферной диффузии, которая непосредственно связывает приземную концентрацию и объем выброса. В [4] сформулированы требования, которым должны удовлетворять модели распространения примеси, используемые в автоматизированной системе контроля загрязнения атмосферы. Оперативные данные о загрязнении могут быть использованы для корректировки параметров модели [7] (например, значений коэффициента турбулентности K_z) и управления уровнем выбросов. При этом можно использовать теорию возмущения линейных функционалов [6, 16]. В [4] отмечалось, что с точки зрения экономии затрат времени ЭВМ и ее памяти в системе целесообразно использовать простые "явные" формулы расчета загрязнения от нескольких промышленных источников. Исследования их работоспособности были проведены на основе моделей СН 369-74, утвержденной Госком СССР [2], и "гауссовой", различные варианты использования которой широко известны [11, 12, 17].

Исходный материал, собранный в период советско-болгарского эксперимента в Ленинграде (ноябрь - декабрь 1980 г.), включал:

а) данные об источниках эмиссии сернистого газа (из 300 источников были выбраны 60, на которые приходится 80 % всех выбросов SO_2 в Ленинграде);

б) данные метеорологических измерений на пяти станциях города и телевышке и результаты радиозондирования в пос. Воейково под Ленинградом (ветер, температура, влажность, давление, солнечная радиация прямая и рассеянная);

в) результаты измерений концентраций сернистого газа и окиси углерода автоматическими газоанализаторами ГМБ-3 и ГМП-1 на восьми станциях автоматизированного контроля загрязнения атмосферы (через 0,5 ч осредненные за 20 мин).

Для каждого источника были известны высота, диаметр устья трубы, объем выброса SO_2 в год, температура и скорость выхода газовой смеси. Источники были разделены на две группы: точечные и распределенные. К точечным были отнесены трубы некоторых крупных заводов и ТЭЦ, к распределенным - мелкие источники (вентиляционные шахты и трубы, аэрационные фонари и т.п.). О последних были известны лишь некоторые средние характеристики и общий объем выбросов сернистого газа. Вычисления показали, что вклад точечных источников составляет около 90 % общего объема выбросов всех принимавшихся во внимание источников.

При расчетах вычислялись концентрации, осредненные за промежуток времени, равный 3 или 6 ч. Поправка на изменение ветра в этот период вносилась так, как это описано в [1]. При этом распределение ветра по направлениям предполагалось или нормальным, или равномерным внутри определенного сектора. Значение дисперсии в нормальном распределении варьировалось от 10 до 30°. В таких же пределах изменялся сектор осреднения при предполагаемом равномерном распределении.

В численном эксперименте с гауссовой моделью учитывалась инверсия. При этом использовались формулы:

$$q(x, y, z) = \begin{cases} \frac{Q}{\pi b_y b_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}, & x < x_L; \\ \hat{q}(x, y, 0) = q(x, y, 0) \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} b_z e^{\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}, & x > 2x_L; \\ q(x, y, 0) + [\hat{q}(2x_L, y, 0) - q(x_L, y, 0)] \left(\frac{x}{x_L} - 1 \right), & x_L \leq x \leq 2x_L; \end{cases}$$

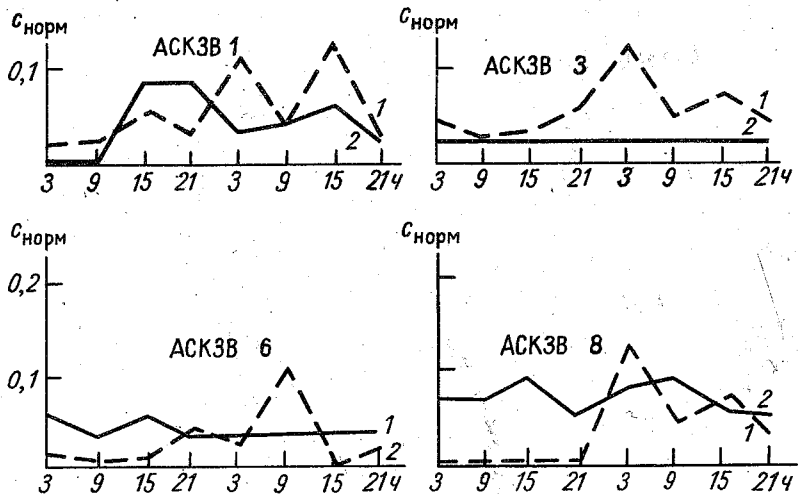


Рис. 1.

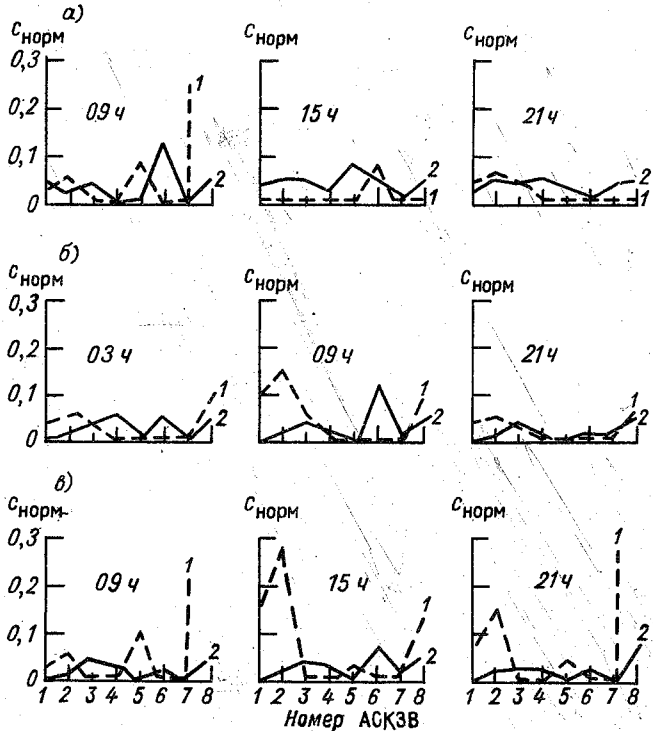


Рис. 2.

$$x_L / \sigma_z(x_L) = 0,47L,$$

где L - высота слоя перемешивания или инверсии.

Расчитанные концентрации сернистого газа сравнивались с измеренными на тех же станциях (рис. 1 - 4). Некоторые вариации параметров расчетных формул дали определенные улучшения, однако, как правило, они приводили к большему соответствию вычисленных и измеренных значений только на одной станции.

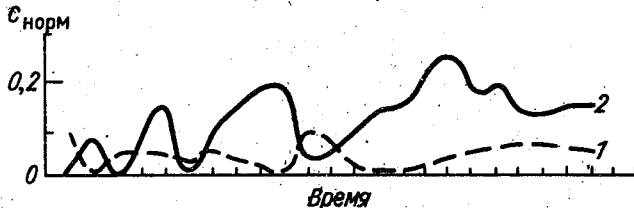


Рис. 3. Вычисленная по модели СН 369-74 (1) и измеренная (2) концентрации сернистого газа на АСКЗВ 6.

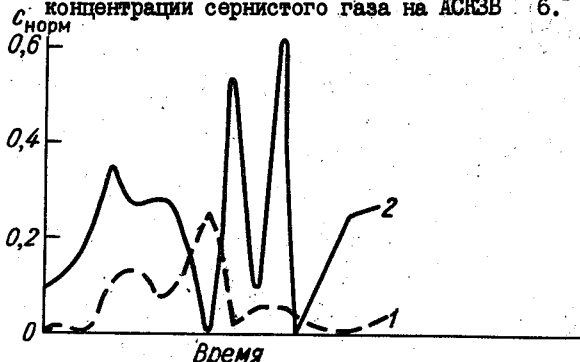


Рис. 4. Вычисленная по гауссовой формуле (1) и измеренная (2) концентрации сернистого газа на АСКЗВ 8.

Было выяснено, что отрицательные результаты эксперимента в большой степени обусловлены неточным заданием координат источников.

Параметры гауссовой формулы (дисперсии примеси σ_y и σ_z) выбирались в зависимости от метеоситуации в соответствии с аналитическими аппроксимациями профилей Пасквила-Тарнера [17]. Однако известно [3, 17], что местные климатические условия могут оказывать влияние на профили, но конкретных данных в нашем распоряжении для Ленинграда не оказалось.

Для сравнения с результатами моделирования осуществлялся прогноз загрязнения воздуха методом последовательной графической регрессии [8]. Вследствие небольшой продолжительности эксперимента

для расчета средних концентраций использовался десятидневный период осреднения, а не месячный, как рекомендовано в [8]. Было обнаружено, что наибольший вклад в прогнозируемое значение параметра P вносит его значение в предыдущий день. При этом высокие значения параметра P прогнозируются лучше, чем низкие. Ниже в таблице приведены рассчитанные по экспериментальным данным значения параметра P (P расч) и прогнозируемые значения за те же сутки (P пр):

Число	CO		SO ₂	
	P расч	P пр	P расч	P пр
29.II	0,38	0,30	0,06	0,17
30.II	0,23	0,27	0,02	0,12
01.I2	0,14	0,20	0,20	0,12
02.I2	0,07	0,11	0,03	0,12
03.I2	0,28	0,15	0,06	0,11
04.I2	0,45	0,26	0,32	0,19
05.I2	0,34	0,29	0,03	0,23
06.I2	0,08	0,20	0,05	0,11
07.I2	0,09	0,05	0,03	0,11

Из таблицы следует, что прогноз обобщенного показателя загрязнения по окиси углерода имеет сравнительно высокую оправданность, а по сернистому газу не дает хороших результатов так же, как расчет на основе диффузионных моделей.

Представляется целесообразным продолжать работы по повышению эффективности модели путем управления как ее параметрами, так и уровнями эмиссий. При использовании, например, гауссовой модели управление параметрами может заключаться в выборе поправок к профилям σ_y , σ_z , минимизирующих среднюю квадратическую ошибку моделирования.

Наличие "хорошей" модели рассеяния вредных примесей позволяет осуществлять стратегию управления качеством воздушного бассейна крупного города и включает в себя следующее:

1) Прогноз загрязнения воздуха по отдельным станциям с использованием статистических методов или их комбинации с "простыми" моделями [11].

2) Анализ и осуществление регулирования выбросов в случае неблагоприятного прогноза по п. 1. При этом используется детальное моделирование уравнения с соответствующим управлением;

3) Контроль и исправление прогноза по оперативным данным станций АСИЗА, а также анализ эффективности принятых мер по сокращению выбросов.

Необходимо отметить, что предполагаемая схема управления с помощью автоматизированной системы требует специального размещения станций контроля, ориентированного на контроль уровня эмиссии источников промышленных выбросов [16].

Также необходимо разработать строгие требования к точности задания исходных данных для моделирования (метеопараметров, уровней эмиссий и их временного изменения и т.п.), а также точности измерений станциями контроля.

Формирование количественных требований к исходным данным возможно на основе исследования чувствительности моделей [5, 10, 13]. Таким образом, анализ экспериментальных расчетов выявил необходимость:

- а) совершенствования инвентаризации выбросов и методов автоматического измерения загрязнения;
- б) оперативного взаимодействия системы АНКОС-АГ и сети наблюдения Госкомгидромета;
- в) разработки детальной схемы регулирования уровня выбросов и методики размещения АСИЗА;
- г) исследования чувствительности моделей и разработки метода корректировки их параметров по реальным оперативным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 448 с.
2. Указания по расчету вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, СН 369-74./Под ред. М.Е.Берлянда.-М.: Стройиздат. - 44 с.
3. Гаргер Е. К. Модель дымовой струи Гиффорда с использованием гипотезы подобия лагранжевой турбулентности в приземном слое атмосферы. - Труды ИЭМ, 1978, вып. 21(80), с. 3-15.
4. Зив А. Д., Красов В. И. К выбору математической модели распространения примеси для использования в автоматизированной системе контроля загрязнения атмосферы. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 12-20.
5. Киселев В. Б., Горелова В. В. Исследование уравнения атмосферной диффузии методами теории возмущения для функционалов. - Труды ГГО, 1979, вып. 436, с. 37-42.

6. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М., 1977, с. 331.

7. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения воздуха в городах. - Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 42-51.

8. Соиькин Л. Р., Иванова Е. И. Прогнозирование загрязнения воздуха в Ленинграде с учетом особенностей синоптических процессов. - Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 31-40.

9. Akizuki K., Ebizuka K. Prediction of air pollution based on observed data. - *Envir. Syst. Plann., Des. & Control, Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.1, Oxford 1978, pp.279-286.*

10. Dunker A.M. Efficient calculation of sensitivity coefficients for complex atmospheric models. - *Atmos. Envir., vol.15, N 7, pp.1155-1161.*

11. Edson N., Johnson P.L., Fulle D.J. Real-time quality short-term air quality forecasting. - *Proc, 70th Annual Meet. APCA, Toronto 1977, vol.5, pp.1-14.*

12. Harruson B.M., McCartney H.A. A comparison of the predictions of a simple Gaussian plume dispersion model with measurements pollutant concentration at ground-level and aloft. - *Atmos. Envir., 1980, vol.14, N 5, pp.597-601.*

13. Lin M.K., Whitney D.C., Roth R.M. Effects of atmospheric parameters on the concentration of photochemical air pollutants. - *J. Appl. Met., 1970, vol.15, N 7, pp.829-835.*

14. Norio B., Soedo J., Sawaragi J. Forecast of air pollution using two-category pattern classifier. - *Int. J. Syst. Science, 1979, vol.10, N 10, pp.1155-1160.*

15. Oshima Y. et al. Air pollution prediction in air pollution control region. - *Envir. Syst. Plann., Des. & Control, Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol.2, Oxford 1978, pp.645-653.*

16. Seinfeld J.M., Chen W.N. Optimal distribution of air pollution sources. - *Atmos. Envir., 1973, vol.7, n1, pp.87-100.*

17. Jurner Workbook of atmospheric dispersion estimates, NAPCA, Cincinnati, 84.

О ВЫБОРЕ КРИТЕРИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СТАНЦИЙ КОНТРОЛЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Важной задачей, определяющей эффективность автоматизированных систем контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ), является определение оптимальной пространственной структуры системы. Сущность ее заключается в разработке принципа размещения станций автоматизированного контроля на контролируемой территории и определения их количества, необходимого для обеспечения достоверной информации о загрязнении воздушной среды. Рассмотрим известные методики размещения станций. Ряд авторов [1, 13] относят вопрос размещения станций к задачам оптимизации и решают его соответствующими методами. Основой подхода данного типа является определение конкретного критерия оптимизации.

В работе [13] предложены два критерия оптимизации: обеспечение максимальной чувствительности систем контроля к мощности выбросов наиболее важных источников загрязнения и обеспечение минимально допустимой концентрации примеси, безопасной для здоровья населения. Оптимизируя любой из них, можно получить искомого решение, причем выбор критерия зависит, в частности, от задач потребителя. В предложенном варианте [13] используется первый критерий.

Для нахождения координат АСКЗА максимизируется функционал:

$$H = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^L \mathcal{L}(x_k, y_k, 0, t_l)^T B^T N^{-1} B \mathcal{L}(x_k, y_k, 0, t_l) \quad (1)$$

с учетом ограничительного условия на плотность размещения АСКЗА:

$$[(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2]^{1/2} \geq \varepsilon \quad (2)$$

при $0 \leq x_k \leq l_1$, $0 \leq y_k \leq l_2$, $k \neq j$,

где $k = 1, \dots, M$ - число обсервуемых АСКЗА, l_1, l_2 - линейные размеры области, \mathcal{L} - функция качества, ε - оценка минимального допустимого расстояния между станциями.

При решении поставленной задачи необходимо сформулировать и обосновать приемлемый критерий оптимизации и выбрать метод его оценки. При этом возникает необходимость доказательства существования такой оценки, и только тогда возможно построение математической модели процесса и определение характера связи принятого критерия с входными параметрами модели [11].

К другой группе подходов были отнесены методики [2, 14] и др., основанные на идее разбиения рассматриваемой территории города на зоны, обладающие характерными признаками. Для этого используются различного рода соображения, выраженные как в качественной, так и в количественной форме. Например, в работе [14] для определения числа АСКЗА в выделенной зоне предлагаются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} N &= N_x + N_y + N_z, \\ N_x &= \frac{0,0965(S_{\max} - S_{\text{доп}}) \cdot x}{S_{\text{доп}}}, \\ N_y &= \frac{0,0096(S_{\max} - S_{\min}) \cdot y}{S_{\text{доп}}}, \\ N &= 0,004 z, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где N - число АСКЗА в зоне; x, y, z - площадь зоны (км^2), где значения концентрации примеси могут быть соответственно выше и ниже фоновых и равные им; $S_{\max}, S_{\min}, S_{\text{доп}}$ - соответственно максимальные, минимальные и допустимые значения концентрации загрязняющего вещества (в $\text{мг}/\text{м}^3$) в выделенной зоне.

Несмотря на очевидную простоту и наглядность методик такого типа, необходимо отметить значительную субъективность выбора зон, а в некоторых случаях и невозможность их выделения на территории города.

Определенный интерес представляют работы, использующие статистический анализ результатов экспериментального обследования загрязнения рассматриваемого региона [3, 4]. На основании статистической обработки исходных данных, определяются оптимальные расстояния между АСКЗА, количество станций на единицу площади, на число жителей и т.д.

Все рассмотренные методики носят вспомогательный характер и не дают конкретных рекомендаций для решения поставленной задачи.

Анализ рассмотренных работ позволяет сделать следующие выводы о возможности применения предложенных методов для создания методики размещения АСКЗА и определения их количества. Во-первых, во всех работах отсутствует единый взгляд на данную задачу. Во-вторых, создание универсальной методики пространственного размещения АСКЗА является сложным в силу своеобразия микроклимата каждого города, характера расположения на его территории источников примесей, планировки города, его физико-географического расположения и т.д. В частности, возникает проблема учета специфики распространения загрязняющих примесей. Известно [5, 6] и др., что основными источниками выбросов SO_2 в атмосферу города являются ТЭС и ТЭЦ - 73%, промышленные предприятия - 22,5%. Наибольший вклад в выбросы CO вносит транспорт, рассматриваемый как линейный

источник неорганизованных выбросов (73,7 %), и характерные отрасли промышленности (деревообрабатывающая, химическая, нефтехимическая). Время пребывания этих примесей в атмосфере различно; так, если окись углерода практически не взаимодействует с другими веществами и время ее существования почти не ограничено, то продолжительность жизни диоксида серы в атмосфере сравнительно невелика, так как сернистый ангидрид принимает участие в аналитических, фотохимических и других реакциях. Следовательно, пространственная структура автоматизированной системы контроля должна учитывать особенности распределения полей вредных примесей. В-третьих, наибольший интерес представляют методики, включающие микроклиматические характеристики города, синоптический анализ влияния различных типов погоды и т.д. В-четвертых, для решения задачи размещения станций контроля загрязнения воздуха перспективным, с нашей точки зрения, является физико-статистический метод, позволяющий создать близкую к реальной модель распространения примеси в воздушном бассейне города, исследовать структуру процесса, определить особенности формирования полей концентрации загрязняющих веществ, их временную и пространственную изменчивость.

Решение поставленной задачи существенно зависит от того, какие функции должна выполнять система. При создании сети контроля естественно требовать от работы каждой станции в отдельности не только ее информативности, но и репрезентативности получаемых данных о поле загрязнения. Под репрезентативным будем понимать такое расположение станций в выбранной точке, при котором воздействие окружающих ее влияющих факторов минимально. Пусть атмосфера города представляет собой относительно устойчивую систему, т.е. обладает некоторой инерционностью к внешним и внутренним воздействиям. Это означает, что под влиянием различных причин формируется определенный в среднестатистическом смысле уровень загрязненности - фон [7]. В качестве гипотезы далее примем, что под влиянием местных условий формируются и локальные уровни загрязнения - местный фон, характерный только для отдельных районов города. Выделение этих районов либо доказательство их отсутствия является основным вопросом экспериментального изучения структуры полей концентрации примесей при разработке методик размещения сети АСКЗА.

Следующий этап исследования заключается в выработке оценок репрезентативности АСКЗА и обосновании мест расположения станций контроля. Возможные способы определения подобных критериев описаны в работах [8, 9].

В частности, такой критерий можно было бы построить [12], зная статистическую структуру исследуемого поля загрязнения. Для

этого были обработаны данные (см. таблицу), полученные с семи станций контроля (рис. 1) за летний сезон 1977 г., и определена зависимость коэффициентов автокорреляции от расстояния (рис. 2), которая для удобства была аппроксимирована следующей формулой:

$$r(l) = \exp(-0,15l), \quad (4)$$

где l - расстояние между АСКЗА (км).

Коэффициент автокорреляции (знаменатель)
и расстояние (числитель) между АСКЗА (км)

Номер станции	1	2	3	4	5	6	7
1	1	$\frac{4,9}{0,60}$	$\frac{10,8}{0,29}$	$\frac{7,0}{0,100}$	$\frac{7,5}{-0,04}$	$\frac{4,1}{0,44}$	$\frac{7,3}{0,07}$
2		1	$\frac{7,0}{0,34}$	$\frac{5,0}{0,27}$	$\frac{7,4}{0,32}$	$\frac{1,8}{0,32}$	$\frac{9,0}{0,17}$
3			1	$\frac{4,9}{0,40}$	$\frac{7,3}{0,31}$	$\frac{6,8}{0,28}$	$\frac{10,1}{0,20}$
4				1	$\frac{2,8}{0,60}$	$\frac{3,7}{0,73}$	$\frac{5,5}{0,64}$
5					1	$\frac{5,7}{0,39}$	$\frac{2,9}{0,37}$
6						1	$\frac{7,1}{0,50}$
7							1

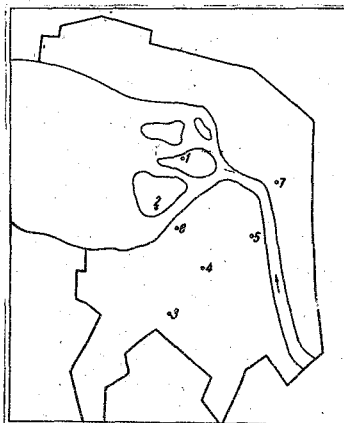


Рис. 1. Размещение станций контроля исследуемого поля загрязнения.

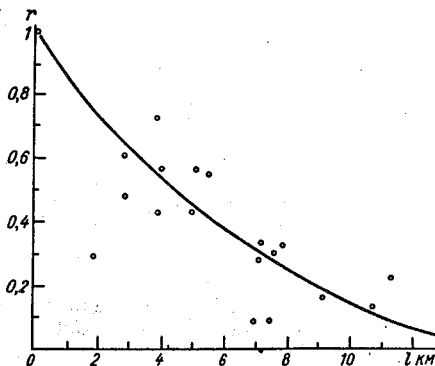


Рис. 2. Зависимость коэффициентов автокорреляции от расстояния

Полученная зависимость хорошо согласуется с оценкой, приведенной в работе [4]. Очевидно, что полученное соотношение удовлетворяет всем свойствам, которыми должна обладать нормированная корреляционная функция, а именно: $r(l) = r(-l)$; $r(0) > 0$, $|r(l)| \leq r(0)$. Кроме того, необходимо оценить положительность спектра $r(l)$ согласно [10]:

$$\mathcal{S}(r) = 2\pi \int_0^{+\infty} \exp(-\lambda l) \cdot J_0(\delta \cdot l) \cdot l dl \geq 0, \quad (5)$$

здесь J_0 - функция Бесселя I-го рода нулевого порядка; λ - эмпирический коэффициент автокорреляции. Решив это неравенство, получим выражение

$$\mathcal{S}(\delta) = \frac{\pi}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{2\lambda^2 - 3\delta^2}{\lambda^2} \right) \geq 0, \quad (6)$$

которое является положительным при $0 \leq \delta \leq |\lambda| \cdot 0,816$.

Таким образом, получено соотношение между дисперсией изучаемого элемента и эмпирическим коэффициентом найденной функции:

при $\lambda = 0,15$ $\delta \leq 0,122$.

Из ниже приведенных данных видно, что неравенству (6) удовлетворяют все рассчитанные значения дисперсий рассматриваемого элемента.

Номер поста	1	2	3	4	5	6	7
δ	0,036	0,047	0,060	0,055	0,056	0,046	0,066

Следовательно, полученное соотношение (5) может быть использовано в качестве автокорреляционной функции для построения оценок репрезентативности расположения АСКЗА и их количества, согласно [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М я ч Л. Т., С и р о т е н к о О. Д. Рациональное размещение метеостанций как задача исследования операций. - Метеорология и гидрология, 1973, № 3.
2. А р т е м о в В. М., П а р ц е ф Д. П. Подходы к оценке состояния загрязнения атмосферы воздуха городов. - Труды ЦИГМО, 1979, № 13.
3. Б е з у г л а я Э. Ю., К л и н г о В. В. О структуре поля концентрации примесей в городском воздухе. - Труды ГГО, 1973, вып. 293.
4. Г о р ш е н е в А. М., К о н ь к о в С. А., П о л и щ у к А. И. Некоторые результаты поля концентраций SO_2 в атмосфере промышленных городов. - Труды ГГО, 1975, вып. 352.
5. С к а л к и н Ф. В., К а п а е в А. А., К о п п И. З. Энергетика и окружающая среда. - М.: Энергия, 1981.
6. Б е з у г л а я Э. Ю., Р а с т о р г у е в а Т. П. Загрязнение воздуха в городах различных стран. - Труды ГГО, 1973, вып. 293.
7. С о н ь к и н Л. Р. Вопросы прогнозирования фоновго загрязнения воздуха в городах. - Труды ГГО, 1974, вып. 314.
8. Д м и т р и е в А. А., И с а е в А. А. Оценка возможности распространения результатов наблюдений на реперной станции над суточными суммами осадков на окружающую территорию. - Метеорология и гидрология, 1970, № 9.
9. К о н с т а н т и н о в А. Р., Р ы б ч е н к о А. А., Ф и л и п п е н к о Л. А. Схема учета репрезентативности и отдаленности метеостанции от пункта, в котором используются данные ее наблюдений. - Труды Укр. НИИГМИ, 1971, № 102.
10. Г а н д и н Л. Г. Объективный анализ метеорологических полей. - Л.: Гидрометеиздат, 1963.
11. Д е г т я р е в В. И. Метода оптимизации. - М.: Сов. радио, 1980.
12. Б о г д а н о в а Э. Г. Некоторые аспекты современного состояния вопроса о репрезентативности метеорологических станций. - Труды ГГО, 1980, вып. 435.
13. Seinfeld J.H. Optimal location of pollutant monitoring station in an airshed. - Atm. Environ., vol.6, N11, 1972.

14. Rybarczyk A., Jaworowicz A. Systemy automatycznej kontroli zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego w regionach przemysłowych. - Ochrona Powietrza, N 9, 1978.

А. Н. Щербань, А. В. Прямак, Т. С. Шпилева

К ВЫБОРУ МОДЕЛИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ СТАНЦИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Важнейшими задачами проектирования автоматизированных систем наблюдения и контроля окружающей среды (АНКОС) являются выбор места для установки автоматизированных станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) и определение их количества [1].

Основной вопрос, возникающий при решении этих задач - выбор критерия определения мест установки АСКЗА.

При размещении АСКЗА необходимо учитывать следующие требования:

- получение в реальном времени репрезентативной информации о загрязнении воздуха (ЗВ) в соответствии с принятыми нормативными документами;

- прогноз опасных ситуаций;

- определение степени опасности фактического и прогнозируемого уровня ЗВ для населения;

- выявление источников, ответственных за превышение допустимого уровня ЗВ;

- определение эффективности контроля качества воздушного бассейна (КВБ).

Конфигурация контрольной сети меняется в зависимости от решаемой задачи. Система с достаточно разветвленной сетью АСКЗА практически трудно реализуется. При ограниченном количестве АСКЗА эффективность системы будет в значительной мере определяться местоположением станций контроля. Вопросы исследования и разработки методов размещения измерительных станций в системах контроля окружающей среды рассматриваются в ряде работ советских и зарубежных авторов [2 - II].

В [2] предложен принцип организации сети станций, основанный на выделении функциональных зон города (промышленной, жилой, центральной, магистральной, зеленой). С помощью весовых коэффициентов учитывают различия соотношений концентраций отдельных ингредиентов в различных зонах. В [3] рассмотрена задача оптимального пе-

перераспределения заданного числа пунктов наблюдения за радиоактивными выпадениями внутри территории с конечным числом гомогенных районов, основанная на минимизации дисперсии результатов замеров. Для равноценных районов число пунктов наблюдения пропорционально площади района и дисперсии в этом районе, а для неравноценных, кроме того, еще и корню квадратному из "веса" данного района с учетом численности населения. Дисперсия при этом, однако, зависит от искомого числа пунктов, которое существенно превышает количество районов.

В [4, 5] рассматривается задача оптимизации размещения сети измерительных станций для получения карт океанографических полей на основе анализа корреляционных функций случайного поля. В [6] предлагается методика размещения станций с помощью изокоррелят. Использование корреляционных функций отдельных параметров в подобных методиках позволяет улавливать лишь линейные эффекты вероятностной связи и требует последующего согласования нескольких случайных полей. Это сказывается на точности полученных решений и требует обработки обширного статистического материала. Аналогичный подход использован в работе [7] для оптимизации параметров пространственно-временной дискретизации локальных систем контроля поверхностных вод.

В [8] рассматриваются общесистемные аспекты размещения стационарных станций наблюдения, сбора и обработки информации о ЗВ местными, региональными, штатными и федеральными агентствами охраны окружающей среды США. В [9] на основе анализа годовых градиентов концентрации СО на отдельных станциях Нью-Йорка и всей национальной сети США предлагается стандартизированная система выбора участков контроля ЗВ. Все станции можно разделить на 6 типов: А - для контроля ЗВ в центральной части города на расстоянии 0,5 м от автомагистрали с интенсивным движением (более 10 тыс. автомашин в сутки, движущихся со скоростью менее 24,1 км/ч; В - для контроля ЗВ в зеленой зоне центральной части города на расстоянии 100 м от автомагистрали со средним движением до 500 машин в сутки; С - для контроля ЗВ в жилых районах в пригородных зонах; Д - станции, совмещенные с мезомасштабными метеостанциями; Е - для контроля фонового ЗВ в загородных непромышленных районах; F - для контроля ЗВ отдельных источников. В [10] предложена модель выбора мест установки станций, основанная на максимизации ранжированных сумм "факторов перекрытия" для всех источников и возможных направлений ветра в каждой квадратной ячейке площади контролируемого объекта. Факторы перекрытия учитывают расстояние от источника, его мощность и плотность населения. Задача решается на ЭВМ эвристическими методами и предусматривает возможность по-

следующего перемещения станций, устанавливаемых, как правило, на передвижных платформах, с целью последовательного улучшения их репрезентативности.

В [11] предложена количественная модель размещения измерительных станций в пространстве и во времени для контроля воздушного бассейна города, описываемая набором параболических или гиперболических дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. В качестве критериев выбора мест установки станций используется наибольшая чувствительность к изменениям мощности эмиссии основных источников выбросов. Алгоритм решения задачи носит итеративный характер. Предполагается, что целевой функцией, подлежащей минимизации, являются расходы по регулированию эмиссии источников. Работа [11] отличается от рассмотренных выше учетом экономического фактора. Однако изложенный подход рационален лишь в случае, когда известны экономические характеристики отдельных участков контролируемого объекта либо они практически одинаковы, т.е. весь объект является однородным. В большинстве же случаев отдельные участки контролируемого объекта города, региона имеют различные показатели по плотности населения и жилой застройки, размещению предприятий, зон отдыха и т.п. В связи с этим возникает необходимость при выборе мест установки станций руководствоваться критериями, отражающими эти факторы.

С учетом сказанного может быть предложен подход, минимизирующий не расходы по функционированию АСУ КВБ, а весь возможный ущерб, наносимый объекту [12] или максимизирующий величину предотвращенного ущерба. Принципы его изложены в работах [13 - 15]. Оптимизируемая величина представляет собой разность между возможным ущербом, наносимым ЗВ народному хозяйству в целом (при данных значениях концентраций загрязняющих веществ), и остаточным ущербом, который может быть нанесен после установки станций и появившейся в связи с этим возможностью управления выбросами [13].

В случае невозможности определения остаточного ущерба (в связи с большими неточностями при прогнозе результатов управления уровнем ЗВ при недостатке данных для расчета отдельных составляющих ущерба) в качестве критерия выбора "характерных" зон размещения станций в контролируемом объекте рационально использовать величину возможного ущерба. Для определения последней предлагается следующий алгоритм.

Площадь контролируемого объекта разбивается на ряд однородных участков. Участки следует считать однородными, если внутри них одинаковы такие характеристики как плотность населения, застройки, сельскохозяйственных и лесных угодий, наличие специально контролируемых объектов, а также необходимый уровень надежности

контроля и защиты атмосферного воздуха. Часть характеристик может быть оценена количественно, остальные должны оцениваться с помощью экспертных оценок. В качестве одного из вариантов при определении габаритов участков может быть использована модель [15, 16].

Для каждого j -го участка определяются функции локальных ущербов в зависимости от концентрации C_i [12]:

$$g_{jim}(C_i) = A_{jim} C_i^{b_{jim}}, \quad (1)$$

где j - номер участка; i - номер компонента; m - номер локального ущерба; A и b - экспериментально определяемые коэффициенты.

Зная розу ветров данного района, плотность распределения скорости ветра, стратификацию и другие метеопараметры в зависимости от направления ветра и плотность распределения выбросов источников, можно определить плотность распределения концентрации i -го компонента на j -м участке возможной установки АСКЗА - $f_{ji}(C_i)$. В этом случае возможный ущерб j -го участка от воздействия всех компонентов по всем видам локальных ущербов может быть подсчитана так:

$$g_j = \sum_{i=1}^z \sum_{m=1}^i \int_0^{C_{i\text{нр}}} f_{ji}(C_i) g_{jim}(C_i) dC_i, \quad (2)$$

где z - число учитываемых компонентов; i - число учитываемых локальных ущербов; $C_{i\text{нр}}$ - предельное значение концентрации, например, максимальное из ранее регистрируемых i -го компонента.

Выражение (2) может быть упрощено, если принять во внимание следующее. Величина концентрации компонента в любой точке представляет собой сумму концентраций, создаваемых эмиссией достаточно большого количества источников. В связи с этим закон распределения суммарной концентрации будет весьма близок к нормальному независимо от законов распределения каждого из слагаемых [17]. Значения математического ожидания и дисперсии могут быть вычислены, если задана модель ЗВ. Для принятой в СССР модели [18] справедливо:

$$\bar{C}_i = M[C_i] = \sum_{k=1}^{N_j} \frac{A_i M_{ik} F_{imk} n_k}{H_k^2 \sqrt{\frac{\pi Q k^2}{4 W_0 k \Delta T_k}}}, \quad (3)$$

где $M[C_i]$ - математическое ожидание концентрации C_i ; i - номер компонента; j - номер участка; N_j - количество источников, влияющих на формирование концентрации C_i на j -м участке. Значения остальных величин приведены в [18]. Дисперсия $D[C_i] = \sigma_i^2$

концентрации определится через дисперсии величин, входящих в (3).

Учитывая изложенное, выражение (2) можно переписать в виде:

$$J_j = \sum_{i=1}^Z \sum_{m=1}^L \frac{A_{jim}}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^{C_{imp}} C_i^{B_{jim}} \exp[-(C_i - \bar{C}_i)^2 / 2\sigma_i^2] dC_i \quad (4)$$

Если возможность подсчета остаточного ущерба отсутствует, следует ранжировать участки по J_j , определяя тем самым место установки станций. При наличии методики расчета эффективности АНКОС и определения величины остаточного ущерба можно применить более совершенный метод выбора мест установки станций при их ограниченном количестве. Этот способ [10] разрешает учитывать влияние слабых источников ЗВ, не позволяя более мощным "заглушать" их. Сущность его состоит в следующем.

Введем величину X_j ($j = 1, 2, \dots, K_{\text{кзс}}$) таким образом, что $X_j = 1$, если на участке j станция установлена, и $X_j = 0$ в противном случае. При этом целевая функция запишется в виде:

$$J = \sum_{j=1}^{K_{\text{мз}}} \max \{ (y_i - y_{j0}) X_j \} \quad (5)$$

при условии $\sum_{j=1}^{K_{\text{мз}}} X_j \leq K_{\text{кзс}}$.

Здесь $K_{\text{мз}}$ - количество возможных мест установки станций контроля; $K_{\text{кзс}}$ - количество станций; y_j - возможный ущерб для j -го участка; y_{j0} - остаточный ущерб для j -го участка.

Выбирая места установки станций, нетрудно найти искомое, при котором величина y будет максимальной. Следует отметить, что изменение процедуры подобного поиска не зависит от конкретного физического смысла величины $(y_j - y_{j0})$. Последняя может представлять собой количественную характеристику любого критерия, положенного в основу решения задачи о размещении АСКЗА. При этом оценка результатов выбора оптимального размещения может производиться как оператором, решающим эту задачу, так и с помощью ЭВМ [19].

Определение места установки КЗС внутри данного участка может производиться с помощью модели, основанной на использовании метода Монте-Карло [20] для вычисления корреляционных характеристик условных математических ожиданий центрированного случайного процесса ЗВ на участке, их последующем нормировании и анализе спектральной плотности ЗВ по выборочному коэффициенту корреляции относительно комплексного показателя степени ЗВ [21, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрющенко А. А., Беляев В. Н. Математическое обеспечение расчетов океанографических полей по данным наблюдений. - Киев: Наукова думка, 1978. - 134 с.

2. Артемов В. М., Парцеф Д. П. Зональный принцип организации сети автоматических станций для оценки состояния загрязнения атмосферы города: Проблемы разработки автоматизированных систем контроля и оценки состояния окружающей среды. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Казань, 1978, с. 6-8.

3. Балацкий О. Ф. Экономика чистого воздуха. - Киев: Наукова думка, 1979. - 295 с.

4. Беляев В. Н., Тимченко Н. Е. Размещение измерений и точность восстановления поля при автоматизированном сборе и обработке гидрофизической информации. В кн.: Автоматизация научных исследований морей и океанов. Труды Всесоюз. симпозиума, ч. I. Севастополь, 1968, с. 327-341.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятности. М., 1962.

6. Гандин А. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 359 с.

7. Корнев В. П., Сибилев А. Н., Страдомский В. Б. Оптимизации параметров пространственно-временной дискретизации локальных систем контроля поверхностных вод. - Гидрохимические материалы. 1979, т. 73, с. 9-23.

8. Махонько К. П. Метод выбора оптимального распределения пунктов отбора проб радиоактивных выпадений. - Труды ИЭМ, 1977, вып. 6 (64), с. 42-45.

9. Михайлов Г. А. Эффективные алгоритмы метода Монте-Карло для вычислений корреляционных характеристик условных математических ожиданий. - ЖВММ, 1977, т. 17, № 1, с. 248-249.

10. П р и м а к А. В. К оптимизации технико-экономических критериев выбора средств сбора и обработки данных о загрязнении воздуха в автоматизированных системах. - В кн.: Методы и средства автоматизированного контроля атмосферных загрязнений. - Л.: Гидрометеиздат, 1980.

11. П р и м а к А. В. Организация автоматизированных систем сбора и обработки данных о загрязнении атмосферного воздуха. - Киев, 1979. - 28 с.

12. П р и м а к А. В., Г р и г о р ь е в а К. В., П о л я -
к о в В. Н., Ш п и л е в а я Т. С. Методы суммарной оценки загряз-
нения воздушной среды. - Гигиена и санитария, 1974, № 8, с.
81-84.

13. П р и м а к А. В., Щ е р б а н ь А. Н. Методы и средств-
ва контроля загрязнения атмосферы. - Киев: Наукова думка, 1980. -
296 с.

14. У к а з а н и я по расчету рассеивания в атмосфере вред-
ных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-74. М.,
1975.

15. Щ е р б а н ь А. Н., П р и м а к А. В., М а р у с о в
А. Г. Элементы АСУ интенсивностью промышленных выбросов по пока-
зателю степени загрязненности воздуха. - Механизация и автоматиза-
ция управления, 1975, № 6, с. 39-43.

16. Щ е р б а н ь А. Н., П р и м а к А. В., Ш п и л е в а я
Т. С. Установление предельно допустимых выбросов и контроль загряз-
ненности воздушного бассейна. - ДАН УССР, 1977, № 7, с. 654-656.

17. H o u g l a n d E. S., S t e p h e n a T. Air pollutant
monitor siting by analytical techniques. - J. Air Poll. Contr. As-
soc., 1977, 26, N 1, pp.51-53.

18. M o r g a n G. B. Monitoring the quality of ambient air.
- Environ. Sci. and Technol., 1977, 11, N 4, pp.352-357.

19. O t t W. R. Development of criteria for siting air moni-
toring station. - J. Air Poll. Contr. Assoc., 1977, 27, n 6, 543-
547.

20. S e i n f e l d J. - Atmos. Envir., 1972, n 6, pp.847-
858.

21. S h a n n o n R. E., I g n i z i o J. P. A heuristic
programming algorithm for warehouse location. - AIIE Transactions,
vol.2, N 4, 1970, p.334.

22. Lauber S. A system approach to air pollution control. -
Atmos. Envir., 1976, 10, N 8, pp.633-635.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

В настоящее время одной из важных задач газоаналитического приборостроения является создание приборов, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к газоанализаторам сети Госкомгидромета. К этим требованиям относятся следующие: максимальный учет статистических характеристик измеряемой концентрации газов с целью уменьшения методических погрешностей измерений и разработка приборов с минимальными затратами на изготовление и эксплуатацию.

В статье рассмотрена модель комплексного проектирования. Она включает выбор и построение целевой функции Γ из множества возможных показателей качества f .

$$\Gamma = f(y_i), \quad (1)$$

где y_i - параметры газоанализатора (ГА).

Ограничения могут накладываться как на параметры $y_i - y_{i, \text{гр}}$ (косвенно через ключевую характеристику), так и на параметры y_i .

Если в качестве характеристики используются затраты Z на создание или эксплуатацию ГА, то для решения задачи необходимо знать зависимость затрат от параметров ГА. Зададим эти зависимости в виде:

$$Z_i = \varphi_i(y_i). \quad (2)$$

Суммарные затраты на создание ГА равны:

$$Z_{\Sigma} = \sum_i \varphi_i(y_i). \quad (3)$$

Физический смысл ограничений заключается в том, чтобы в процессе оптимизации показателя Γ параметры y_i и их функции не выходили из заданных пределов.

Рассматриваемая модель комплексного проектирования предполагает создание ГА с максимальной целевой функцией при заданных ограничениях на параметры и затраты, т.е. отыскание

$$\Gamma^* = \max_{\{y_i\} \in \Omega} f(y_i). \quad (4)$$

В данном случае Ω - область, в которой выполняется неравенство

$$\sum_i \varphi_i(y_i) \leq Z_{\text{дон}}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{дон}}$ - максимально допустимые затраты на создание прибора.

Вид зависимостей (4) и (5), а также область допустимых значений y_i определяются на стадии исследования приборов. В настоящее время разработано много методов, обеспечивающих поиск целевых функций указанного вида, которые могут быть применены для решения задачи оптимального проектирования ГА. Задача оптимального проектирования заключается в том, чтобы найти такие значения параметров ГА, при которых критерий принимает экстремальное значение, т.е. выполняются условия (4) и (5).

Комплексное проектирование ГА проводят в несколько этапов:

- 1) построение статистической модели качества спектральных газоанализаторов, анализ исходных данных и граничных условий;
- 2) выбор показателя оптимизации;
- 3) проектирование ГА (выбор структуры построения и определение оптимальных значений параметров);
- 4) оценка решения.

Анализ исходных данных заключается в выборе данных, позволяющих проектировать прибор, наиболее полно удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к проектируемому ГА. Такими данными прежде всего являются: состав анализируемой газовой смеси, внешние условия, быстродействие, требования к линейности выходной статистической характеристики и точности, а также вероятностные параметры анализируемого процесса. Анализ исходных данных позволяет выбрать наиболее важные и отбросить второстепенные. Использование в качестве целевой функции информационных показателей требует обязательного знания вероятностных характеристик анализируемого процесса, т.е. плотности распределения концентрации измеряемого компонента. Это распределение чаще всего ассиметрично и для загрязняющих компонентов удовлетворительно описывается логарифмически-нормальной зависимостью [1]. Более сложная зависимость наблюдается при контроле промышленных и транспортных выбросов. Учитывая тот факт, что информационные показатели в большинстве случаев не выражаются аналитически [3], предлагается в дальнейшем представлять плотность вероятности измеряемой концентрации в виде гистограмм [4] с частотой α ; равной:

$$\alpha_i = \frac{m_i}{m} ;$$

(6)

где m_i - число наблюдений, попавших в i -й интервал квантования; m - общее число наблюдений.

На этом же этапе осуществляется анализ граничных условий. Он основан на ограничениях рассматриваемого класса ГА, обусловленных технологией изготовления, набором комплектующих элементов и материалов, используемых в этой области приборостроения. Здесь целесообразно использовать статистический подход, рассмотренный в работе [2], заключающийся в нахождении зависимости затрат на создание прибора от основных его параметров, исходя из анализа выпускаемых промышленностью ГА.

Выбор показателя оптимизации является органическим продолжением анализа исходных данных и определяется поставленной задачей. Как показано в работе [3] предпочтение отдается информационным характеристикам, при этом, если поставлена задача проектирования прибора с максимальной точностью, то в качестве целевой функции целесообразно выбирать информационную способность N . При анализе быстротекающих процессов (например, при контроле автотранспортных выбросов в переходных режимах) в качестве целевой функции выбирается показатель скорости прохождения информации по измерительному тракту $E = \frac{cN}{t}$; t - время одного измерения. При проектировании приборов с заданными точностными характеристиками целесообразно также использование относительных показателей, например, информационно-энергетического коэффициента полезного действия η , отражающего степень совершенства прибора и равного отношению минимально необходимой энергии для получения заданного количества информации к потребляемой.

Следующий этап оптимального проектирования включает решение двух задач: выбор структуры построения ГА и оптимизацию основных параметров прибора в рамках выбранной структуры. Наибольшие затруднения вызывает выбор структуры построения ГА. Это обусловлено многообразием структур построения спектральных ГА и большим объемом работ по анализу исходных данных и ограничений. Необходимо для каждой структуры вывести соотношения для расчета погрешностей и, по заданному критерию, обосновать выбор структуры построения. Этот этап наиболее полно освещен в работе [4].

Ниже подробно рассмотрены вопросы определения оптимальных параметров абсорбционных ГА в рамках найденных рациональных структур построения. Обобщенная схема вычислений представлена на рис. 1.

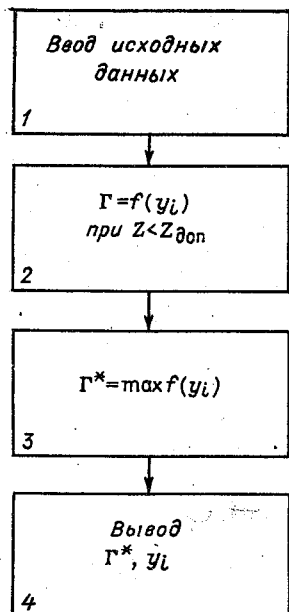


Рис. 1. Схема вычислений оптимальных параметров ГА.

Оператор 1 вводит оптимизируемую функцию с входными данными и исходную информацию о затратах на создание прибора с заданными точностными характеристиками в виде массива данных. Оператор 2 присваивает показателю оптимизации вычисленное значение погрешности при условии, что ограничение по затратам выполняется. Оператор 3 выполняет оптимизацию функции $f(y_i)$ по варьируемым параметрам. При помощи оператора 4 выводятся на печать максимальные значения оптимизируемой функции f_{\max} и соответствующих ей параметров $(y_i)_{\text{опт}}$. В ГГО на ЭВМ ЕС 1022 была реализована программа, позволяющая оптимизировать в соответствии с (4) и (5) скорость прохождения информации по измерительному тракту Е (и при некоторых изменениях информационную способность \mathcal{N}) путем выбора оптической плотности \mathcal{U} и быстродействия устройства обработки сигнала t_3 с учетом затрат Z_i .

Скорость прохождения информации Е в соответствии с [4] принимает вид:

$$E = \frac{1}{t_3 + t_0} \sum_i L_i \ln \left(\frac{\int \frac{\partial E_i}{\partial x}}{n d_i \sqrt{\delta_0^2 + \delta_F^2 F_i^2 + \delta_H^2 F_i^4 + \delta_{HH}^2 F_i^6}} \right), \quad (7)$$

где t_0 - время запаздывания анализируемой пробы в газовом тракте; n - число интервалов аппроксимации плотности вероятности измеренной концентрации; ρ - коэффициент, зависящий от законов распределения потока и погрешности определения потока на входе фотоприемника ГА; F_i - функция пропускания (поглощения); $\delta_0, \delta_r, \delta_n, \delta_{nn}$ - аддитивная, мультипликативная и нелинейные составляющие погрешности определения потока на входе фотоприемника ГА.

Составляющие погрешности в свою очередь определяются структурой построения ГА и учитываются коэффициентами k_{ln} и погрешностями от влияющих факторов: изменения коэффициента передачи δ_k , коэффициента поглощения δ_ϵ , коэффициента пропускания оптического тракта δ_τ , погрешности от влияния мешающих компонент δ_m , погрешности регистрирующего устройства $\delta_{ур}$ и случайной погрешности, вызванной шумами фотоприемника $\delta_{ш}$. Таким образом, составляющие погрешности принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta_0^2 &= \bar{\delta}_0^2 + (k_{10} \delta_{ш})^2 + (k_{20} \delta_k)^2 + (k_{30} \delta_{ур})^2; \\ \delta_s^2 &= \bar{\delta}_s^2 + (k_{1s} \delta_{ш})^2 + (k_{2s} \delta_k)^2 + (k_{3s} \delta_m)^2 + (k_{4s} \delta_\epsilon)^2 + (k_{5s} \delta_{ур})^2; \\ \delta_n^2 &= \bar{\delta}_n^2 + (k_{1n} \delta_{ш})^2 + (k_{2n} \delta_k)^2 + (k_{3n} \delta_m)^2 + (k_{4n} \delta_\epsilon)^2; \\ \delta_{nn}^2 &= \bar{\delta}_{nn}^2 + (k_{1nn} \delta_{ш})^2 + (k_{2nn} \delta_k)^2 + (k_{3nn} \delta_m)^2 + (k_{4nn} \delta_\epsilon)^2; \\ \delta_{ш}^2 &= \delta_{ш_0}^2 / t_{\Delta 0}, \end{aligned} \right\} (8)$$

где $\bar{\delta}_i$ - постоянные составляющие погрешности, не зависящие от варьируемых параметров.

Зависимость составляющих погрешности от затрат вводится в виде матриц, приведенных для ГА на окись углерода в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Параметры оптической схемы (y_i)		$\delta_{ш}$ %	δ_K %	Z_1 руб.
Излучатель	Фотоприемник			
ИИ4-1,2	БП1-2	4	6	135
ТРШ-1500	БП1-2	0,7	6	148
ОА2109	БП1-2	1	7	77
ИИ4-1,2	МГ-30	12	2,2	240
ТРШ-1500	МГ-30	2	2,2	253
ОА2109	МГ-30	3	3,5	182
ИИ4-1,2	СЭ4-3	2	25	117
ТРШ-1500	СЭ4-3	3,5	25	130
ОА2109	СЭ4-3	5	25	59
ТРШ-1500	СЭ-13	0,4	4	358

Таблица 2

Фильтрующий элемент	δ_M %	Z_1 руб.
Дисперсионный	5	60
Интерференционный	2,5	200
Интерференционный газовый	1,0	284
Дифракционная решетка	0,5	400
Блоки термостатирования и баростабилизации	δ_ϵ %	Z_2 руб.
есть	0,6	250
нет	3,6	0
Электронная схема	δ_{HP} %	Z_3 руб.
Непосредственного отсчета	1,5	60
С термостабилизацией	1,0	105
Следящего уравнивания	0,5	300
С цифровой регистрацией	0,2	650

Сумма затрат не должна превышать Z_{2P} , определяемую в соответствии с [2] по статистической модели. Алгоритм программы соответствует рис. 1. После ввода исходных данных отбрасываются те варианты, для которых $\sum Z_i > Z_{2P}$ и для оставшихся вариантов осуществляется определение максимальных значений $E = E_{макс}$

путем варьирования χ и t_s в заданной области. Вычисленные значения $E_{\text{макс}}$ и оптимальные значения $\chi_{\text{опт}}$ и $t_{\text{опт}}$ для каждого варианта выводятся на печать, кроме того выводится на печать наилучший вариант построения заданной структуры ГА.

В соответствии с предложенной моделью оптимизации были рассчитаны значения параметров для основных структурных схем построения абсорбционных газоанализаторов, рассмотренных в работе [4]. Ниже приведены в качестве примера результаты расчета оптимальных параметров разностной двухлучевой схемы (рис. 2).

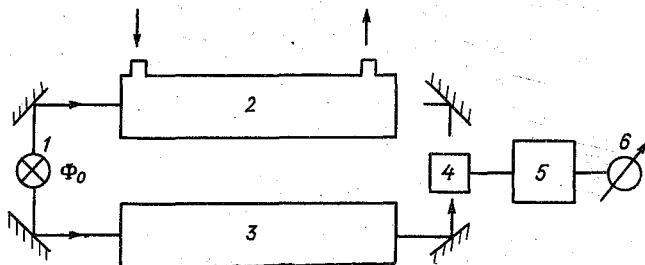


Рис. 2. Двухлучевая схема ГА.

Из анализа схемы ГА следует: аддитивная составляющая погрешности δ_0 включает $\delta_{\text{ш}}$, $\Delta \delta_{\text{ИР}}$ и $\delta_{\text{дс}}$; мультипликативная δ_3 включает $\delta_{\text{м}}$ и $\delta_{\text{с}}$; нелинейная $\delta_{\text{н}}$ включает $1/2$, $\delta_{\text{м}}$ и $\delta_{\text{с}}$; нелинейная $\delta_{\text{нн}}$ включает $1/6$, $\delta_{\text{м}}$ и $\delta_{\text{с}}$ [4].

Имеющиеся исходные данные позволяют вычислить [2] с учетом предполагаемого года разработки I стоимостные затраты Z (руб.) на создание прибора с заданными техническими характеристиками:

$$Z = 77545 e^{-0,019(T-1970)} c^{-0,35} \delta^{-0,54} t^{-0,39} t_c^{+0,03} \theta^{+0,44}, \quad (9)$$

где e - диапазон измерения, $\text{мг}/\text{м}^3$; δ - общая погрешность, %; t - время установления показаний, с; t_c - стабильность, ч; θ - температурный диапазон, $^{\circ}\text{C}$.

Решая задачу создания газоанализатора окиси углерода для контроля транспортных выбросов с $\delta = 5\%$; $c = 10\%$; $t = 10$ с; $t_c = 0,5$ ч и $\theta = 30^{\circ}\text{C}$, получим, что стоимость прибора в соответствии с выражением (9) не должна превышать 1800 руб. Исключая из этого значения стоимость пробоподготовки, материалов и затрат на изготовление, было получено, что суммарная стоимость варьируемых параметров y_i не может превышать 600 руб.

Полагая $\bar{\delta}_0 = \delta_{\Delta\tau} = 0,5\%$, $\bar{\delta}_s = \delta_{\tau} = 1\%$ и время запаздывания в газовом тракте $t_0 = 5$ с, а также учитывая граничные условия, представленные в табл. 1, был произведен расчет оптимального выбора комплектующих элементов и параметров оптического тракта. Выборочно результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Излучатель	Фотоприемник	Фильтрующий элемент	Наличие термо- и баростабилизации	$S_{\text{ш}}\%$	$E_{\text{макс}}$ Зит/с	$\chi_{\text{онт}}$	$t_{\text{э}}$ с	Z руб.
ТРИ-1500	СФ4-13	дисперсионный	-	I	0,707	0,6	0,2	523
ТРИ-1500	БП1-2	интерференционный газовый	-	I	0,686	0,8	0,3	537
ТРИ-1500	БП1-2	то же	-	I,5	0,682	0,8	0,3	492
ТРИ-1500	БП1-2	интерференционный	-	I,0	0,678	0,8	0,3	453
ТРИ-1500	БП1-2	то же	-	I,5	0,677	0,8	0,3	408
ОА2109	БП1-2	дисперсионный	+	I,0	0,640	0,8	0,3	492
ТРИ-1500	МГ-30	интерференционный газовый	-	I,5	0,623	I,0	0,5	597
ИК4-1,2	БП1-2	решетка	-	I,5	0,527	I,2	0,6	595
ТРИ-1500	СФ4-3	интерференционный газовый	+	I,0	0,436	I,0	0,4	519
ОА2109	СФ4-3	то же	-	I,0	0,413	I,0	0,5	564
ИК4-1,2	МГ-30	"	-	I,5	0,390	I,4	I,0	584
ИК4-1,2	СФ4-3	решетка	-	I,5	0,285	I,4	I,0	577

Простота вычислений и наглядность позволяют быстро определить наилучшие соотношения отдельных узлов ГА при заданных ограничениях на варьируемые параметры и затраты. Анализ результатов вычислений показывает, что максимальная скорость получения информации $E_{\text{макс}}$ не менее 0,68. Это соответствует инструментальной погрешности ГА 3%, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к газоанализаторам окиси углерода для контроля транспортных выбросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю. Исследование статистических методов для обработки данных наблюдений за загрязнением воздуха. - Труды ГГО, 1969, вып. 238, с. 42-47.

2. Казанцев Ю. А., Красов В. И., Конопелько Л. А., Цветков В. А. К вопросу формирования показателя эффективности абсорбционных газоанализаторов. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 66 - 70.

3. Цветков В. А. Информационный критерий сравнения абсорбционных газоанализаторов. - Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 59-66.

4. Цветков В. А. Структурные методы повышения избирательности абсорбционных газоанализаторов. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 71-78.

5. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: Энергия, 1974, 376 с.

К.В.Иванченко, Е.А.Королева, Н.С.Покровская

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Обширная номенклатура вредных веществ, поступающих в атмосферу, определяет актуальность задачи многокомпонентного анализа при контроле загрязнения атмосферы. Одним из перспективных методов газового контроля является спектральный метод, основанный на способности газов поглощать излучение оптического диапазона на характерных аналитических длинах волн. Основным достоинством этого метода является относительная простота аппаратной реализации, непрерывность измерений и высокое быстродействие.

Большинство газов имеет ярко выраженные линии поглощения в среднем инфракрасном диапазоне (2,5 - 25 мкм), отличающиеся друг от друга интенсивностью и положением максимумов. Спектры поглощения большинства газов зачастую перекрываются между собой и со спектрами поглощения паров воды и углекислого газа [1, 2],

поэтому при анализе воздушной смеси выбор аналитических линий в средней ИК области спектра достаточно сложен. Так, авторы статьи [7] при анализе воздушной смеси, состоящей из CO , CO_2 , N_2O , CH_4 и O_3 с концентрациями, характерными для условий города, при относительной влажности 30 % из всех линий спектра в диапазоне от 4 до 20 мкм выбрали всего по 4-7 линий, пригодных для надежного определения каждого из вышеприведенных газов. В связи с тем, что выделение тонкой структуры спектра сопряжено со значительными техническими трудностями, измерения проводятся в некотором спектральном интервале, содержащем несколько различных линий поглощения, причем контроль многокомпонентной смеси сводится к анализу спектра, состоящего из перекрывающихся полос поглощения. Обработка перекрывающихся спектров и вычисление концентраций определяемых компонентов возможны с использованием аппарата линейной алгебры [4].

Известно, что оптическое пропускание многокомпонентной смеси T_λ на данной длине волны λ связано с концентрацией компонентов газовой смеси C_i и их коэффициентами поглощения K_i следующим соотношением:

$$T_\lambda = e^{-k_1 c_1} \cdot e^{-k_2 c_2} \dots e^{-k_i c_i} \dots e^{-k_n c_n}, \quad (1)$$

$$D_\lambda = \ln \frac{1}{T_\lambda} = k_1 c_1 + k_2 c_2 + \dots + k_i c_i + \dots + k_n c_n, \quad (2)$$

где D_λ - оптическая плотность газовой смеси на длине волны λ .

Каждому из компонентов смеси соответствует своя аналитическая длина волны λ_i , на которой коэффициент поглощения $K_i = \max$.

Поглощение оптического излучения многокомпонентной газовой смесью на выбранных аналитических длинах волн описывается следующей системой уравнений, связывающих оптические плотности на аналитических длинах волн D_{λ_i} с концентрациями компонентов смеси C_i через коэффициенты поглощения K_{ij} :

$$\left. \begin{aligned} D_{\lambda_1} &= k_{11} c_1 + k_{12} c_2 + \dots + k_{1i} c_i + \dots + k_{1n} c_n, \\ D_{\lambda_2} &= k_{21} c_1 + k_{22} c_2 + \dots + k_{2i} c_i + \dots + k_{2n} c_n, \\ D_{\lambda_i} &= k_{i1} c_1 + k_{i2} c_2 + \dots + k_{ii} c_i + \dots + k_{in} c_n, \\ D_{\lambda_n} &= k_{n1} c_1 + k_{n2} c_2 + \dots + k_{ni} c_i + \dots + k_{nn} c_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} D_{\lambda_1} \\ D_{\lambda_2} \\ \dots \\ D_{\lambda_i} \\ \dots \\ D_{\lambda_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1i} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2i} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ii} & \dots & k_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{ni} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_i \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

По матрицам $[c_i]$ и $[D_{\lambda_i}]$, полученным в процессе градуировки, можно определить обратную матрицу $[k_{ij}]^{-1}$, связывающую измеряемую при анализе газовой смеси оптическую плотность на аналитических длинах волн с неизвестными концентрациями компонентов газовой смеси.

Для смеси, состоящей из большого числа компонентов, необходимые матричные преобразования целесообразно проводить с помощью электронно-вычислительной техники. Возможность проведения анализа по вышеприведенному алгоритму определяется погрешностью аттестации градуировочных смесей, величинами диагональных элементов матрицы $[k_{ij}]^{-1}$, являющихся коэффициентами поглощения компонентов смеси на соответствующих длинах волн, и их соотношением с величинами недиагональных элементов, характеризующих степень перекрывания спектров в диапазонах измерений и разрешением спектрального прибора.

При обработке нелинейных градуировочных характеристик, получающихся при неполном разрешении структуры спектра поглощения, также можно применять линейную аппроксимацию, однако это вносит дополнительную погрешность.

Таким образом, возможности многокомпонентного спектрального анализатора зависят от интенсивности аналитических полос, степени их перекрытия при данных концентрациях, разрешающей способности прибора и объема памяти используемой ЭВМ.

Нами были проведены исследования метрологических характеристик газоанализатора "Миран-80", наиболее совершенного из существующих газоанализаторов этого класса [5].

Прибор снабжен термостабилизированной многоходовой кюветой (максимальная величина оптического хода луча $\Delta = 20,75$ м), круговым вращающимся интерференционным фильтром, плавно изменяющим по заданной программе аналитическую длину волны в диапазоне 2,5 - 14,5 мкм (с разрешением 0,05, 25 мкм), и встроенным микропроцессором.

Обработка перекрывающихся спектров и вычисление концентраций определяемых компонентов осуществляются микропроцессором на основе данных градуировки, предварительно рассчитанных на ЭВМ [4]. Реализованная в приборе программа обчета градуировочных кривых была нами приспособлена к проведению вычислений на БЭСМ-6.

Градуировка газоанализатора "Миран-80" проводится в несколько этапов и является довольно трудоемким процессом. Вначале производится запись спектра поглощения анализируемой смеси и предварительная идентификация пиков поглощения по атласу спектров газов, затем проверяются предположения о составе смеси путем записи спектров отдельных компонентов. После уточнения состава смеси на основе детализации структуры спектра производится выбор аналитических и сравнительной длин волн. Собственно градуировка может проводиться как по чистым газам, так и по их смесям, приготовляемым в баллонах под давлением или непосредственно в кювете прибора при прокачивании пробы по замкнутому циклу. Число газовых смесей при аппроксимации градуировочной кривой линией, проходящей через начало координат, должно быть равно числу компонентов смеси для обеспечения замкнутости системы уравнений (3). Время установления показаний для каждой смеси равно времени прокачки через прибор 3-5 объемов кюветы и составляет 15-30 мин при скорости прокачки 1 л/мин (объем кюветы равен 5,6 л). Столько же времени необходимо для установления нулевых показаний при прокачке через кювету нулевого газа (азота). Следовательно, градуировка прибора по II-компонентной смеси занимает около 24 ч и требует около 240 л смеси.

В связи с тем, что в газоанализаторах типа "Миран-80" установка нуля производится вручную путем прокачки нуль-газа, корректировка дрейфа нуля может быть осуществлена с периодом 40 - 60 мин (время установления нуля плюс время установления показаний на пробе). Часовой дрейф нуля, следовательно, является реальным порогом чувствительности газоанализатора.

Порог чувствительности прибора по отдельным газам является функцией параметров кюветы, фильтра, источника и приемника излучения [3]. Эти зависимости остаются справедливыми для любых схем многокомпонентных спектральных газоанализаторов. Из результатов сравнения пороговых значений концентраций вредных веществ, определяемых "Миран-80", со значениями действующих в СССР, следует, что прибор не позволяет с требуемой точностью определять концентрации основных загрязняющих газов за исключением окиси углерода (СО). По данным наших измерений случайная составляющая погрешности газоанализатора при анализе СО в N_2 на длине волны 4,6 мкм и ($L =$

= 20,75 м) составляет $\pm 0,1$ млн⁻¹ при дрейфе нуля 0,25 млн⁻¹ в час. Присутствие CO₂ и паров воды существенно усложняет задачу из-за перекрывания спектров поглощения CO, CO₂ и H₂O. Влияние влажности можно исключить только путем применения осушающих фильтров, устанавливаемых на входе прибора, так как методика градуировки этого газоанализатора по водному пару не разработана. Нами была сделана попытка аналитически исключить влияние CO₂ на показания прибора при определении CO.

В качестве аналитической для CO₂ была выбрана полоса поглощения вблизи длины волны 9,6 мкм при $\Delta = 20,75$ м. Параметры полученных градуировочных зависимостей для одновременного определения концентрации CO и CO₂ приведены ниже (газовые смеси приготавливались в азоте по объемному методу с помощью дозирующих шприцев):

Газовая смесь	$D(\lambda = 4,6 \text{ мкм})$	$D(\lambda = 9,6 \text{ мкм})$
4,4 млн ⁻¹ CO + 886,5 млн ⁻¹ CO ₂	$7I \cdot 10^{-4}$	$II \cdot 10^{-4}$
22,2 млн ⁻¹ CO + 3546,1 млн ⁻¹ CO ₂	$2II \cdot 10^{-4}$	$25 \cdot 10^{-4}$
57,6 млн ⁻¹ CO + 7092,2 млн ⁻¹ CO ₂	$400 \cdot 10^{-4}$	$42 \cdot 10^{-4}$

Несоизмеримость оптических плотностей на аналитических длинах волн и концентраций CO и CO₂ привела к обкулению диагональных элементов обрабатываемой матрицы и вызвала блокировку типовой программы расчета градуировочных характеристик. Проведение расчетов по другому алгоритму обращения матрицы также не помогло решению задачи, так как разномасштабность полученных элементов обратной матрицы превысила аналитические возможности микропроцессора газоанализатора.

Другим препятствием для проведения анализа CO в присутствии CO₂ является наличие заметной "цветной памяти" по CO₂, приводящей к дрейфу показаний в пределах 70-90 млн⁻¹/ч на уровне 500 млн⁻¹ CO₂ при закрытой кювете, так и в режиме прокачки смеси по замкнутому контуру.

Таким образом, использование многокомпонентных спектральных фильтровых газоанализаторов для задач контроля чистоты атмосферного воздуха нецелесообразно. Приборы этого класса могут найти применение при контроле качества воздуха производственных помещений и при анализе промышленных выбросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. - 362 с.
2. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. - 394 с.
3. Гоженко Н. А. и др. Аналитические возможности и области применения оптических анализаторов с интерференционными фильтрами. - В кн.: Сборник научн. трудов ВНИИАП. Оптические и электро-оптические методы и приборы анализа состава веществ. Киев, 1977, с. 7-19.
4. Тхоржевский В. П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. - М.: Химия, 1976, с. 126-169.
5. Цветков В. А., Красов В. И., Королева Е. А. Состояние и тенденции развития спектральных газоанализаторов контроля загрязнения атмосферы. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 54-65.
6. Golden B.M., Jeung E.S. Analytical liens for long-path infrared absorption spectrometry of air pollutants. - Anal. Chem., 1975, vol.47, N 13, pp,2132-2135.

В.А. Цветков, К.В.Иванченко

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ЭМИССИОННЫХ ГАЗОВ

В настоящее время выпускается и разрабатывается ряд спектральных газоанализаторов (ГА) эмиссионных газов с близкими техническими характеристиками, однако существующая система нормирования метрологических характеристик газоанализаторов [4] не позволяет в полной мере оценить их достоинства и недостатки, выбрать наиболее перспективную для контроля промышленных и транспортных выбросов модель и выработать рекомендации по улучшению ее параметров.

Такое положение обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований метрологических характеристик газоанализаторов на основе теоретического анализа и экспериментального определения составляющих погрешности.

Были исследованы характеристики следующих спектральных газоанализаторов, предназначенных для контроля промышленных или транспортных выбросов:

- оптико-термического ГАИ-1 (ПО "Аналитприбор" г. Смоленск);
- фильтрового Смог-2 (Институт физики АН БССР);
- СО-тестер (Институт физики АН БССР);
- ИНГА (ГГО);
- инспекционного (макет Томского политехнического института).

Газоанализатор ГАИ-1 предназначен для определения окиси углерода в отработанных газах карбюраторных автомобильных двигателей. Диапазон измерения концентрации окиси углерода 0 - 5 и 0 - 10 %, основная приведенная погрешность не превышает 5 % от верхнего предела измерения. Изменение показаний газоанализатора по паспорту не превышает 2,5 % от верхнего предела измерения в течение 0,5 ч. В газоанализаторе использована разностная двухлучевая схема (рис. 1).

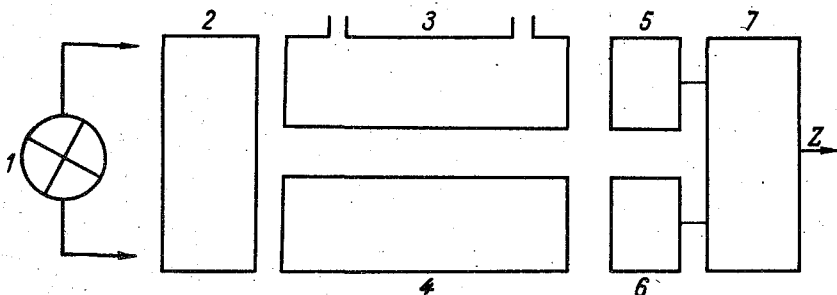


Рис. 1. Схема газоанализатора ГАИ-1.

1 - излучатель, 2 - фильтровая кювета, 3 - рабочая кювета, 4 - сравнительная кювета, 5 - фотоприемник рабочего канала, 6 - фотоприемник сравнительного канала, 7 - устройство обработки сигнала.

В соответствии со схемой выходной сигнал Z равен

$$Z = \varphi_0 \cdot \tau_{\text{фр}} [\tau_{\text{фр}} \cdot K_{\text{фнр}} - \tau_{\text{р}} \cdot K_{\text{фнр}} (1-A)] \cdot K, \quad (I)$$

где φ_0 - поток, создаваемый излучателем, $\tau_{\text{фр}}$, $\tau_{\text{ср}}$, $\tau_{\text{р}}$ - коэффициент пропускания фильтровой, сравнительной и рабочей кювет соответственно, A - поглощение, обусловленное измеряемым компонентом, K , $K_{\text{фнр}}$, $K_{\text{фнр}}$ - коэффициент передачи устройства обработки сигнала и чувствительность фотоприемников соответственно.

Так как в газоанализаторе перед измерением предусмотрены установка нуля выходного сигнала и калибровка, то в первом приближении можно считать, что $\tau_{cp} \approx \tau_p \approx \tau$ и $K_{приер} \approx K_{прир} \approx K_{пр}$ тогда выражение (1) упрощается и примет вид

$$Z \approx \varphi_0 \cdot \tau_{cp} \cdot \tau \cdot A \cdot K_{cp} \cdot K \quad (2)$$

Инструментальная погрешность газоанализатора в соответствии с (2) примет вид:

$$\Delta Z = \varphi_0 \cdot \tau_{cp} \cdot \tau \cdot K_{cp} \cdot K (\delta_{ш} + \delta_{\Delta\tau} + \delta_{\Delta cp} + \delta_{\Delta cp}) + \\ + \varphi_0 \cdot \tau_{cp} \cdot \tau \cdot K_{cp} \cdot K (\delta_{\varphi_0} + \delta_{\tau_{cp}} + \delta_{K_{cp}} + \delta_K + \delta_{\tau}) \cdot A, \quad (3)$$

где $\delta_{ш}$ - относительная случайная составляющая погрешности, обусловленная шумами фотоприемника и излучателя; $\delta_{\Delta\tau}$ - относительное изменение коэффициентов пропускания кювет, вызванное взаимным уходом их параметров; $\delta_{\Delta cp}$ - относительное изменение чувствительности фотоприемников; δ_{φ_0} , $\delta_{\tau_{cp}}$, $\delta_{K_{cp}}$, δ_K , δ_{τ} - относительное изменение параметров излучателя, фильтровой кюветы, фотоприемника, устройства обработки сигнала и кювет соответственно; $\delta_{\Delta\tau}$ - относительное изменение сигнала за счет перераспределения потоков в каналах.

Анализ выражения (3) позволяет выделить две основные составляющие: аддитивную и мультипликативную, зависящую от поглощения A , которое в первом приближении пропорционально измеряемой концентрации окиси углерода.

Аддитивная составляющая погрешности (кроме $\delta_{ш}$) определяет дрейф нуля между калибровками, а мультипликативная - изменение чувствительности газоанализатора. Случайная составляющая погрешности

$$\Delta Z_{ш} = \varphi_0 \cdot \tau_{cp} \cdot \tau \cdot A \cdot K_{cp} \cdot K \quad (4)$$

определяет пороговую чувствительность, которая в основном зависит от соотношения шумов, приведенных ко входу фотоприемника $\varphi_{ш}$ и потока, создаваемого излучателем φ_0 , т.е.

$$\delta_{ш} = \frac{\varphi_{ш}}{\varphi_0 \cdot \tau \cdot \tau_{cp}} \quad (5)$$

Другие газоанализаторы, для которых проводились сравнительные испытания, также построены по двухлучевой схеме с интерференционным (комбинированным) фильтром и твердотельным фотоприемником типа МГ-30. Схемы этих газоанализаторов даны на рис. 2.

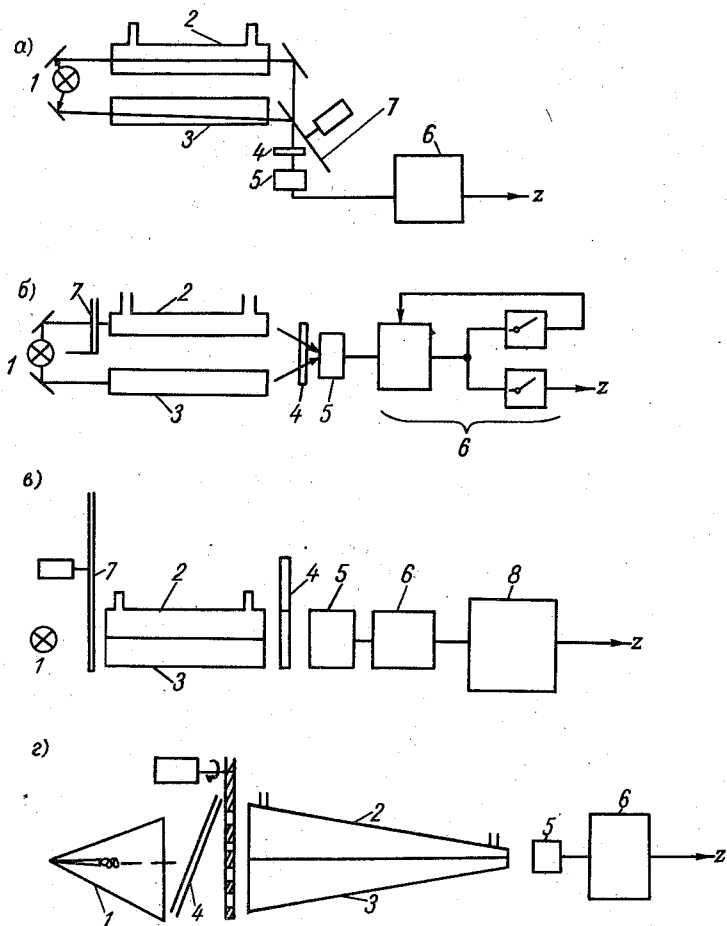


Рис.2. Схемы спектральных газоанализаторов: Смог - 2 (а),
 СО - тестер (б), ИНГА (в), инспекционный (г).

1 - излучатель, 2 - рабочая кювета, 3 - сравнительная
 кювета, 4 - фильтр, 5 - фотоприемник, 6 - устройство
 обработки сигнала, 7 - модулятор, 8 - линейризатор.

Остановимся коротко на анализе погрешностей этих газоанализаторов. Смог-2 отличается от ГАИ-1 тем, что содержит один фотоприемник ($\delta_{\text{фрп}} = 0$) и зеркальный модулятор, что добавляет в выражение (3) слагаемое δ_M - погрешность модулятора. В ОО-тестере с помощью автоматической регулировки усиления (АРУ) поддерживается заданный уровень сигнала, прошедшего через сравнительную квету, за счет чего в выражении (3) отсутствуют такие составляющие погрешности, как δ_K , $\delta_{\text{кфп}}$, $\delta_{\text{фр}}$, δ_{τ} , но появляется погрешность АРУ - $\delta_{\text{АРУ}}$.

Газоанализатор ИНГА содержит дополнительное нелинейное устройство (линеаризатор), с помощью которого определяется отношение рабочего сигнала Z_x к разности между сравнительным и рабочим сигналами ($Z_0 - \frac{1}{2} Z_x$), т.е.

$$Z = \frac{Z_x}{Z_0 - \frac{1}{2} Z_x} \quad (6)$$

Такое преобразование позволяет повысить линейность выходной статической характеристики [3] без существенного усложнения конструкции. Однако наличие этого устройства увеличивает другие составляющие погрешности за счет нелинейного преобразования. Так, погрешность, вызванная шумами $\delta_{\text{ш}}$, приведенными ко входу фотоприемника, равна

$$\Delta Z = \delta_{\text{ш}} \frac{1}{1 - \frac{A}{2}} + \delta_{\text{ш}} \frac{\frac{1}{2} A}{\left(1 - \frac{A}{2}\right)^2} \approx \delta_{\text{ш}} + \delta_{\text{ш}} A + \frac{3}{4} \delta_{\text{ш}} A^2 \quad (7)$$

Аналогично для газоанализатора ИНГА появляются нелинейные составляющие, пропорциональные поглощению A , A^2 и т.д. Для уменьшения погрешности, вызванной взаимным уходом пропусканий квет $\delta_{\Delta\tau}$, кветы выполнены в виде двух полуцилиндров, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Для контроля и регулировки смещения нуля во время измерений в газоанализаторе ИНГА предусмотрен дополнительный эталонный фильтр, пропускающий излучение вне полосы поглощения анализируемым компонентом. Этот фильтр периодически устанавливается перед фотоприемником вместо рабочего.

Инспекционный газоанализатор, в отличие от выше рассмотренных, содержит наклонный фильтр, в результате чего лучи, прошедшие через него под разными углами, имеют различный спектральный состав, так как спектральная характеристика фильтра зависит от угла падения потока на его поверхность. Выбирая угол наклона

фильтра и центральную частоту пропускания фильтра, можно измерять поглощение исследуемого газа в центре полосы поглощения и на его склоне; это позволит существенно повысить избирательность газового анализа. Однако измерения, проведенные на склоне полосы поглощения исследуемого компонента, приводят к существенному уменьшению поглощения до значения A^* , а следовательно к увеличению всех составляющих погрешностей в отношении A/A^* . Кроме того, в газоанализаторах такого типа существенный вклад в общую погрешность вносят изменения спектральных характеристик всех элементов оптического тракта и в первую очередь наклонного фильтра.

В табл. I приведены основные составляющие погрешности рассмотренных газоанализаторов.

Таблица I

Газоанализатор	Составляющие погрешности	
	Аддитивные ($\frac{\Delta Z_{ад}}{Z} A$)	Мультипликативные ($\frac{\Delta Z_{мулт.}}{Z}$)
ГАИ-1	$\delta_{ш}; \delta_{\Delta\tau}; \delta_{\Delta\varphi}; \delta_{\varphi n}$	$\delta_{\rho_0}; \delta_{\tau_{\varphi}}; \delta_{k_{\text{крп}}}; \delta_{k}; \delta_{\tau}$
СМОГ-2	$\delta_{ш}; \delta_{\Delta\tau}; \delta_m; \delta_{\Delta\varphi}$	$\delta_{\rho_0}; \delta_{\tau_{\varphi}}; \delta_{k_{\text{крп}}}; \delta_{k}; \delta_{\tau}$
СО-тестер	$\delta_{ш}; \delta_{\Delta\tau}; \delta_{\Delta\varphi}$	δ_{APY}
ИНГА	$\delta_{ш}; \delta_{\Delta\tau}; \delta_{\Delta\varphi}$	$\delta_{ш}; \delta_{\Delta\tau}; \delta_{\rho_0}; \delta_{\tau_{\varphi}}; \delta_{k_{\text{крп}}}; \delta_{k}; \delta_{\tau}$
Инспекционный	$\delta_{ш} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{\Delta\tau} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{\Delta\varphi} \cdot \frac{A}{A^*}$	$\delta_{\rho_0} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{\tau_{\varphi}} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{k_{\text{крп}}} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{k} \cdot \frac{A}{A^*}; \delta_{\tau} \cdot \frac{A}{A^*}$

Анализ составляющих погрешности позволяет сравнивать различные по структуре газоанализаторы при известных значениях этих составляющих. Однако в силу того, что они имеют различную элементную базу, такой анализ представляется недостаточным и требует проведения дополнительных экспериментов. Сочетание экспериментальных данных о суммарной погрешности газоанализатора с анализом вклада погрешности отдельных узлов и элементов позволяет выбрать наилучшие варианты построения и наметить пути их совершенствования.

Таблица 2

Газовый- затвор	Конеч- шкалы		Число серий опытов	Объем выборки n	Случайная составля- ющая погрешности $\Delta_{сл}$ мВ	Погрешность дрейфа $\Delta_{др}$ мВ/д	$\delta_{сл}$ %	$\delta_{др}$ %/д	Пороговая чув- ствительность $\Delta_{порог}$ %	Погрешность нелинейно- сти $\Delta_{лик}$ мВ	δ лин. %	Δ мм
	U_k	E_k %										
ГАМ-1	875	5	2	480	9,1	20,9	1,04	2,4	$5 \cdot 10^{-2}$	-	4,6	0,9
ИПА	1000	10	2	284	1,76	18	0,18	1	$1,8 \cdot 10^{-2}$	75	7,5	100
СМОГ-2	30	5	4	480	0,09	0,15	0,3	0,5	$1,5 \cdot 10^{-2}$	12,5	41,7	300
СО-тес- тер	94	15	4	480	4,2	8,4	4,47	9,0	$22,4 \cdot 10^{-2}$	11	11,7	70
Инспек- ционный	38,4	1,29	2	480	0,83	31,5	2,16	82,0	$2,8 \cdot 10^{-2}$	-	-	-

1. Пороговая чувствительность определена в предположении линейности градуировочной характеристики

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований газоанализаторов. Относительно большое значение случайной составляющей погрешности $\delta_{сл}$ в СО-тестере обусловлено низким энергетическим КПД излучателя, что вызвано неудачным конструктивным решением фокусировки потока от излучателя к кюветам. Для инспекционного газоанализатора, как следует из табл. 1, большое значение $\delta_{сл}$ обусловлено тем, что при наклоне фильтра на 10° смещение характеристик составило лишь 0,02 мкм. В газоанализаторе ГАИ-1 достаточно высокий уровень случайной составляющей $\delta_{сл}$ связан с низкой частотой модуляции теплового излучателя.

Пороговая чувствительность (табл. 2) определялась как

$$\Delta_{\text{порог}} = \frac{\delta_{сл} \cdot C}{100} \cdot \tau \quad (8)$$

Высокий дрейф выходного сигнала инспекционного ГА обусловлен работой на склоне полосы поглощения, что ведет к изменению коэффициента передачи оптического блока.

Особый интерес представляет погрешность, вызванная нелинейной зависимостью поглощению от концентрации анализируемого компонента и зависящая от произведения диапазона измеряемой концентрации, коэффициента поглощения и длины кюветы L . Эта составляющая погрешности тем больше, чем больше поглощение A в конце диапазона измерения. Поэтому, чем длиннее кювета при равном диапазоне измерения, тем больше эта составляющая погрешности. В ГА ИНГА $\delta_{лин}$ меньше за счет обработки сигнала в соответствии с (6). Здесь следует сразу отметить, что применение линеаризаторов в схеме обработки позволяет существенно уменьшить погрешность $\delta_{лин}$, но при этом появляются дополнительные составляющие погрешностей, обусловленные применяемым линеаризатором, что необходимо учитывать при разработке ГА.

Теоретический анализ инструментальных погрешностей в сочетании с экспериментальной отработкой ГА на испытательном стенде позволит наиболее правильно оценить параметры ГА и определить перспективность внедрения конкретного прибора для использования на сети Госкомгидромета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

И. Иванченко К. В., Ковынева Е. Н. Определенные точностных характеристик спектрофотометрических газоанализаторов. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 99-106.

2. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М.
Введение в информационную теорию измерений. - М.: Энергия, 1974,
с. 376.

3. Максимов В. И., Цветков В. А. Спектральный газоанализатор эмиссионных газов. + Труды ГГО, 1981, вып. 453,
с. 84-89.

4. Приборы газоаналитические промышленных автоматические непрерывного действия. ГОСТ 13320, - 69. - М.: Изд-во стандартов, 1970, о. 32.

Н. И. Дудкин, Б. Р. Беренцвейг, С. М. Вечтомов, В. Б. Миляев

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННЫХ РАЗБАВИТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИСТОЧНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Для практической реализации Закона об "Охране атмосферного воздуха" необходимы газоаналитические приборы оперативного контроля источников промышленных выбросов. К сожалению, специальные приборы для этих целей серийно не выпускаются. Используемые на сети наблюдений газоаналитические приборы, такие, как "Атмосфера-1", ГКП-1, ЦДС для контроля двуокиси серы, имеют диапазон измерения 0-5 мг/м³, что значительно ниже уровня концентрации от источников выбросов.

Одним из направлений решения этой проблемы может быть применение газоанализаторов контроля загрязнения в сочетании с диффузионными разбавителями на полимерных материалах.

В основе метода измерения лежит разбавление газовой смеси путем диффузии контролируемого газового компонента через полимерный материал в поток инертного газа-носителя, проходящего через диффузионный элемент и поступающего на газоанализатор.

Процесс диффузионного переноса газа через полимер основывается на процессах сорбции газовой фазы в полимере, диффузии газа внутри полимера и десорбции газовой фазы из полимера.

Процессы сорбции и десорбции газовой фазы подчиняются закону Генри [1]:

$$c = \beta p, \quad (I)$$

где c - равновесная концентрация веществ, растворенных в полимере, p - парциальное давление проникающих веществ, S - коэффициент растворимости.

Диффузия газа через полимер описывается законами Фика [1]: для одномерного случая

$$F = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Уравнение (2) характеризует скорость проникания газа через единицу поверхности в стационарном состоянии. Уравнение (3) отражает накопление вещества в определенной точке полимера как функцию времени, т.е. относится к нестандартному состоянию. В этих уравнениях:

F - диффузионный поток (количество вещества, проходящее в единицу времени через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению движения потока); D - коэффициент диффузии.

Для случая одномерной стационарной диффузии газа через плоскую мембрану толщиной h с некоторыми допущениями справедливо уравнение:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

При граничных условиях:

$$c = c_1, \text{ если } x = 0; \quad c = c_2, \text{ если } x = h, \quad (5)$$

решение уравнения (4) имеет вид:

$$c = \frac{c_2 - c_1}{h} x + c_1. \quad (6)$$

Из (6), используя (2), можно получить уравнение для диффузионного потока:

$$F = D \frac{c_1 - c_2}{h}. \quad (7)$$

Учитывая то, что при установившемся потоке концентрация газа в полимере может быть выражена через парциальные давления на границе "газ - полимер", запишем:

$$F = D \frac{c_1 - c_2}{h} S. \quad (8)$$

Произведение D_S называется константой проницаемости P_r . В случае диффузии газа через стенку цилиндрической трубки, выражая уравнения (3) и (4) в цилиндрических координатах, можно получить аналогичное соотношение:

$$F = D_S \frac{2\pi(P_1 - P_2)}{\ln d_1/d_2}, \quad (9)$$

где d_1, d_2 - внешний и внутренний диаметры трубки.

Главным допущением при решении исходных задач было условие бесконечной протяженности мембраны и бесконечной длины трубки. Выбор оптимальных параметров трубки позволит значительно уменьшить влияние трудно учитываемых концевых эффектов. Исходя из этого, можно утверждать, что математическая модель массопереноса через трубку, описываемая выражением (9), более точна.

Реальную миграцию молекул вещества, проникавшего через полимер, можно представить в виде последовательных единичных перемещений под влиянием градиента концентраций и действия комплекса окружающих молекул [2]. За время этих перемещений молекулы преодолевают некоторый потенциальный барьер высотой ΔE , разделяющий положения равновесия. Такая модель рассматривает диффузию в непористых полимерах как активационный процесс, с энергией активации - ΔE .

Зависимость коэффициента диффузии от изменения температуры в этом случае определяется как

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/RT). \quad (10)$$

Энергия активации (ΔE) связана с работой, требуемой для образования дырки нужных размеров для перемещения молекулы газа при наличии когезионных сил полимерной среды и энергией, необходимой для преодоления молекулой межмолекулярного взаимодействия с окружающей средой. Активированное состояние полимерной среды представляют в виде двух полимерных цепей [3], раздвинутых на расстояние, достаточное для прохождения молекулы. Энергия, идущая на это, складывается из энергии отталкивания полимерных цепей от их соседей при образовании дырки и энергии сопротивления молекулярных цепей изменению формы (изгибанию молекулы). Изменение формы макромолекул обусловлено поворотом сегментов цепей от их равновесного положения. Известно, что зависимость коэффициента растворимости газов в полимерах от температуры можно установить на основании следующего соотношения [1]:

$$S = S_0 \exp(-\Delta H / RT), \quad (II)$$

где S_0 - постоянная, ΔH - теплота растворения газа в полимере.

Процесс растворения газа в полимере условно разделяют на две стадии [5]: конденсация на полимере и растворение конденсированного газа в полимере. Считают, что ΔH представляет собой сумму мольной теплоты конденсации ΔH_K и парциальной теплоты смещения ΔH_P ($\Delta H = -\Delta H_K + \Delta H_P$). Для газов He, H₂, O₂, N₂ при температурах выше критической, значение ΔH определяется в первую очередь величиной ΔH_P ; их растворимость увеличивается с повышением температуры. Для легко конденсирующихся газов, таких как CO₂, N₂, SO₂, концентрации которых в дымовых выбросах необходимо знать, значение ΔH определяется величиной ΔH_K ; вследствие этого их растворимость в полимерах уменьшается с повышением температуры.

В общем случае проницаемость полимера описывается следующим соотношением [1]:

$$P_N = P_0 \cdot \exp(-E / RT), \quad (12)$$

где E - энергия активации проникания равна сумме энергии активации процесса диффузии ΔE и теплоты растворения ΔH ; $R = 1,987$ кал/моль⁻¹ · К⁻¹; T - температура, К; P_0 - постоянная, зависящая прежде всего от материала.

В связи с тем, что теплота растворения газов в полимерах невелика, можно считать, что в основном зависимость проницаемости от температуры определяется характером изменения коэффициента диффузии с изменением температуры [2]. Исследования зависимости проницаемости полимеров от давления [1] показали, что для давлений порядка 1 атм. константа проницаемости P_N не зависит от разности парциальных давлений ΔP .

Однако перепад давления по обе стороны диффузионного барьера может вызвать его деформацию и исказить поток анализируемого газа сквозь полимер, по сравнению с исходной моделью (8) или (9). В этом смысле предпочтительнее использовать в качестве диффузионного барьера полимерную трубку с небольшим избыточным давлением со стороны инертного газа-разбавителя. Целесообразно также использование различных устройств для стабилизации перепада давления, в том числе простейших типа "сопло-мембрана" [3].

Из выражений (8), (9) и (12) следует, что поток газа, диффундирующего через полимер, зависит от конфигурации диффузионного элемента, его размеров, материала диффузионного барьера, разности парциальных давлений и температуры.

Очевидно, что если поток проникающего вещества на внутренней стенке диффузионного элемента сдвигать потоком инертного газа с массовым расходом Q , то легко обеспечить концентрацию анализируемого компонента значительно меньше исходной, т.е. $P_1 \gg P_2$. В этом случае поток вещества будет пропорционален исходной концентрации или парциальному давлению диффундирующего вещества P_1 .

Для мембраны

$$F_M = P_N \frac{P_1}{h} ;$$

для трубки

$$F_T = P_N \frac{2\pi P_1}{l_n d_1/d_2}$$

(13)

При диффузии газа через полимер концентрация вещества в потоке инертного газа определяется из следующих уравнений:

$$F_M A = CQ \quad \text{— для мембраны,}$$

$$F_T L = CQ \quad \text{— для трубки,}$$

(14)

где A — площадь мембраны, см^2 ; L — длина трубки, см ; Q — расход инертного газа, $\text{см}^3/\text{с}$; C — концентрация анализируемого вещества в инертном газе, $\text{мг}/\text{см}^3$.

В результате несложных преобразований соотношений (13) и (14), с учетом (12) можно получить выражения для коэффициентов разбавления:

$$K_M = \frac{P_1}{P_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{Q}{P_0 A} \frac{h}{P_{\text{вых}}} \exp(E/RT) \quad \text{— для мембраны,}$$

(15)

$$K_T = \frac{Q}{2\pi P_0 L} \frac{l_n d_1/d_2}{P_{\text{вых}}} \exp(E/RT) \quad \text{— для трубки,}$$

где $P_{\text{вых}}$ — выходное давление инертного газа-разбавителя.

Из выражения (15) следует, что стабильность коэффициента разбавления диффузионного разбавителя определяется стабильностью свойств материала во времени, расхода Q , давления $P_{\text{вых}}$ и температуры T на заданном уровне.

Практическое использование предлагаемого метода контроля промышленных выбросов требует либо стабилизации температуры диффузионного элемента с погрешностью не более $\pm 1^\circ\text{C}$, что приводит к неточности разбавления 2% при температурах 150 — 190°C (см.

табл. I), либо введения коррекции на изменение температуры.

Выходная концентрация диффузионного элемента связана с исходной концентрацией газовой смеси следующей зависимостью:

$$C_2 = C_1 K^{-1}(Q, T, P_{\text{вых}}) \quad (I6)$$

Функциональная связь между входной и выходной концентрациями измеряемого компонента газовой смеси в диффузионном элементе, описываемая уравнением (I6), дает возможность создания газоаналитических систем контроля концентраций в дымовых газах на базе газоанализаторов на микроконцентрации.

В общем случае показания газоанализатора - Π описываются выражением:

$$\Pi = k_{\pi} C_2 = k_{\pi} K^{-1}(Q, T, P_{\text{вых}}) C_1 \quad (I7)$$

где k_{π} - коэффициент пропорциональности.

С помощью газоаналитических приборов, основанных на принципе химической абсорбции, определяют массу вещества - Π в единицу времени, принесенную газовым потоком Q с концентрацией C , т.е.

$$\Pi = k_{\pi} Q C_2 = k_{\pi} K^{-1}(Q, T, P_{\text{вых}}) Q C_1 \quad (I8)$$

В соответствии с (I5) показания газоанализатора в этом случае не зависят от расхода газовой смеси (Q) и определяются соотношениями:

$$\Pi = k_{\pi} \left[\frac{h}{P_0 A P_{\text{вых}}} \right]^{-1} \exp(-E/RT) C_1 \quad (\text{для мембраны}); \quad (I9)$$

$$\Pi = k_{\pi} \left[\frac{k_n d_1 / d_2}{2\pi P_0 l P_{\text{вых}}} \right]^{-1} \exp(-E/RT) C_1 \quad (\text{для трубки}).$$

Результаты исследования газопроницаемости различных диффузионных элементов по SO_2 при варьировании расхода, температуры газовой смеси и материала диффузионного барьера сведены в таблицу. Значение коэффициента k_c рассчитывали по формуле:

$$k_c = C_1 / C_2.$$

Таблица
 Результаты исследования проницаемости
 полимерных материалов

Материал	Температура, °C	Проницаемость, $P_T \cdot 10^{10}$	Коэффициент разбавления, $K_p \cdot 10^{-4}$		
			$Q = 40 \text{ см}^3/\text{с}$	$Q = 10 \text{ см}^3/\text{с}$	$Q = 10 \text{ см}^3/\text{с}$
Трубка Ф4МБ $\ln \frac{d_1}{d_2} = 0,094$, $L = 10 \text{ см}$	65	16,2	49,24	24,62	12,31
	85	29,1	27,40	13,70	6,85
	120	54,1	14,76	7,38	3,69
	150	92,8	8,60	4,30	2,15
	175	164	4,88	2,44	1,22
	203	228	3,50	1,75	0,875
	235	432	1,848	0,924	0,462
Трубка полиэтиленовая $\ln \frac{d_1}{d_2} = 0,06119$, $L = 10 \text{ см}$	25	33	15,80	7,90	3,95
	30	42	12,4	6,2	3,10
	41	71	7,2	3,6	1,80
	50	103	5,08	2,54	1,27
	60	170	3,04	1,52	0,76
	70	280	1,864	0,932	0,466
	80	400	1,304	0,652	0,326
Мембрана Ф4МБ $\delta = 0,015 \text{ см}$ $A = 20,4 \text{ см}^2$	120	89,6	4,36	2,18	1,09
	140	146	2,68	1,34	0,675
	165	241	1,628	0,814	0,407
	181	325	0,310	0,155	0,078

Изменяя материал диффузионного барьера, его тип, температуру и расход газа-носителя, в диффузионном элементе, можно получить коэффициент разбавления K_p от $3 \cdot 10^2$ до $3 \cdot 10^6$ раз.

Используя выражение (12), на основе экспериментальных данных может быть рассчитана энергия активации. Для различных материалов значения энергии активации следующие: для фторопластов $E = 6,96 \pm 0,23$ ккал/моль, для полиэтилена $E = 10,63 \pm 0,39$ ккал/моль.

Полученные результаты способствовали разработке вспомогательного устройства для отбора и подготовки пробы к анализу на автоматическом газоанализаторе для определения ультрамикронецентрации сернистого ангидрида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б э р р е р Р. Диффузия в твердых телах. - М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1948.
2. Р е й т л и н г е р С. А. Проницаемость полимерных материалов. - М.: Химия, 1974.
3. А.с. № 708159 (СССР). Устройство для приготовления газовых смесей. Д у д к и н Н. И., Р о с и х и н И. А., К у л а к о в Б. М. - Булл. изобр., 1980, № 1.

Л. В. М а л е й к о

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ГРАДУИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО ИК-ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

При решении задачи создания автоматизированной системы контроля загрязнения атмосферы важное значение приобретает обеспечение надежной работы входящих в нее газоанализаторов в процессе эксплуатации. ЦНИИ робототехники и технической кибернетики при Ленинградском политехническом институте им. М.И.Калинина разработал однолучевой двухканальный газоанализатор [1], оптическая схема которого, в отличие от схем однокомпонентных газоанализаторов, содержит блок дистанционного контроля градуировочной характеристики. Выходной сигнал прибора является функцией отношения эталонного и рабочего коллимированных потоков излучения, формируемых интерференционными фильтрами.

Газоанализатор предназначен для измерения содержания двуокиси углерода в шахтах и на станциях метрополитена [2]. Блок дистанционного контроля осуществляет периодическое переключение газоанализатора с режима измерения на режим контроля. По значениям выходных сигналов в указанных режимах определяется погрешность измерения ΔC . Предлагаемый расчет погрешности приемлем для газоанализаторов, измеряющих малые значения концентрации C , конструктивно выполненных с оптическими каналами равной длины, т.е. когда применимы допущения

$$\chi C L_1 \ll 1, L_1 = L_2 = L, \dots \quad (1)$$

где χ - коэффициент поглощения исследуемого газа в полосе пропускания рабочего фильтра ($\text{см}^{-1} \cdot \%^{-1}$), C - концентрация анализируемого газа (%), L_1 - длина оптического пути рабочего канала (см), L_2 - длина оптического пути эталонного канала (см).

Если условие (I) не выполняется, анализ погрешности необходимо производить по выходным сигналам, снимаемым с блока логарифмирования отношения эталонного сигнала к сигналу рабочего канала. В этом случае методика контроля, описанная в [2], не позволяет получить достаточно достоверной оценки погрешности измерения.

Проведенные исследования показали, что в общем случае анализ погрешности целесообразно проводить по уточненной методике, приведенной ниже. При этом в расчетах пренебрегается отклонением функции поглощения ИК-радиации от закона Бутера-Бера [3].

Выходные сигналы анализатора после логарифмирования имеют вид:

$$\begin{aligned} W_1 &= \ln k_1 k_2 + \chi C L_1, \\ W_2 &= \ln \frac{k_2}{k_1} + \chi C L_2, \\ W_1' &= \ln k_1 k_2 m + \chi C L_1, \\ W_2' &= \ln \frac{k_2}{k_1 m} + \chi C L_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где W_1, W_1' - значения выходного сигнала в режиме измерения, полученные при градуировке и в текущий момент времени соответственно (В); W_2, W_2' - значения выходного сигнала в режиме контроля, полученные при градуировке и в текущий момент времени соответственно (В); K_1 - коэффициент преобразования электронно-оптического блока; K_2 - коэффициент, прямо пропорциональный отношению пропускания эталонного фильтра к пропусканию рабочего фильтра; m - коэффициент, характеризующий изменение параметров газоанализатора во времени.

Значения коэффициентов K_1, K_2, m обусловлены конкретной конструкцией газоанализатора.

Функции W_1, W_2 , полученные при градуировке, и их реальные значения W_1' и W_2' представлены на рис. I.

Очевидно, что если коэффициент изменения параметров электронно-оптического блока $m > 1$, то характеристики W_1 и W_2 со временем будут сближаться, а при $m < 1$ - расходиться.

На рис. I стрелками показано смещение характеристик W_1 и W_2 газоанализатора во времени для случая, когда коэффициент $m < 1$.

Разность между выходными сигналами в некоторый момент измерения (при значении концентрации C_0') равна:

$$W_2' - W_1' = -2 \ln K_1 - 2 \ln m + \chi C_0' (L_2 - L_1). \quad (6)$$

Из уравнения (6) получим действительное в момент измерения значение концентрации C_0' с учетом погрешности измерения:

$$C_0' = \frac{2L_1}{L_1 + L_2} C_0 + \frac{2 \ln K_1}{\chi(L_1 + L_2)} - \frac{W_2' - W_1'}{\chi(L_1 + L_2)}. \quad (7)$$

Экспериментальная проверка режима контроля проведена на макетном образце газоанализатора двуокиси углерода с диапазоном измерения 0,2 - 3,5 %. Получено уравнение, определяющее соотношение между показаниями прибора C_0' , выходными сигналами W_1' , W_2' и истинным значением концентрации C_0 при $L_1 = 17,4$ см, $L_2 = 22,4$ см:

$$C_0' = 0,874 C_0 - 2,54 (W_2' - W_1') + 0,66. \quad (8)$$

Предлагаемая методика контроля градуировочной характеристики позволяет повысить эксплуатационную надежность и точность показаний газоанализатора при длительной работе в составе станций контроля загрязнения атмосферного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 735976 (СССР). Газоанализатор. Алейников М. С., Земцов Г. А., Малейко Л. В. и др. - Булл. изобр., 1980, № 19.
2. Маглыш В. А., Малейко Л. В., Питкевич Г. Г., Садлова И. А. Инфракрасный анализатор концентрации углекислого газа шахт и станций метрополитена. - Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 32-35.
3. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей. - М.: Энергия, 1970. 552 с.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ДВУОКСИ СЕРЫ
И ОКСИ УГЛЕРОДА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСАХ

Интенсификация промышленного производства в нашей стране вызывает заметное увеличение объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Развитие энергетики сопровождается загрязнением воздуха продуктами сгорания органических видов топлива. Валовые выбросы двуокиси серы, окислов азота, окиси углерода, золы и т.д. составляют сотни тонн в сутки при относительно малой концентрации этих веществ в отходящих дымовых газах тепловых электростанций.

Загрязнение воздушного бассейна городов двуокисью серы оказывает вредное воздействие на здоровье человека. Глобальный перенос продуктов вторичных реакций (серной кислоты и сульфатов) наносит большой ущерб сельскому хозяйству и вызывает устойчивые сдвиги в природных экосистемах. По данным западно-германских исследователей [2] полное уничтожение всех растений происходит на территории радиусом до 30 км вокруг предприятия с выбросом двуокиси серы около 6000 т/сут. Объем выброса в значительной степени зависит от вида топлива, например, выброс $S O_2$ на Щекинской ГРЭС составляет 1700 т/сут при сжигании угля с содержанием серы $S^P = 3,4 \% I$, использование кузнечного угля "Т" с $S^P = 0,5 \%$ позволяет существенно уменьшить выброс $S O_2$ при том же производстве электроэнергии.

Токсичность окиси углерода меньше, чем двуокиси серы, однако наблюдения показывают, что постоянное загрязнение воздуха CO опасно для здоровья человека. Согласно статистическим данным, показатель смертности в городах находится в прямой зависимости от концентрации окиси углерода в воздушном бассейне города [5]. Основными источниками выброса окиси углерода в городах являются автомобильный транспорт, металлургические предприятия и ТЭС. Наличие окиси углерода в дымовых газах свидетельствует о химическом недожоге топлива, снижающем экономичность технологического процесса.

Проведение мероприятий по снижению выбросов $S O_2$ в атмосферу связано со значительными техническими трудностями, поскольку часто очистка дымовых газов от двуокиси серы нерентабельна и наилучший природоохранный эффект дает обессеривание топлива перед сжиганием, например в процессе газофикации угля.

Уменьшение содержания окиси углерода в выбросах достигается при увеличении избытка воздуха (кислорода) в зоне горения или дополнительным обжигом в газовых трактах. Значительный избыток воздуха в топках котлоагрегатов увеличивает расход топлива на единицу производимой энергии и поэтому должен поддерживаться автоматически на оптимальном уровне. Из-за несовершенства автоматов и периодического изменения режимов работы котлоагрегатов могут происходить кратковременные выбросы с большой концентрацией окиси углерода.

В настоящее время для строящихся объектов заранее устанавливаются предельно допустимые выбросы (ПДВ) и на основании лабораторно-химических методов анализа отходящих газов расчетным путем устанавливаются временно согласованные выбросы (ВСВ). Расчетные методы позволяют вычислять средние значения массового выброса без учета случайных точечных выбросов; прямые химические методы измерения концентрации двуокиси серы и окиси углерода трудоемки и неоперативны.

Для определения фактических значений концентрации двуокиси серы и окиси углерода в выбросах промышленных предприятий необходимы прямые инструментальные методы контроля с непрерывным проботбором и автоматической регистрацией результатов измерений. С этой целью в ГГО разработан измерительный комплекс для определения концентраций SO_2 и CO в промышленных выбросах с помощью серийных автоматических газоанализаторов ГАП-1 и ГММ-3. В состав комплекса входят блоки проботбора, пробоподготовки и разбавления. Использование газоанализаторов ГАП-1 для анализа SO_2 и ГММ-3 для анализа CO в промышленных выбросах возможно при разбавлении пробы чистым воздухом для получения концентраций названных компонентов в диапазоне значений, соответствующих пределам измерения газоанализаторов - 0-5 мг/м^3 SO_2 и 0-80 мг/м^3 CO . Дозировка малых концентраций этих газов осуществляется в блоке разбавления пробы.

Отбор газовой пробы и очистка от механических примесей производится с помощью зонда (рис. 1). Металлокерамический фильтр 1, снижающий загрязненность пробы до 1 мг/м^3 , размещен на конце заборной трубки 2, вводимой в газосток перпендикулярно потоку дымовых газов 3.

Транспортирование пробы к блоку пробоподготовки осуществляется по прогреваемой газовой магистрали, температура внутри трубопровода поддерживается выше точки росы для предотвращения концентрации влаги и сорбции двуокиси серы при контакте с водой на стенках трубопровода.

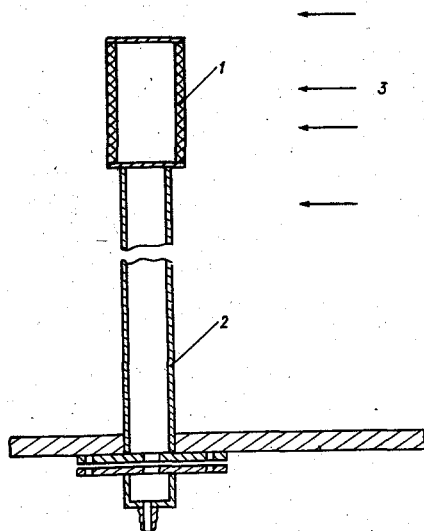


Рис. 1. Зонд для отбора газовой пробы.

Блок пробоподготовки включает в себя холодильник и фильтр для очистки газа, поступающего в побудитель расхода ротационного типа. Водяной холодильник в зависимости от температуры и расхода охлаждающей воды снижает температуру водяного пара в пробе до температуры ниже точки росы, конденсат собирается в отстойнике. Применение кожухотрубного холодильника позволяет сократить время пребывания газа в контакте с конденсатом, а следовательно, и возможность растворения газовой пробы в воде.

Параметры газовой пробы, прошедшей блоки пробоотбора и пробоподготовки, не соответствуют диапазонам измерения газоанализаторов, и газовая проба поступает в блок разбавления. Существенные различия в физико-химических свойствах анализируемых компонентов, разная степень несоответствия концентрации CO и SO_2 в пробе возможностям газоанализаторов predeterminedили выбор различных способов разбавления. Для разбавления пробы применен принцип динамического разбавления.

Динамический разбавитель состоит из двух калиброванных стеклянных трубок, имеющих различные длину и внутренний диаметр. Точная регулировка коэффициента разбавления K осуществляется двумя ротаметрами, включенными в каналы пробы и газа-носителя.

Коэффициент разбавления K зависит от отношения расходов пробы в каналах газа-носителя, которое в свою очередь зависит от длин и внутренних диаметров согласно формуле:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \frac{l_2}{l_1}, \quad (1)$$

где Q_1 , Q_2 - расходы в каналах газа-носителя и пробы соответственно, d_1 и d_2 - внутренние диаметры капилляров, включенных в каналы газа-носителя и пробы, l_1 и l_2 - длины соответствующих капилляров.

Коэффициент разбавления рассчитывается по следующей формуле:

$$K = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (2)$$

Разбавление пробы, при котором уменьшаются влагосодержание, запыленность и концентрация мешающих компонентов, завершает процесс подготовки газа для анализа на приборе ГМК-3. Подготовка пробы для анализа в ряде случаев (при температуре отходящих газов ниже 430 К, влагосодержании менее 10 %) не требует применения холодильника и отстойника конденсата, поскольку функцию осушки и очистки пробы выполняет в блоке разбавления диффузионный элемент.

Разбавление пробы осуществляется также диффузионным методом. Физический принцип действия такого разбавления основан на диффузионном переносе газа через полимер. Процессы сорбции газа на наружной поверхности полимера и десорбции на внутренней поверхности подчиняются закону Генри, связывающему концентрацию газа внутри полимера с парциальным давлением P через коэффициент растворимости \S . Процесс диффузии газа через полимер при условии стационарности описывается системой дифференциальных уравнений, решение которой раскрывает связь потока газа с парциальным давлением на границе газ - полимер и геометрией полимерного диффузионного элемента. Если диффузионный элемент выполнен в виде трубки и проникающее вещество непрерывно удаляется, например, с помощью газа-носителя, то диффузионный поток будет пропорционален исходной концентрации диффундирующего вещества:

$$F = \frac{2\pi P}{\ln d_1/d_2} \S D, \quad (3)$$

где F - поток, P - давление, d_1 , d_2 - диаметры трубки, D - коэффициент диффузии, экспоненциально связанный с температурой и энергией активации. Аналогичная зависимость коэффициента растворимости \S от температуры (T) позволит получить общую формулу

для молекулярных констант полимера $\$D = \$D_0 \exp E/kT$, где E — энергия активации проникания. В окончательном виде получим выражение для коэффициента разбавления диффузионной трубки:

$$K = \frac{Q \ln d_1/d_2}{2\pi L P_{\text{вых}}} \$D_0^{-1} \exp E/kT. \quad (4)$$

Сильная зависимость коэффициента разбавления от температуры усложняет метрологическое обеспечение метода, но расширяет динамический диапазон разбавления при термостатировании разбавителя и регулировании температуры диффузионного элемента.

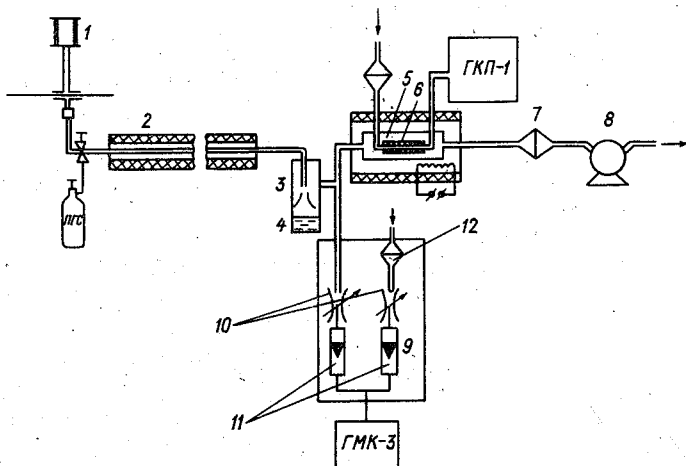


Рис. 2. Схема измерительного комплекса.

Измерительный комплекс (рис. 2) работает следующим образом: газовая проба из газохода поступает через металлокерамический зонд 1 по прогреваемой газовой магистрали 2 после охлаждения в холодильнике 3 и слива конденсата 4 в блок разбавления 5. Часть двуокиси серы диффундирует через стенки полиэтиленовой трубки 6, разбавляется газом-носителем и поступает в датчик газоанализатора ГМП-1. На вход газоанализатора ГМК-3 проба поступает через динамический разбавитель 9, состоящий из капилляров 10 и ротаметров 11. Фильтр 7 служит для защиты побудителя расхода 8 от агрессивных примесей.

Основные технические характеристики измерительного комплекса должны быть следующими:

Измеряемый компонент	CO	$\$SO_2$
Диапазоны измерений, %	0 - 5	0 - 4
Основная приведенная погрешность, %	20	20

Время реагирования, с

180

600

Область применения инструментального метода контроля двуокиси серы и окиси углерода ограничена следующими параметрами анализируемого газового потока:

Температура, К	до 700
Влажность, %	до 100 (при 700 К)
Давление, кПа	60 - 110
Запыленность, г/м ³	до 100
Скорость потока, м/с	до 25

Измерительный комплекс после лабораторных исследований прошел натурные испытания на типовом источнике промышленных выбросов, которые показали высокую эффективность и надежность при непрерывной регистрации концентрации SO_2 и CO в отходящих газах в течение длительного периода времени. Применение инструментальных методов контроля позволяет определять изменение концентрации компонентов в выбросе, контролировать точечные выбросы.

Инструментальные методы контроля целесообразно применять для измерения концентрации SO_2 и CO в выбросах при инспекционном контроле службами Госкомгидромета и службами ТЭС для оптимизации технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б р о д о к и й Ю. Н. Источники выбросов сернистого ангидрида в атмосферу. - В кн.: Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. - Л.: Гидрометеиздат, 1977, с.34 - 36.
2. Г у д е р и а н Н. Загрязнение окружающей среды. - М.: Наука, 1980.
3. Д а н и л о в а С. Т., Д е р г а ч е в Н. Ф. Оценка выбросов в атмосферу от тепловых электростанций. - В кн.: Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. - Л.: Гидрометеиздат, 1977, с.37 - 43.
4. У о р к К., У о р н е р С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. - М.: Мир, 1980.
5. Д н г е Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. - М.; 1965.
6. Н е х т е r A.C., G o l d s m i t h I.R. Carbon Monoxide: association of community air pollution with mortality. - Science, April, 16, 1971.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА
ОКИСЬЮ УГЛЕРОДА И СЕРНИСТЫМ ГАЗОМ ПО ДАННЫМ АСКЗВ

Задачи, решаемые при создании автоматизированных систем контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ), такие как размещение автоматизированных станций контроля, выбор временного интервала опроса станций, оперативный прогноз загрязнения и др., требуют достоверной информации о пространственно-временных характеристиках полей концентраций основных загрязняющих веществ (ЗВ). При этом наибольший интерес представляет изучение короткопериодических колебаний хода концентраций по данным непрерывной автоматической регистрации загрязнения воздушного бассейна города. В настоящей статье, являющейся продолжением работы [5], анализируются результаты эксперимента, проведенного зимой 1980 года с использованием АСКЗВ Ленинграда.

С помощью автоматических газоанализаторов, установленных на восьми станциях в различных районах города, были получены ряды концентраций SO_2 и CO . Данные осреднялись за каждые полчаса, объем полученных в результате осреднения массивов составил 450 - 500 чисел. Потеря данных в массивах составляла 3-4 % и учитывалась при обработке.

Статистическая обработка результатов эксперимента проводилась с помощью программ вычисления суточного хода концентраций, определения авто- и взаимокорреляционных функций, спектров и ко-спектров.

Эксперимент показал, что содержание сернистого газа в атмосфере города в основном находится в пределах ПДК. Суточный ход концентраций слабо выражен и находится на уровне фоновых концентраций (рис. 1). Лишь на двух станциях отмечены дневные максимумы в 14 и 19 ч, ночной - в 1 ч и утренний - в 6 ч. Дневные и утренний максимумы объясняются режимом работы предприятий, в то время как ночной, по-видимому, понижением температуры и влажности [6]. Изменчивость концентраций невелика, коэффициент вариации изменяется в пределах 30 - 58 % для различных станций и лишь в одном случае достигает 93 %. Анализ автокорреляционных функций (рис. 2) подтверждает результат, полученный ранее в [5]. Суточный ход концентрации SO_2 сохраняет свою инерционность τ до 2,5 ч (значения функции $\rho(\tau) \geq 0,5$). Для станций, контролирующих фоновые концентрации, инерционность увеличивается до 7 - 9 ч.

Суточный ход концентраций CO по наблюдениям большинства станций имеет характерные максимумы в 8-10 и в 15-16 ч (рис. 3), связанные с режимом движения автомобилей на близлежащих автомагистралях [I, 2, II].

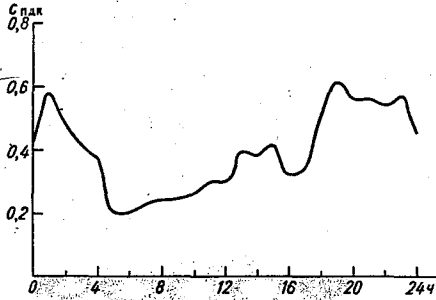


Рис.1. Суточный ход нормированных концентраций SO_2 .

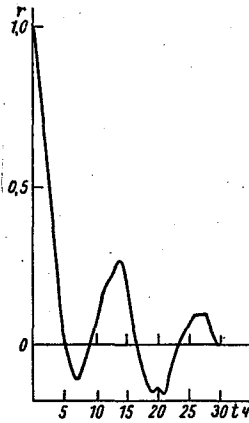


Рис.2. Автокорреляционная функция хода концентраций SO_2 .

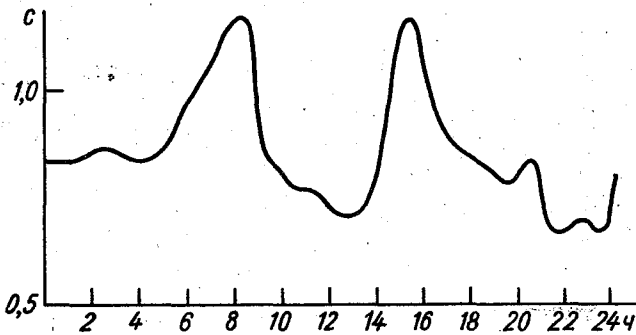


Рис.3. Суточный ход нормированных концентраций CO .

На некоторых станциях наблюдается повышение концентраций в 2 - 3 ч ночи, обусловленное суточным ходом метеорологических параметров. Значения автокорреляционных функций, построенных для рядов концентраций CO , достигают 0,5 при запаздывании от 2 - 3 ч до 11 - 12 ч, причем нет разделения на "фоновые" и "нефоновые" концентрации, как в случае сернистого ангидрида.

Из сопоставления статистических характеристик временной структуры поля концентраций в городе, представленных в [5], и полученных в этой работе, следует, что для фоновых концентраций характерна большая инерционность хода. Однако, воздействие локальных источников (влияние режимов работы предприятий и движения автомобилей на близлежащих магистралях) приводит к увеличению изменчивости концентраций и, следовательно, к резкому падению автокорреляционных функций.

Спектральные функции, полученные при обработке данных как по SO_2 , так и по CO , имеют пики плотности (N), соответствующие периодам T , равным 24, 12 и 8 ч (рис.4).

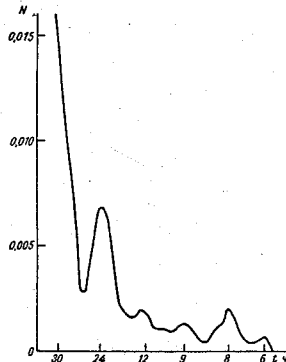


Рис.4. Спектр ряда концентраций SO_2 .

Повторяются также слабые пики для периодов в 4 - 5 ч и более слабые - для 1 - 2 ч. Подобные спектральные характеристики типичны для концентраций SO_2 в [10]. Для всех спектров характерно гладкое убывание с частотой в низкочастотной области спектра.

Вид ко-спектров (рис.5), построенных для пар станций, подтверждают общий характер максимумов спектральных мощностей для периодов, равных 24, 12 и 8 ч. Вид спектров на более высоких частотах индивидуален для каждой станции, что может объясняться мелкомасштабными флуктуациями метеопараметров, характером работы источников, местоположением станций и др.

Полученные результаты практически совпадают с результатами, приведенными в [10], несмотря на меньшую продолжительность эксперимента. Спектры, описанные в [5], отличаются от рассматриваемых и приведенных в [10] наличием абсолютного максимума плотности на

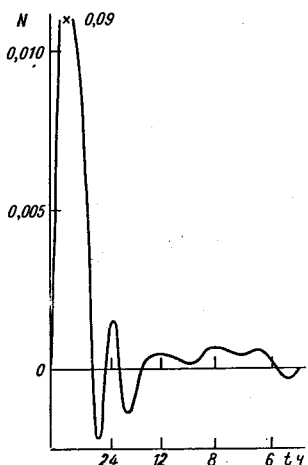


Рис. 5. Ко-спектор рядов концентраций CO , измеренных на паре станций КЗА.

частотах, соответствующих периоду $1 - 2$ ч (при частоте Найквиста 3 ч^{-1}). Это явление можно объяснить некоторым свойством, характерным для города, расположенного в котловине [5]. Наиболее правдоподобной причиной является связь хода концентраций с периодом самоочистения воздуха [7], который для месяца проведения эксперимента составляет $0.5 - 1.3$ ч, что согласуется с периодом максимума спектров [4].

Возможно, что локальные максимумы на частотах, соответствующих периодом $1 - 3$ ч, полученные в [2, 10] и для некоторых станций в данной работе, до сих пор удовлетворительно не объясненные, связаны с этим параметром.

С целью оценки устойчивости процесса загрязнения атмосферы значения концентраций CO , осредненные за 5 мин, были сформированы во временные ряды длиной 1500 (часть 1) и 1000 (часть 2) значений. Столь малый интервал осреднения выбран для того, чтобы иметь возможность оценить высокочастотные части спектров обеих частей. Автокорреляционные функции, полученные для частей 1 и 2, представлены на рис.6 а и 6 б. Полученные для обеих частей спектры имеют различный характер.

Для части 1 - абсолютный максимум спектра отмечается на периоде 60 ч. Затем наблюдается резкое уменьшение спектра с локальными максимумами, приходящимися на периоды 24 ч, 8 ч и 3 ч 45 мин (рис.7 а).

Для части 2 - абсолютный максимум спектра отмечается на периоде 24 ч. Локальные максимумы - для периодов 12, 8 и 6 ч. Небольшой локальный максимум - для частоты, соответствующей периоду 3 ч 20 мин. (рис.7 б).

Для исключения влияния мелкопериодических флуктуаций было

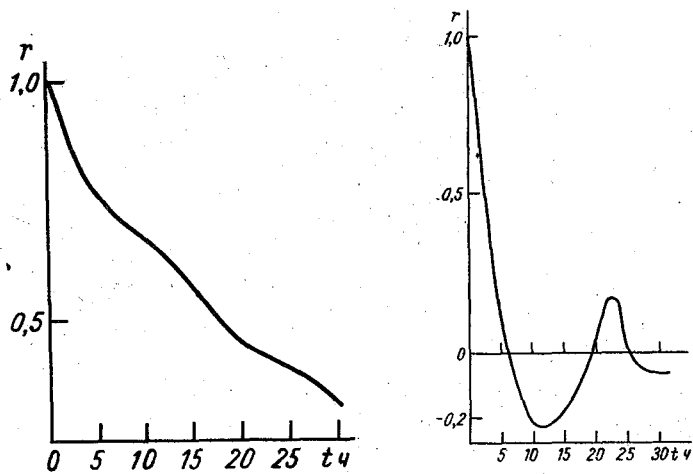


Рис.6. Автокорреляционная функция ряда концентраций CO, осредненных за 5 мин., части I(а) и части II(б).

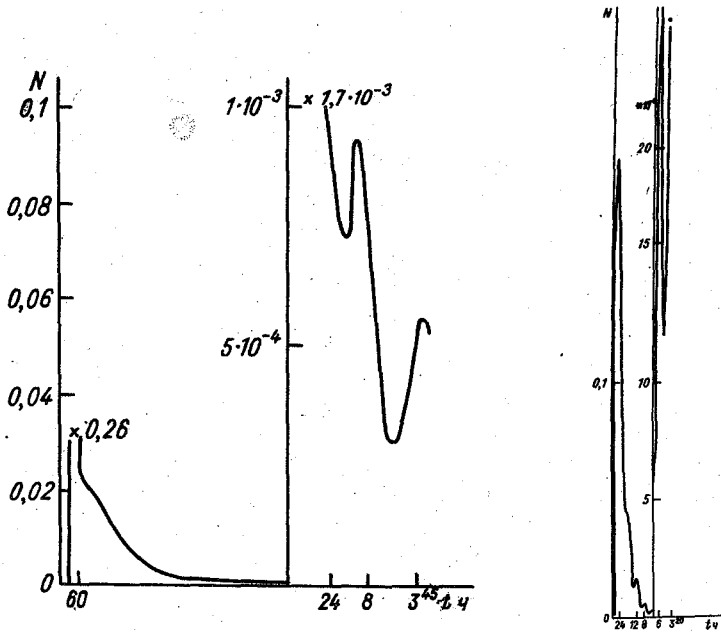


Рис.7. Спектр ряда концентраций CO, осредненных за 5 мин. части I(а) и части II(б).

проведено осреднение данных по интервалам 10, 15, 20, 25, 30, 35 мин. При различных интервалах осреднения вид автокорреляционных функций практически не меняется (дисперсия увеличилась от 0,01 до 0,02 в одном случае и от 0,05 до 0,06 в другом); характер максимумов в спектрах сохраняется.

При анализе оказалось, что концентрация в части I значительно выше, чем в части 2.

Автокорреляционные функции рядов концентрации как CO , так и SO_2 , построенные для пар станций, имеют не высокие значения. Подобный характер корреляций соответствует полученным ранее [5, 8 - 10]. Этот результат свидетельствует о необходимости проверки обоснованности предположений пространственной однородности поля концентраций $ЗВ$ в атмосфере крупного города, для чего необходим эксперимент с одновременным непрерывным контролем атмосферы на станциях, расположенных в одном районе.

Полученные результаты позволяют уточнить статистические характеристики концентраций основных загрязняющих компонентов воздушного бассейна Ленинграда и конкретизировать требования на измерительную аппаратуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горина Е. А., Коньков С. А., Красов В. И., Александров В. В. Исследование загрязнения атмосферы города окисью углерода. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 122 - 126.
2. Горшенев А. М., Коньков С. А., Полицук А. И. Некоторые результаты анализа пространственной и временной статистической структуры поля концентраций сернистого газа в атмосфере промышленных городов. - Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 93 - 112.
3. Зайцев А. С. Структура поля концентраций окиси углерода в городе. - Труды ГГО, 1973, вып. 293, с. 47 - 51.
4. Зайцев А. С., Коньков С. А. Пространственно-временная структура поля концентраций сернистого газа. - Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 77 - 80.
5. Красов В. И., Горина Е. А. Анализ пространственно-временных характеристик поля загрязнения атмосферы города сернистым ангидридом и окисью углерода по данным измерений автоматических газоанализаторов. - Труды ГГО, 1982, вып. 464, с. 82-89.
6. Покровская Т. В. Климат Ленинграда. - Л.: Гидрометеоздат, 1957.
7. Дмитриова К., Джолов Г. Определяне на характерното време на самоочистване на въздуха в затворените котловинне полета. - Проблеми на географията, 1979, 4, с. 49 - 54.

8. Goldstein I. P., Landovits L. Analysis of air pollution patterns in New York City. I. Can one station represent the large metropolitan area? - *Atm. Env.*, 1977, 11, N 1, pp.49-52.

9. Goldstein I. P., Landovita L. Analysis of air pollution patterns in New York City. - II. Can one aerometric station represent the area surrounding it? - *Atm. Env.*, 1977, 11, N 1, pp.53-57.

10. Mattioli J. Spectral analysis of wind and SO₂ concentration in the Venice area. - *Atm. Env.*, 1977, 11, N 2, pp.113-122.

11. Veillard. Leçons à tirer après quinze ans de surveillance de la pollution automobile. - *Pollut. Atm.*, 1980, N 85, pp. 82-91.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ФТОРХЛОРУГЛЕВОДОРОДАМИ
НА ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

Спектр поглощения атмосферы в окне прозрачности атмосферы определяется не только 15 мкм полосой поглощения CO_2 , но и полосами водяного пара, озона и многих других малых газовых компонентов, а также аэрозоля. С точки зрения общего загрязнения атмосферы наиболее существенны те компоненты, которые обладают долговременными трендами. Особое место среди них занимают фторхлоруглеводороды - фреоны, газовые компоненты атмосферы антропогенного происхождения.

В воздухе содержится целый ряд малых газовых компонентов, таких, как закись азота, метан, аммиак, азотистая кислота, этилен, сернистый газ и др., также имеющих четко выраженные полосы поглощения в интервале λ 7 - 14 мкм. Концентрация этих компонентов испытывает сильные колебания под влиянием антропогенных воздействий (интенсивное применение органических удобрений, сжигание топлива и пр. [1]). Все они оказывают влияние на парниковый эффект атмосферы.

По данным наблюдений [2], в настоящее время относительная объемная концентрация фреонов $F = \text{II}$ и $F = \text{I2}$ в атмосфере составляет $0,1 - 0,2 \text{ млрд}^{-1}$, к концу столетия (учитывая протекающий в стратосфере фотолиз и тропосферно-стратосферный перенос) при современном уровне загрязнения атмосферы концентрация фреонов в атмосфере может возрасти в 20 - 30 раз. Это согласуется с выводом, полученным ранее в работе [3]. Следует при этом также иметь в виду, что время жизни $F = \text{II}$ и $F = \text{I2}$ порядка 10 лет. В [4] предпринята попытка оценить влияние концентрации фреонов на радиационный баланс системы Земля - атмосфера. Как показали расчеты, рост температуры поверхности Земли обусловлен фреонным загрязнением. Более точные расчеты изменений температуры поверхности [5] в рамках модели радиационно-конвективного равновесия также подтверждают результаты, приведенные в [4]. Если принять обусловленное фреонами уменьшение ИК прозрачности атмосферы равным 0,33%, то по теоретической модели климата, предложенной Селлерсом, повышение средней глобальной температуры составит 1°C . В [6] показано, что фреонное загрязнение, внося изменения в радиационный баланс Земля - атмосфера, может повлиять на климат заметнее, чем некоторые другие антропогенные факторы (такие, как увеличение концентрации CO_2 и аэрозоля). В [7] подчеркивается, что газы антропогенного происхождения (учитывая и фреоны) могут радикально изменить климат Земли, полностью "закрыв" атмосферное окно прозрачности для уходящего теплового излучения земной поверхности. Поэтому

важны оценки вклада в парниковый эффект широкой совокупности загрязняющих компонентов атмосферы.

Результаты расчетов, приведенные в таблице, показали, что при удвоении концентрации закиси азота средняя температура земной поверхности повышается на 0,7 К. (Можно считать потенциально существенным долговременное изменение температуры более 0,1 К, а изменение температуры на 1 К отражает коренные вариации климата.) Удвоение концентрации метана и аммиака должно привести к аддитивному повышению температуры на 0,3 и 0,1 К соответственно. В таблице приведены также результаты расчетов возможных изменений температуры земной поверхности, обусловленных вариациями концентраций HNO_3 , C_2H_4 , SO_2 , CCl_2F_2 , CCl_3F , CH_3Cl и CCl_4 , а для сравнения указаны изменения температуры, обусловленные водяным паром, CO_2 и O_3 . Суммарный парниковый эффект удвоения концентраций N_2O , CH_4 , NH_3 и HNO_3 достигает 1,2 К. Весьма заметным становится и влияние фреонов, если их концентрация возрастает на порядок величины.

Обращают на себя внимание расхождения результатов расчетов [7] и [4]: согласно [7] парниковый эффект за счет фреонов значительно меньше, чем это следует из [4] (0,9 К). Результаты [7] свидетельствуют о важности учета значительного числа малых компонентов, влияние которых представлялось ранее пренебрежимо малым. Отсюда следует также вывод о важности слежения за глобальными трендами концентрации таких малых компонентов. Несомненно, что в ближайшем будущем наиболее важными факторами станут возрастание концентрации CO_2 и фреонов, а также вариации содержания водяного пара в стратосфере.

Известно, что парниковому эффекту CO_2 [3, 5] свойственно "влияние насыщения": поскольку поглощение ИК радиации, обусловленное 15 мкм полосой CO_2 , очень интенсивно (особенно, если учесть перекрывание полос CO_2 и H_2O), рост концентрации CO_2 вызывает лишь очень небольшое возрастание противои излу чения атмосферы. Поскольку антропогенно обусловленные изменения состава атмосферы многокомпонентны, естественно, что теоретические оценки их воздействия на парниковый эффект должны учитывать все наиболее существенные компоненты (см. таблицу). Связанные с этим конкретные выводы о роли различных компонентов должны быть непременно учтены при планировании системы наблюдения за важными с точки зрения слежения за климатом параметрами и определяющими его факторами. Актуальное значение имеют также исследования спектров поглощения климатически существенных загрязняющих компонентов атмосферы.

Парниковый эффект, возникающий при вариациях концентрации различных малых компонентов атмосферы

Компонент	Центр полосы	Предполагаемая со- временная концен- трация, μ -I млн-I	Возрастание концентрации, I раз	Парниковый эффект, K	
				при фиксированной температуре верх- ней границы обла- ков	при фиксированной высоте верхней границы облаков
N_2O	7,78; 17,0; 4,5	0,28	2	0,68	0,44
CH_4	7,66	1,6	2	0,25	0,20
NH_3	10,53	$6 \cdot 10^{-3}$	2	0,12	0,09
HNO_3	5,9; 7,5; 11,3; 21,8	$4,87 \cdot 10^{-3}$ ммСТР	2	0,08	0,06
C_2H_4	10,5	$2 \cdot 10^{-4}$	2	0,01	0,01
NO_2	8,69; 7,35	$2 \cdot 10^{-3}$	2	0,03	0,02
CO_2F_2	9,13; 8,68; 10,93	$1 \cdot 10^{-4}$	20	0,54	0,36
CO_2F	9,22; 11,82	$1 \cdot 10^{-4}$	20		
CH_2Cl_2	13,66; 9,85; 7,14	$5 \cdot 10^{-4}$	2	0,02	0,01
CCl_4	12,99	$1 \cdot 10^{-4}$	2		
H_2O	6,25; 10; 20; 10	75 % отн. влажн.	2	1,03	0,65
CO_2	15,0	330	1,25	0,79	0,53
O_3	9,6	$3,43$ мм СТР	0,75	-0,47	-0,34

¹ Эти отношения смеси относятся к уровню земной поверхности, а для O_3 и HNO_3 указано общее со-
держание в толще атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R e p o r t of the scientific workshop on atmospheric carbon dioxide. - WMO Publ. N 474, Geneva, 1977, 41pp.
2. L o v e l o c k J. F. (ed. R. E. M u n n). - SCOPB 3, ICSW Report, Toronto, 1973, p.21.
3. M e l i n a M. J., R o w l a n d F. S. - Nature (London), 249, 810, 1974.
4. R a m a n a t h a n V. Greenhouse effect due to chlorofluorocarbons: climatic implications. - Science, 190, 1975, pp.50-52.
5. R a m a n a t h a n V., C a l l i s L. B., B o u g h n e r R. E. Report on the 4-th conference on the climatic impact assessment programm (CIAP). - Cambridge, Mass., 4-7 Febr. , 1975.
6. W a r d l e D. I., E v a n s W. F. J. The effect of freon usage on the global climate: the greenhouse effect. - Atm. Res. Report N APRB 40x8, Jan., 1976, 8pp.
7. W a n g W. C., Y u n g J. L., L a c i s A.A., M o T., H a n s e n J.E. Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases. - Science, vol.194, N 4266, Nov. 1976.

101

И. В. Шведова, В. Б. Милеев, Н. А. Паничев

КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОВ В АТМОСФЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОГО МЕТОДА

В настоящее время для контроля за содержанием металлов в атмосферном воздухе все более широкое применение получают инструментальные методы, среди которых, как отмечается в работе [7], наиболее перспективным является метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС).

Достоинства ААС общеизвестны: высокая чувствительность и точность, простота выполнения анализа, высокая селективность определения элементов [3, 8, 10, 11].

Анализ аэрозолей методом ААС имеет свою специфику, которая не всегда учитывалась в разрабатываемых методиках и связана с тем, что измерение концентрации металлов в воздухе производится после их предварительного выделения из газовой фазы на каком-либо фильтрующем материале. В качестве фильтрующих материалов применяются бумага, пористое стекло, стекловолокно, но чаще всего синтетические материалы. В СССР для этих целей используется ткань ФП [5], служащая основой для приготовления аналитических фильтров АФА-ХП, АФА-ВП и др. [4].

Однако определяемые элементы могут находиться не только в составе аэрозолей, улавливаемых фильтром, но и в более мелких частицах, которые не задерживаются на фильтре, поэтому такой способ отбора аэрозолей, несмотря на его широкое распространение [1], не позволяет получить достаточно достоверные результаты. Так как анализ сводится к определению содержания металлов, находящихся на фильтре, их неполное извлечение из воздуха приводит к появлению систематической ошибки, величина которой еще не оценена.

Большое разнообразие способов подготовки фильтров к анализу объясняется не только химической индивидуальностью определяемых элементов, но и тем, что на данном этапе исследований не существует универсального способа пробоподготовки. В большинстве случаев рекомендуется метод "сухого" озонения фильтров с пробами, так как при этом происходит наименьшее загрязнение пробы во время пробоподготовки. Для устранения возможных потерь элементов на стадии озонения рекомендуется вводить небольшое количество концентрированной серной (хлорной) кислоты. С аналитической точки зрения наличие остаточных загрязнений в материале фильтра может служить причиной возникновения дополнительной погрешности измерений. По данным работы [2], фильтры АФА-ХА содержат 0,05 - 3 нг/см² таких элементов, как Co, Sb, Cs и V, и 45 - 770 нг/см² - Al, Cr, Ca, Ti, Mg. Поэтому определение элементов в "чистых", неэкспонированных фильтрах должно быть составной частью методики анализа.

Методика, описанная в этой работе, рассчитана на использование ацетилено-воздушного пламени, поскольку этот вариант находит широкое практическое применение [9], несмотря на целый ряд преимуществ электротермических атомизаторов [6].

Подготовка проб к анализу заключается в предварительном озолении фильтров при T равном 450 - 500 °С, в кварцевых тиглях ($d = 2$ см, $h = 5$ см), с последующим растворением золы остатка в 0,10 - 0,12 мл смеси концентрированных азотной и соляной кислот (марки "ОСЧ"). После непродолжительного нагревания до 80 - 100 °С, пробу разбавляют бидистиллированной водой до объема 2,0 мл. Для того чтобы предотвратить образование легколетучих хлоридов, до начала озоления к фильтрам с пробами добавляется 10 мг $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Измерения проводились на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-1N (ГДР). Условия определения элементов приведены в табл. I.

Таблица I

Условия	Элемент					
	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Mg
Аналитическая линия, нм	248,4	213,9	324,7	279,5	283,3	
Ток лампы, мА	7,5	10	5	5	7,5	2,5
Расход воздуха, л/ч	550	550	550	550	550	550
Расход ацетилена, л/ч	60	40	50	50	60	50
Чувствительность, мкг/мл	0,1	0,01	0,05	0,03	0,1	0,01
Рабочий диапазон концентраций, мкг/мл	0,2-10,0	0,03-1,0	0,1-5,0	0,1-4,0	0,5-10,0	0,01-0,4

Относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерений в пределах рабочего диапазона концентраций составляет 0,01 - 0,03.

В табл. 2 приведены данные о загрязнении фильтров различных марок определяемыми элементами.

В фильтрах также присутствуют другие элементы: Na 260 мкг, Mn 0,1 мкг, Ni 0,3 мкг.

Для определения степени улавливания аэрозолей двумя последовательно расположенными фильтрами при отборе проб была проведена экспериментальная оценка величины проскока аэрозолей через фильтры.

Таблица 2

Фильтр	Число измерений n	Содержание, мкг/фильтр			
		Fe	Cu	Zn	Mg
ФПП-15	100	5,0 \pm 0,7	0,11 \pm 0,08	0,42 \pm 0,1	0,48 \pm 0,1
АФА-ХА	6	2,3 \pm 0,1	0,07 \pm 0,04	0,26 \pm 0,1	0,36 \pm 0,1
АФА-ХП	6	3,1 \pm 0,1	0,05 \pm 0,04	0,33 \pm 0,1	0,34 \pm 0,1
АФА-ВП	6	2,3 \pm 0,1	0,07 \pm 0,04	0,30 \pm 0,1	0,40 \pm 0,1

Отбор проб проводился с помощью электроаспиратора ЭА-2 при разных скоростях прокачки. Результаты эксперимента представлены в табл.3.

Таблица 3

Исследуемый фильтр	Скорость прокачки воздуха, л/мин	Концентрация элементов, нг/м ³ .см ²			
		Fe	Cu	Zn	Mg
1	210	390	53	22	71
2		20	6	2	5
проскок, %		4,8	10,0	8,3	6,5
1	230	300	33	38	38
2		40	5	4	5
проскок, %		12	13	10	12
1	270	800	20	50	20
2		140	4	8	3
проскок, %		15	17	14	13

Из данных табл.3 следует, что при увеличении скорости прокачки воздуха от 210 до 270 л/мин степень проскока возрастает в 2 - 3 раза.

На основании разработанной методики была проведена серия измерений концентрации ряда элементов в аэрозолях, отбираемых на некоторых транспортных магистралях Ленинграда. Результаты анализов свидетельствуют о наличии сезонного хода концентраций металлов в воздухе. Общей закономерностью является увеличение концентрации Fe, Cu, Zn и, наоборот, уменьшение концентрации Mn и Mg в зимний период по сравнению с летним. Сезонный ход концентрации Pb практически не

отмечался (табл.4).

Таблица 4

Элемент	Пределы изменения концентрации, мкг/м ³	
	Зима	Лето
Fe	5 - 30	2 - 13
Zn	0,8 - 3,5	0,1 - 1,1
Ce	0,5 - 4,6	0,2 - 0,8
Pb	0,1 - 0,6	0,1 - 0,53
Mg	0,25 - 1,5	3,4 - 3,9
Mn	0,1 - 0,5	0,2 - 3,0

Необходимо отметить, что при отборе проб на фильтры ФП-15 по стандартной методике, т.е. при прокачке 1 м³ воздуха в течение 20 мин, содержание металлов в аэрозолях может оказаться соизмеримым с их количеством в неэкспонированных фильтрах. Поэтому реальный предел определения содержания металлов ограничивается степенью чистоты применяемых для отбора проб фильтров.

Предложенная методика атомно-абсорбционного анализа может быть рекомендована для контроля за содержанием металлов в атмосфере и использована на сети Госкомгидромета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. - М.: Химия, 1978, 207 с.
2. Куринов А. Д., Рошектаев Б. М., Шевалдин О. А., Шокель Е. С. Определение элементного состава атмосферных аэрозолей инструментальным нейтронно-активационным методом. - ЖАХ, 35, вып.9, 1980, с.1773-1776.
3. Львов Б. В. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. - М.: Наука, 1966,
4. Манита М. Д., Селихджанова Р. М., Яворская С. Ф. Современные методы определения загрязнений населенных мест. - М.: Медицина, 1980, с.24.
5. Петрянов И. В., Козлов В. И., Дружинин Э. А. Фильтрующие материалы ФП для анализа аэрозолей свободной атмосферы. - В кн.: Атмосферные аэрозоли. - М.: Гидрометеиздат, 1976, вып. 21, с. 16 - 24.
6. Прайс В. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. - М.: Мир, 1976, 356 с.

7. Р о в и н с к и й Ф. Я., Г а с и л и н а Н. К. Проблемы анализа при контроле загрязнения окружающей среды (обзор). - ЖАХ, 33, вып. I, 1978, с. 160 - 168.

8. Спектроскопические методы определения следов элементов. (Под ред. Дж. Вайнфорднера). - М.: Мир, 1979, 495 с.

9. S l a v l n W. Atomic absorption spectroscopy. The present and the future. - *Analyt. Chem.* 54, № 6, 1982, p. 685A - 694A.

10. S l a v i n W. Determination of chromium in the environment and in the working. - *Atom. Spectrosc.*, 1981, 2, p. 8 - 13.

11. V a n L o o n J. C. Analytical atomic absorption spectroscopy. Selected methods. - Academic Press, 1980.

О.И. Демочка, Л.Л. Волосова, В. И. Максимов,
В. А. Цветков

КОНТРОЛЬ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ АВТОТРАНСПОРТА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Автомобильный транспорт является одним из основных источников загрязнения воздушного бассейна города, поэтому создание газоанализаторов для контроля транспортных выбросов (ТВ) является важной задачей. В этом плане перспективно применение спектральных газоанализаторов (ГА), сочетающих в себе простоту, надежность и высокие метрологические характеристики.

Основными токсичными компонентами, содержащимися в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания, являются окись углерода CO , двуокись углерода CO_2 , углеводороды CH и окислы азота NO . Состав основных компонентов отработавших газов автомобильных двигателей приведен в табл. I [2] .

Таблица I

Компонент	Концентрация, %	
	Бензиновый двигатель	Дизельный двигатель
CO	0,1 - 6	0,01 - 0,3
CO_2	8 - 14	5 - 10
CH	0,01 - 0,2	0,001 - 0,05
NO	0,01 - 0,4	0,01 - 0,2

В настоящее время большое количество зарубежных фирм занимается выпуском ГА на эти компоненты. Окись и двуокись углерода определяются, как правило, спектральными ГА, окись азота — спектральными (МЕХА = 16) или хемилуминесцентными ($R\delta = 325\lambda$) ГА, а углеводороды — спектральными (МЕХА = 320) или пламенно-ионизационными (ЕНФ = 1001) ГА.

Первые спектральные ГА транспортных выбросов ($\rho e / \Delta e$, $IR = 215$ В, МЕХА = 200 и др.) были оптико-акустическими с конденсаторными микрофонами. Эти газоанализаторы чувствительны к вибрациям и не отличаются достаточной избирательностью.

В последние годы стали появляться ГА ТВ с твердотельными фотоприемниками и интерференционными фильтрами. Это, например, модель $RI = 703$ А японской фирмы Рикен, в которой на обтюраторе установлены три узкополосных фильтра на углеводороды (3,3 мкм), на окись

углерода (4,7 мкм) и эталонный фильтр вне зоны поглощения анализируемыми газами. В работе [5] описан малогабаритный ГА ТВ с двумя жестко закрепленными интерференционными фильтрами и одним дифференциальным фотоприемником (болометром). Применение высококачественных интерференционных фильтров в абсорбционных газоанализаторах позволяет существенно улучшать эксплуатационные и метрологические характеристики приборов газового анализа; об этом свидетельствуют результаты испытаний на избирательность спектральных газоанализаторов на окись углерода (табл.2) и окись азота (табл.3), проведенных фирмой Хориба.

Таблица 2

Мешающий компонент (МК)	Концентрация МК, %	Показания газоанализатора на CO, млн ⁻¹		
		оптико-акустического без фильтра	с газовым фильтром	с твердотельным фильтром
CO ₂	8,12	15	10	5
H ₂ O	0,6	3,5	2,6	0,8
H ₂ O	2,3	9	5,4	1,4

Таблица 3

Мешающий компонент (МК)	Концентрация МК, %	Показания газоанализатора на NO, млн ⁻¹				
		газовый фильтр		твердотельный фильтр		
		CO ₂ -22,5% N ₂ O-52% CO -0%	CO ₂ -25% N ₂ O-33% CO -16%	λ=5,3мкм Δλ=0,6мкм	λ=5,3мкм Δλ=0,4мкм	λ= 5,3мкм Δλ=0,25мкм
CO	4	30	10	-	-	-
CO	9	40	20	10	10	5
CO ₂	10	20	20	10	10	5
H ₂ O	0,6	140	100	80	70	60
H ₂ O	3	330	300	300	250	210
C ₆ H ₁₄	0,1	10	10	5	5	5
C ₈ H ₁₄	1,0	50	50	45	40	40

ГГО совместно с ЦНИТА был разработан газоаналитический комп-

лекс ИНГА, предназначенный для контроля состава отработавших газов при испытаниях двигателей в стендовых условиях. Он состоит из четырех однокомпонентных газоанализаторов и общего блока пробоотбора и пробоподготовки. Устройство и работа спектрального газоанализатора ИНГА подробно описаны в [3]. Блок пробоотбора и пробоподготовки состоит в основном из серийно выпускаемых промышленностью комплектующих узлов и включает (рис.1):

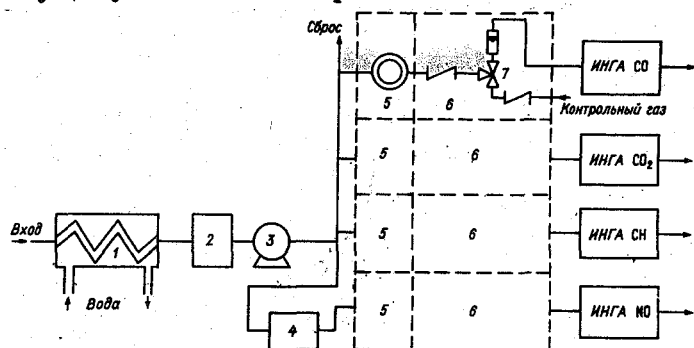


Рис.1. Система пробоотбора и пробоподготовки.

- холодильник водяной ХК (1);
- фильтр предварительный ФП-I (2);
- компрессор (3);
- фильтр химический для поглощения паров воды ХП (4);
- фильтр контрольный ФК-I (5);
- блок контроля БК (6);
- запорный вентиль ВЗ-2У (7).

Анализируемая газовая смесь поступает в водяной холодильник, где происходит охлаждение пробы и уменьшение абсолютной влажности до $6 - 9 \text{ г/м}^3$. Затем газовую смесь пропускают через предварительный фильтр, заполненный стекловатой для очистки от пыли и сажи до концентрации $0,001 \text{ г/м}^3$. В анализаторы проба подается с помощью мембранного компрессора (разработка ЦНИТА) с производительностью $8 - 10 \text{ л/мин}$, обеспечивающего параллельную подачу анализируемой газовой смеси в четыре однокомпонентных газоанализатора ($1,5 \text{ л/мин}$ каждый). Избыток газа сбрасывается в атмосферу. После компрессора газовая магистраль разветвляется на четыре линии, каждая из которых содержит контрольный фильтр, блок контроля и газоанализатор ИНГА с калибровочным баллоном. Перед контрольным фильтром на окись азота для дополнительной осушки был установлен электрохолодильник типа ТЛМ, обеспечивающий охлаждение пробы до температуры $- 5 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Как показали испытания, электрохолодильник не обеспечивал требуемую осушку анализируемой

пробы (табл.4), и поэтому был заменен химическим фильтром поглотителем (XII), заполненным CaSO_4 .

Таблица 4

Элементы системы пробоподготовки, включенные после баллона с NO ($C = 0,332\%$)	Влажесодержание, г/м ³	Показания прибора, %
БК	0	0,332
Увлажнитель + БК	13,09	0,515
Увлажнитель + ХК + ФП + БК	7,78	0,450
Увлажнитель + ХК + ФП + ТЛМ + БК	2,44	0,364
Увлажнитель + XII + ФП + XII + БК	-	0,332

Испытания газоаналитической аппаратуры проводились в два этапа. На первом этапе с помощью калибровочных газовых смесей определялись основные метрологические характеристики однокомпонентных газоанализаторов ИНГА. На втором этапе осуществлялись эксплуатационные испытания аппаратуры с системой пробоподготовки.

Основные результаты испытаний первого этапа, приведенные в табл.5, подтверждают, что однокомпонентные газоанализаторы ИНГА по основным параметрам соответствуют требованиям, предъявляемым к аналогичным приборам контроля ТВ. Погрешность газоанализаторов не превышает 5%. Нелинейность выходной статической характеристики объясняется большим значением оптических плотностей (длина кюветы для ИНГА CO_2 - 1 см, для ИНГА CO - 10 см.). При большом запасе по уровню шумов эта нелинейность может быть уменьшена путем изменения длины кюветы. Значительное время выхода на режим объясняется большим временем прогрева теплового излучателя. Тепловой излучатель представляет собой никромовую спираль, намотанную на керамический стержень. Ускорение его прогрева может быть обеспечено либо более интенсивным нагревом излучателя в первые 10 - 15 мин после включения, либо отказом от керамического стержня.

Наибольшего интереса заслуживает оценка избирательности газоанализаторов с твердотельными фильтрами. Интерференционные полосовые фильтры характеризуются рядом параметров, наиболее важными из которых являются (рис.2) центральная длина волны λ_0 , пропускание $T_{\text{макс}}$ на длине волны λ_0 , полоса пропускания фильтра на уровне $0,5 T_{\text{макс}}$ - $\Delta\lambda_{0,5}$ и $0,1 T_{\text{макс}}$ - $\Delta\lambda_{0,1}$,

граница рабочей области фильтра $\lambda_{гр.1}$ и $\lambda_{гр.2}$ и фоновое пропускание фильтра T_{ϕ} вне зоны $\Delta \lambda_{0,1}$.

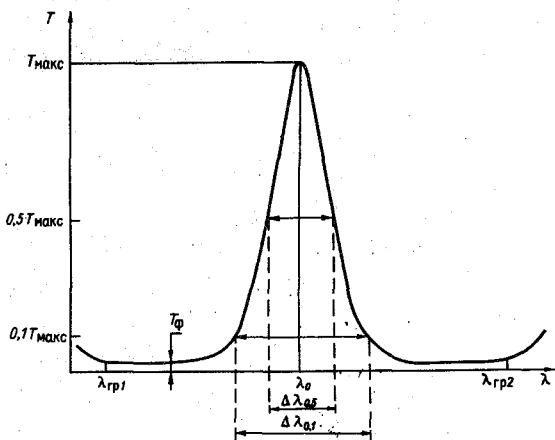


Рис.2. Спектральная характеристика фильтра.

Избирательность газового анализа определяется прежде всего правильным выбором λ_0 . Дело в том, что анализируемый компонент поглощает излучение на нескольких длинах волн, и необходимо выбрать ту длину волны, на которой мешающие компоненты дают минимальный вклад в поглощение. Вторым важным моментом является выбор полосы пропускания фильтра, так как при её сужении избирательность, как правило, повышается, но одновременно увеличивается и случайная составляющая погрешности ГА (вследствие уменьшения полезного потока излучения, поступающего на фотоприемник). Кроме того, повысить избирательность можно, снижая до минимума T_{ϕ} (для отечественных фильтров T_{ϕ} составляет 0,5 – 1%). Характеристики фильтров можно улучшить (особенно уменьшить T_{ϕ}) путем включения в оптический тракт селективных модуляторов, фильтровых газовых кювет и дополнительных широкополосных (дисперсионных) фильтров. Так, применение одного лишь интерференционного фильтра в газоанализаторе ИНГА СО с диапазоном измерения 0 – 10% при наличии сопутствующего углекислого газа в количестве 15%, дало дополнительную погрешность 1,6 % от диапазона измерения [I], установка же дополнительной фильтровой кюветы длиной 5 см с углекислым газом позволила полностью исключить эту составляющую погрешности.

Сложнее обстоит дело для газоанализатора на окись азота, полоса поглощения которой ($\lambda = 5,25$ мкм) частично перекрывается с полосой поглощения окиси углерода ($\lambda = 4,67$ мкм). Существенная разница в пропусканиях СО и NO (рис.3), а также отсутствие

интерференционных фильтров с отношением $\Delta\lambda 0,1 / \Delta\lambda 0,5$, близким к единице, не позволяют получить высокой избирательности, поэтому в газоанализаторе были установлены дополнительный дисперсионный фильтр ($\Delta\lambda 0,4 - 0,5$ мкм) и фильтровая кювета, заполненная углекислым газом, что, однако, сказалось на других метрологических характеристиках (дрейфе нуля, случайной составляющей погрешности).

Таблица 5

Основные параметры	ИНГА CO	ИНГА CO ₂	ИНГА CH ₄	ИНГА NO
Диапазоны измерения, %	0 - 1	0 - 8	0 - 0,2	0 - 0,1
Случайная составляющая (2σ), %	0 - 10	0 - 16	0 - 1,0	0 - 0,5
Время выхода на режим, ч	0,9	0,5	0,35	0,7
Дрейф нуля за 1 ч после 1 ч работы, %	1,5	1	1,5	2
после 2 ч работы, %	1	2	1	15
Нелинейность, %	0	1	0,7	1,5
1-ый диапазон	2,5	9	2	0
2-ой диапазон	7,5	15	5	0
Избирательность, %				
CO (с = 9,9%)	-	0	0	16
CO ₂ (с = 15,7%)	0	-	0	0
CH ₄ (с = 0,51%)	0	0	-	12
NO (с = 0,332%)	0	0	0	-
Динамические характеристики (Q=1,5 л/мин), мин.:				
время начала реагирования	2,5	3	1,2	2
постоянная времени	1	1,8	1,2	2
время переходного процесса	6,5	7,8	5	8,5

σ - среднее квадратическое отклонение показаний ГА.

Динамические характеристики газоанализатора определяются в основном внутренним объемом газового тракта, скоростью прокачки анализируемой смеси и сопротивлением газовому потоку на шту-

церах и соединительных трубках. При определении максимального расхода допустимый перепад давления между входом и выходом газоанализатора принимался равным 392 Па (40 мм вод.ст.).

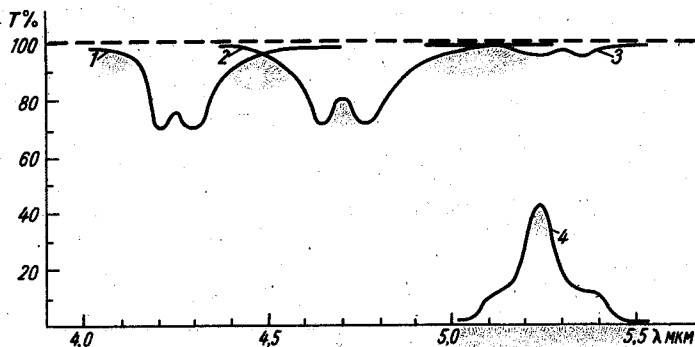


Рис.3. Спектральные характеристики газов, содержащихся в выбросах автомобиля и фильтра.

- 1 - пропускание CO_2 при $C = 16\%$, $l = 1$ см;
- 2 - пропускание CO при $C = 10\%$, $l = 10$ см;
- 3 - пропускание NO при $C = 0,5\%$, $l = 15$ см;
- 4 - пропускание фильтра.

На втором этапе испытаний определялись основные характеристики газоанализатора с устройством пробоподготовки и в условиях реальной эксплуатации; проводилось их сопоставление с характеристиками других газоанализаторов. Например, определена погрешность измерения в выхлопных газах окиси углерода для газоанализаторов ИНГА, ГАИ-1 и Инфралит-Т. В качестве образцового средства проверки использовалась система контроля ТВ фирмы Хориба МЕХА-16. При испытаниях приборы включались по схеме, изображенной на рис.4. Результаты испытаний сведены в табл.6.

Таблица 6

МЕХА-16 деления	ИНФРАЛИТ		ГАИ-1 %	ИНГА СО	
	%	%		μВ	%
1	2	3	4	5	6
14	0,9	1,2	-	3,5	1,25
14	0,9	1,2	1,1	3,5	1,25
14	0,9	1,2	1,0	3,5	1,25
40	3,1	3,25	3,25	6,3	3,6
75	7,45	7,0	7,5	9,2	8,4
40	3,1	3,3	3,4	6,2	3,5

1	2	3	4	5	6
76	7,6	7,0	7,6	9,1	8,2
40	3,1	3,3	3,4	6,2	3,5
76	7,6	7,0	7,8	9,1	8,2

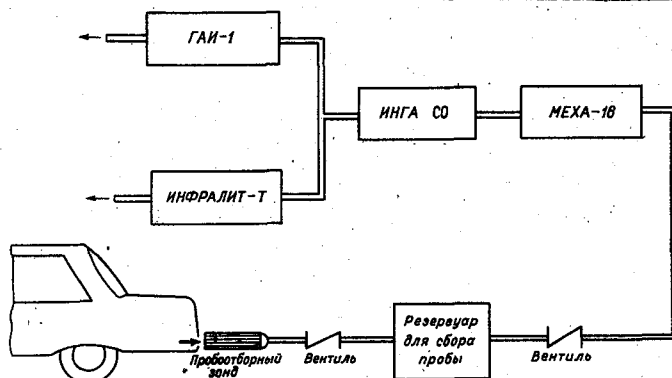


Рис. 4. Схема сравнительных испытаний газоанализаторов МЕХА-16, ИНГА СО, ГАИ-1, ИНФРАЛИТ-Т

Испытания показали, что основная приведенная погрешность газоанализаторов (относительно МЕХА-16) не превышает 5,8% для Инфралит-Т, 1,5% для ГАИ-1 и 4,8% для ИНГА СО. Аналогичные испытания проводились и при определении других компонентов.

Анализ суммы углеводородов в отработавших газах на газоанализаторе ИНГА дает возможность детектировать гораздо больше углеводородных компонентов и с большей чувствительностью. Однако, учитывая требования ОСТ 37.001.054 - 74 [4] о применении для анализа углеводородов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания недисперсионного газоанализатора, подобного МЕХА-16, в дальнейшем по мере накопления статистических данных анализа будет рассчитан коэффициент, позволяющий перейти от показаний газоанализатора ИНГА к показаниям МЕХА-16.

Образец газоаналитического комплекса ИНГА успешно прошел лабораторные и стендовые испытания и внедрен в эксплуатацию. Его погрешность не превышает 5%, нестабильность за 30 мин. непрерывной работы не более 0,5%, время переходного процесса не превышает 10с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демочка О. И., Красов В. И., Максимов В. И., Цветков В. А., Чистяков А. Н. Измерительная аппаратура для контроля выхлопных газов автомобилей. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 90 - 94.
2. Звонков В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1973, 200 с.
3. Максимов В. И., Цветков В. А. Спектральный газоанализатор эмиссионных газов. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 84 - 89.
4. ОСТ 37.001.054 - 74 Автомобили и двигатели, выделение вредных веществ. Нормы и методы определения. - М.: Изд. стандартов, 1975, с. 4.
5. Yuzo O., Tsuboshi B. Thin-film thermistor holometer facilities commercial HC/CO analyzers. - J. Electr. Eng. JEE, July 1978, pp. 44-48.

Л. Л. Волосова, О. И. Дёмочка, Л. Ф. Стрелкова,
В. А. Цветков

КОНТРОЛЬ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВЫБРОСАХ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Углеводороды относятся к основным газовым компонентам, оказывающим вредное воздействие на живые организмы. Вступая во взаимодействие с присутствующим в атмосфере атомарным кислородом, они образуют свободные радикалы и реакционно-активные органические соединения. Некоторые органические вещества при взаимодействии с окислами азота образуют нитраты [1]. Эти соединения участвуют в процессах образования фотохимического смога.

Антропогенными источниками углеводородов являются производства, связанные с обработкой и использованием нефтепродуктов. Существенный вклад в загрязнение атмосферы углеводородами вносит автомобильный транспорт с карбюраторными двигателями. По данным Госкомгидромета в крупных городах нашей страны на автомобильный транспорт приходится 60 - 80% общего выброса углеводородов. Поэтому организация контроля углеводородов в транспортных выбросах является актуальной задачей.

Решение задачи контроля углеводородов осложняется тем, что в состав отработавших газов входит свыше сотни различных компонентов [2], состав и концентрации которых колеблются в зависимости от режима работы двигателя и ряда других эксплуатационных параметров. Средняя концентрация некоторых углеводородов, обнаруженных в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания с помощью хроматографического анализа [6], приведена в табл. I.

Таблица I

Углеводороды	Формула	Концентрация, млн ⁻¹
метан	CH ₄	178
этан	C ₂ H ₆	16
этилен	C ₂ H ₄	231
пропилен	C ₃ H ₆	89
изобутилен, I-бутен	C ₄ H ₈	40
бутилен	C ₄ H ₈	47
изобутан	C ₄ H ₁₀	89
изопентан	C ₅ H ₁₂	16
метилпентан	C ₅ H ₁₁ (CH ₃)	10
ксилол	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	31
метилэтиленбензол	C ₈ H ₁₀	12
толуол 2, 3, 4 - триметилпентан	C ₉ H ₁₂	42

Для инструментального контроля углеводородов в отработавших газах отечественная промышленность не выпускает приборов. В ряде зарубежных стран для этих целей применяют главным образом недисперсионные инфракрасные (*NDIR*) и пламенно-ионизационные (*FID*) газоанализаторы.

Чувствительность к различным углеводородам пламенно-ионизационных газоанализаторов в отличие от инфракрасных более равномерна. На показания прибора влияет лишь содержащийся в пробе кислород.

При ИК методе чувствительность приборов зависит от молекулярных характеристик анализируемых газов. Только компоненты, подобные по структуре калибровочному газу, будут определяться достаточно точно. При использовании в *NDIR* газоанализаторах для калибровки *n*-гексана концентрация насыщенных углеводородов (кроме метана) определяется с погрешностью 3 - 5% [2]. При определении концентрации непредельных углеводородов погрешность достигает 10 - 30%, а при определении концентрации ароматических углеводородов 3 - 5%. Кроме того, *NDIR* газоанализатор чувствителен к содержанию в анализируемой среде двуокиси углерода и паров воды. В табл.2 приведены данные о чувствительности *NDIR* и *FID* газоанализаторов [5].

Таблица 2

Углеводород	Формула	Чувствительность, %	
		<i>NDIR</i>	<i>FID</i>
метан	CH_4	29	102,5
этан	C_2H_6	93,3	99,2
пропан	C_3H_8	105,8	99,1
<i>n</i> - бутан	C_4H_{10}	105,8	101,6
<i>i</i> - бутан	C_4H_{10}	102,9	95,9
<i>o</i> - пентан	C_5H_{12}	103,2	99,2
<i>n</i> - гексан	C_6H_{14}	100	100
<i>n</i> - гептан	C_7H_{16}	100	98,1
<i>i</i> - октан	C_8H_{18}	89,5	95,8
этилен	C_2H_4	7,4	101,9
пропилен	C_3H_6	31,1	102,9
<i>i</i> - бутан	C_4H_8	45	98,5
циклогексан	C_6H_{12}	106	95

Анализ современных направлений развития спектральных приборов газового анализа свидетельствует о перспективности широкого внедрения фильтровых инфракрасных газоанализаторов, отличающихся

высокой избирательностью, стабильностью, высокой надежностью и пренебрежимо слабой зависимостью показаний от производственной вибрации.

ГГО совместно с ЦНИТА провели работы по изучению перспективности применения таких газоанализаторов для контроля углеводородов в отработавших газах автомобилей, для чего был изготовлен инфракрасный газоанализатор ИНГА [3, 4]. Газоанализатор углеводородов ИНГА-СН построен по двухлучевой схеме с одним твердотельным фотоприемником. В качестве фотоприемника был использован серийно выпускаемый фоторезистор СФ 4 - 3, имеющий максимум чувствительности на длине волны 3,6 мкм (при комнатной температуре). Фоторезистор характеризуется высокой пороговой чувствительностью ($\Phi_{\text{пор.}} = 10^{-8}$ Вт · Гц^{-1/2}) и малой инерционностью ($\tau \leq 10^{-4}$ с). К его недостаткам можно отнести низкую стабильность и зависимость чувствительности от температуры (25 % на 10 °С), однако последнее может быть скомпенсировано термостабилизацией фоторезистора и калибровкой прибора с помощью заслонки, вводимой в рабочий тракт газоанализатора каждые полчаса. В качестве селективного элемента был применен интерференционный фильтр, спектральная характеристика которого выбиралась в соответствии со спектром поглощения углеводородов в отработавших газах двигателя автомобиля, работающего в режиме холостого хода (рис. I).

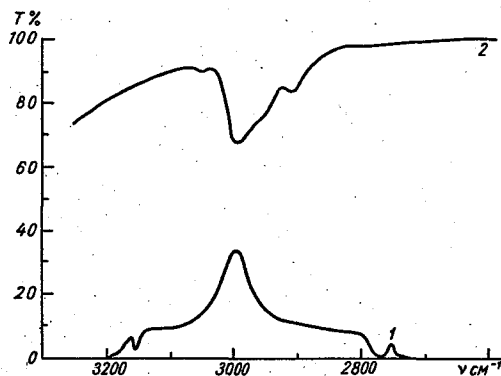


Рис. I. Спектральные характеристики фильтра и отработавших газов автомобиля.

1 - полоса пропускания фильтра; 2 - спектр поглощения углеводородов в выбросах автомобиля в режиме холостого хода

Сочетание фильтра с избирательным фотоприемником позволило выделить нужный спектральный интервал 2,9 – 3,6 мкм, в котором поглощение определяется только углеводородами. Другие составляющие отработавших газов (пары воды, окись и двуокись углерода) не имеют полос поглощения в этом спектральном интервале.

С целью изучения вклада основных углеводородов в выходной сигнал фильтрового газоанализатора типа ИНГА, были проанализированы спектральные характеристики каждого из них. Для этого с помощью спектрофотометра *SPECORD-71 IR* были прописаны спектры пропускания метана, этана, пропана, *n*-бутана, изобутана, этилена и пропилена. Спектры анализировались в 10 см кювете при атмосферном давлении с разрешением 40 см^{-1} на длине волны 3000 см^{-1} . Спектры поглощения этих газов изображены на рис.2.

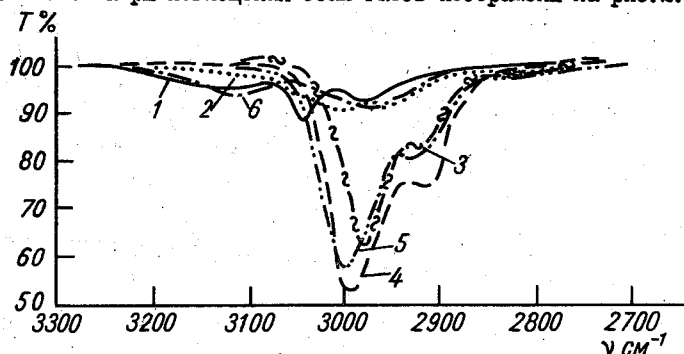


Рис.2. Спектры поглощения простейших углеводородов.

1 - метан, 2 - этан, 3 - пропан, 4 - бутан,
5 - изобутан, 6 - пропилен.

Анализ спектров показывает, что газоанализатор должен обладать наибольшей чувствительностью к пропану и бутану. Чувствительность прибора к метану должна быть в 5 – 10 раз меньше, к этану – еще меньше из-за его малого коэффициента поглощения. Проведенные испытания на бинарных газовых смесях подтвердили результаты анализа спектров (табл. 3). В табл.3 приведены также показания отечественного инфракрасного газоанализатора ОА-5501, калиброванного по метану.

Таблица 3

Компонент	Концентрация, млн^{-1}	Показания газоанализаторов млн	
		ИНГА	ОА-5501
I	2	3	4
метан	750	760	750

I	2	3	4
этилен	3000	1800	200
этан	1000	4200	300
пропан	2000	10000	640
n-бутан	1000	7000	260
i-бутан	2930	10000	1000

Испытания показывают, что фильтровые газоанализаторы имеют более высокую чувствительность к различным углеводородам, чем оптико-акустический; это обеспечивается выбором параметров полосового фильтра (шириной пропускания $\Delta\lambda$ и центральной длиной волны λ_0).

Однако в силу того, что углеводороды имеют различные коэффициенты поглощения, добиться одинаковой чувствительности не представляется возможным.

В спектральном диапазоне вблизи длины волны 3,4 мкм можно одновременно определять сумму различных углеводородов; возможна также и избирательное определение отдельных углеводородов, содержащихся в отработавших газах (метана - $\lambda = 7,7$ мкм, этилена - $\lambda = 10,5$ мкм, пропилена - $\lambda = 11,5$ мкм и др.), соответствующим образом выбирая спектральные характеристики фильтров.

Весьма важной задачей является обоснование и выбор калибровочного газа для газоанализаторов суммы углеводородов. При выборе калибровочного газа необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

- полоса поглощения калибровочного газа должна лежать в пределах полосы поглощения анализируемой смеси;

- используемые анализаторы (NDIR, FID и фильтровые) должны обладать высокой и по возможности одинаковой чувствительностью к выбранному калибровочному газу;

- калибровочный газ должен иметь низкую температуру кипения; это существенно облегчит его приготовление и хранение.

Для калибровки газоанализаторов используют смеси, приготовляемые на основе следующих углеводородов: метана, пропана, гексана. Наиболее полно вышеуказанным требованиям отвечает пропан. Полоса поглощения пропана находится в диапазоне спектров анализируемых углеводородов. Это обеспечивает высокую и практически одинаковую чувствительность к этому компоненту рассматриваемых типов газоанализаторов. Температура кипения пропана составляет - 42 °С, что облегчает приготовление и хранение газовых смесей в любом

диапазоне концентраций.

Поверочные газовые смеси пропана с азотом или воздухом выпускаются в необходимом ассортименте Балашихинским кислородным заводом. В других странах для анализа отработавших газов двигателей внутреннего сгорания также используют пропан в качестве калибровочного газа.

Таким образом, проведенная работа дает основания для использования газоанализатора ИНГА при определении суммы углеводородов.

В качестве калибровочного газа для настройки и поверки газоанализаторов суммы углеводородов в отработавших газах двигателя автомобиля целесообразно применять пропан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеоздат, 1975, 448 с.
2. Звонков В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Машиностроение, 1973, 200 с.
3. Демочка О. И., Красов В. И., Максимов В. И., Цветков В. А., Чистяков А. Н. Измерительная аппаратура для контроля выхлопных газов автомобилей. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 90 - 94.
4. Максимов В. И., Цветков В. А. Спектральный газоанализатор эмиссионных газов. - Труды ГГО, вып. 453, с. 84 - 89.
5. Настоящее положение в Японии анализа отработавших газов автомобильных двигателей. Приборостроитель Хориба, ЛТД, 1971. - 61 с.
6. Сарлан J. D. Causes and control of automotive emissions. - Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1962-63, № 7, p. 242-262.

В. И. Красов, В. Б. Милев, Ю. А. Дергунов,
В. Д. Куксинский

КОНТРОЛЬ ВЫБРОСОВ ТЭЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНЦИЙ КОНТРОЛЯ

Контроль промышленных выбросов с помощью автоматизированных газоаналитических средств позволяет не только регистрировать точечные выбросы вредных веществ в атмосферу, но и использовать получаемую информацию для регулирования технологических процессов.

Специфика технологического процесса выработки электроэнергии обуславливает большие объемы дымовых газов, высокие концентрации загрязняющих компонентов, сильную запыленность и высокую влажность газовых потоков [5].

В связи с этим измерительный комплекс системы контроля выбросов предприятий Минэнерго должен обеспечивать, во-первых, репрезентативный непрерывный отбор проб из влажных и сильно запыленных газовых потоков с относительно высокой температурой; во-вторых, непрерывную и одновременную регистрацию концентрации основных загрязняющих компонентов в широких диапазонах изменения этих концентраций.

Проблема автоматизации контроля выбросов осложняется отсутствием специальных автоматических газоанализаторов промышленных выбросов практически на все приоритетные загрязняющие компоненты.

Для её решения в ГГО совместно с НИИОГАЗ разработана методика автоматического контроля промышленных выбросов с использованием газоанализаторов контроля загрязнения атмосферы [1, 2]. Для экспериментальной отработки методики была организована опытная станция автоматизированного контроля.

На рис. 1 представлена схема измерительного комплекса станции. В состав комплекса входят следующие основные блоки: отбора пробы (ОП) и пробоподготовки (ПП), газового анализа (ГА), регистрации температуры (РТ), измерения скорости газового потока (ИС).

Блок отбора пробы служит для отбора пробы и представляет собой пробоотборный зонд. Зонд специальной конструкции [1] позволяет отбирать пробу с температурой до + 300 °С практически любой запыленности и влажности.

Блок пробоподготовки служит для транспортировки, охлаждения, осушки и очистки пробы. Так как концентрации измеряемых компонентов в дымовых газах значительно превосходят максимальные концентрации, воспринимаемые используемым газоанализатором, в блок газовой подготовки включены устройства разбавления пробы.

В качестве измерительных приборов применяются серийно выпускаемые газоанализаторы ГМК-3 и ГИП-1 и опытный образец газоана-

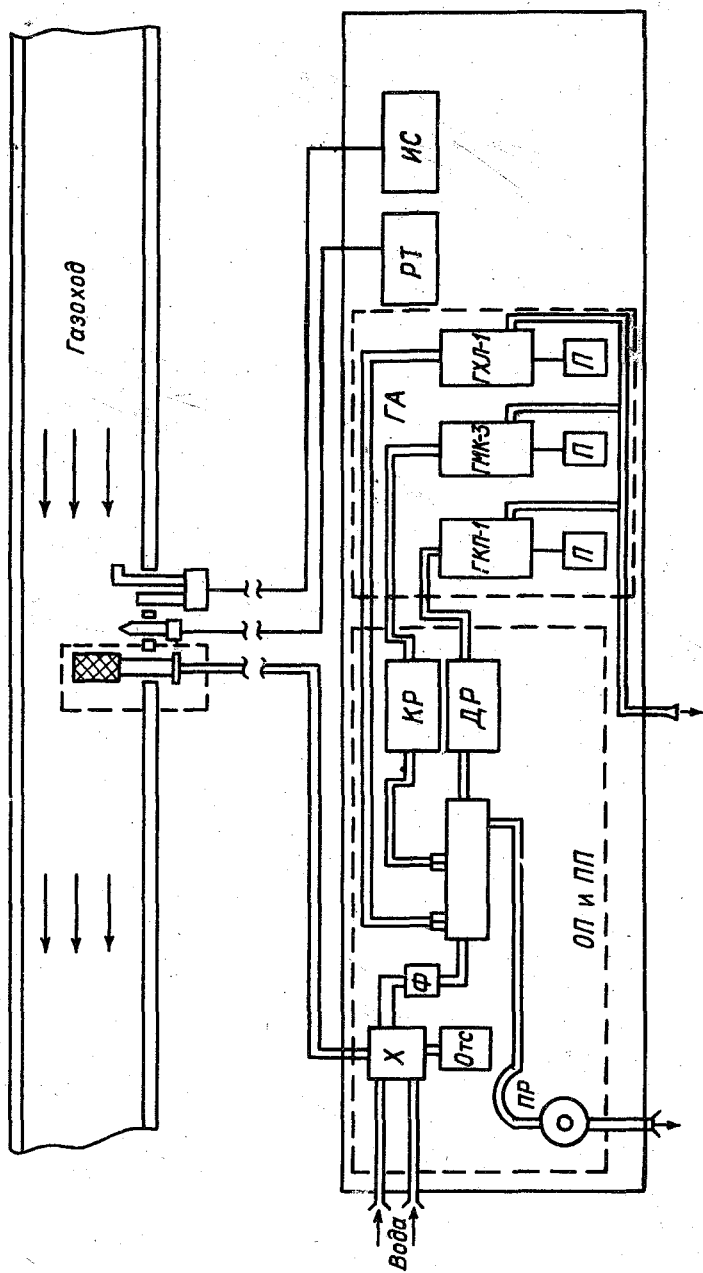


Рис. 1. Схема измерительного комплекса. X - холодильник, ОТС-отстойник, Ф - фильтр, ДР - диффузионный разбавитель, КР - капиллярный (динамический) разбавитель, ПР - побудитель расхода, П - потенциометр.

лизатора ГХЛ-I [3, 4].

Измерение температуры газового потока осуществлялось с помощью термопары, а регистрация скорости - посредством пневмометрических трубок.

Все блоки станции, за исключением блока пробоотбора, конструктивно размещены в павильоне комплектной лаборатории Пост-I [4].

Экспериментальные работы со станцией контроля промышленных выбросов проводились на базе ТЭЦ-I7 Ленэнерго.

Источником выбросов вредных веществ в атмосферу являлся котлоагрегат марки БКЗ 320 - I40 ПТ № 4, производительностью 320 тонн пара в час [5].

В данном котлоагрегате используются два вида топлива: уголь новокузнецкий - марки «Т» и природный газ. Золоулавливание осуществляется двумя электрофильтрами типа ПГД. Отвод дымовых газов - принудительный - посредством двух дымососов. Схема отвода дымовых газов от котлоагрегата БКЗ 320 - I40 ПТ (КА) в атмосферу приведена на рис.2. За конвективной поверхностью нагрева котла I по ходу дымовых газов установлены пароперегреватель 2, водяной экономайзер и воздухоподогреватель 3, два электрофильтра 4 (параллельно) и два дымососа двустороннего всасывания 6. Газы, прошедшие дымососы, отводятся по двум горизонтальным газоходам 7 в железобетонную дымовую трубу 8 высотой 120 м и диаметром в устье 6 м. Для того чтобы давление и расход газа в обоих газоходах были одинаковыми, их соединяют уравнивающей перемычкой 5.

На первом этапе исследований отбор проб для измерения концентраций окиси углерода, двуокиси серы и окислов азота осуществлялся постом контроля выбросов (ПКВ) на горизонтальном участке левого газохода на расстоянии от дымососа, равном примерно 10 эффективным диаметрам газохода.

Все получаемые результаты сопоставлялись с оперативной информацией о текущих параметрах технологического процесса (с температурой отходящих газов, концентрацией остаточного кислорода, производительностью котла), поступающей с замерных постов (ЗП).

Анализ результатов, полученных за время опытной эксплуатации станции, позволил выявить существенное непостоянство во времени концентрации вредных веществ в выбросах.

На рис.3 представлены типичные суточные зависимости концентрации CO и SO_2 от времени при работе котлоагрегата на смеси угольной пыли и природного газа.

Как следует из рис.3, если концентрация SO_2 незначительно меняется в течение суток ($30 - 50 \text{ мг/м}^3$), то концентрация CO может колебаться в больших пределах ($20 - 300 \text{ мг/м}^3$), причем резкие повышения концентрации носят кратковременный характер. Отметим еще,

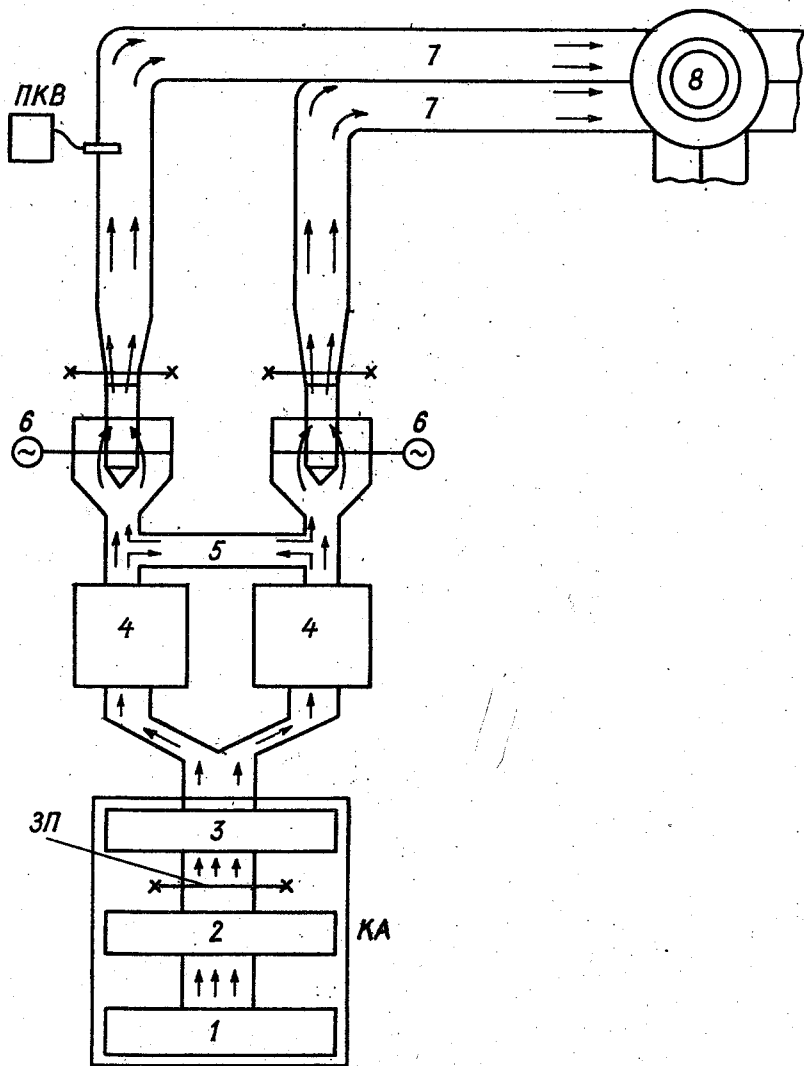


Рис.2. Схема отвода дымных газов от котлоагрегатов № 4.

что присутствие в отходящих газах окиси углерода указывает на неоптимальный режим горения. Таким образом, регистрация концентрации CO в дымовых газах позволяет оперативно осуществлять оптимизацию технологического процесса. На наличие функциональной связи концентрации CO в отходящих газах с параметрами горения указывают и зависимости, приведенные на рис.4. На рис.4 а представлены временные зависимости концентрации CO и SO₂ при уменьшении концентрации остаточного кислорода. Как видно из рисунка, даже незначительное (на 0,5%) уменьшение остаточного O₂ (что соответствует уменьшению коэффициента избытка воздуха L на 4%) приводит к резкому увеличению (в 3 - 4 раза) содержания CO.

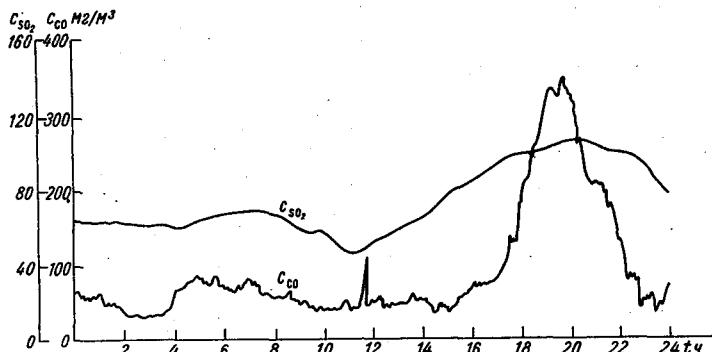


Рис.3. Типичные временные зависимости концентраций CO и SO₂.

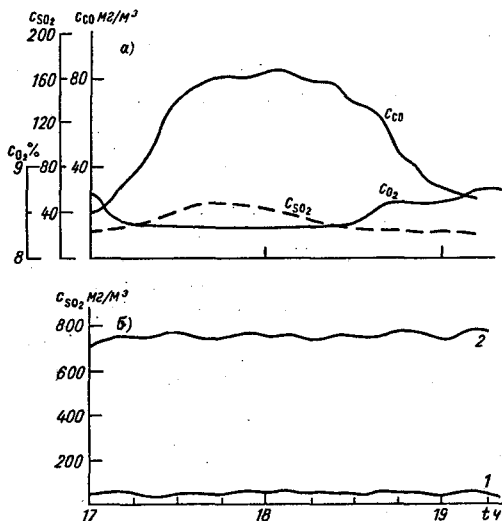


Рис. 4. Зависимости концентраций CO и SO₂ от времени при изменении параметров горения (а) и вида топлива (б)

Существенное повышение концентрации SO_2 зарегистрировано при переходе работы котлоагрегата со смеси угольной пыли и природного газа (рис. 4.6, кривая 1) на уголь (кривая 2).

Таким образом, в результате опытной эксплуатации измерительного комплекса на ТЭЦ-17 выявлена возможность создания автоматизированной станции контроля промышленных выбросов на основе применения газоанализаторов контроля загрязнения атмосферы ГМК-3 и ГАП-1, что создает основу для широкого внедрения уже в настоящее время таких станций контроля на предприятиях Минэнерго. Инструментальный контроль выбросов позволяет поддерживать оптимальный режим технологического процесса, который характеризуется как минимальными выбросами вредных веществ, так и минимальными затратами на единицу выработанной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дергунов Д. А., Куксинский В. Д., Осипов В. М. Инструментальный контроль двуокиси серы и окиси углерода в промышленных выбросах. - См. наст. сб.
2. Дудкин Н. А., Беренцвейг Б. Р., Вечтомов С. М., Миляев В. Б. Выбор характеристик диффузионных разбавителей для контроля промышленных выбросов. - См. наст. сб.
3. Куриный В. К., Кравченко А. А., Миляев В. Б., Сенков Н. Г. Хемилуминесцентный газоанализатор для измерения окислов азота в атмосферном воздухе. - Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 41 - 47.
4. Руководство по контролю загрязнения атмосферы/Под ред. М. Е. Берлянда. - Л.: Гидрометеиздат, 1979, 448 с.
5. Энергетика и охрана окружающей среды/Под ред. Л. И. Кроппа. - М.: Энергия, 1980.

В. М. Гордон, Е. К. Иванов, В. Д. Куксинский,
В. Б. Милеев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТАВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Одной из главных проблем в области охраны окружающей среды является защита атмосферного воздуха от загрязнения, связанного с процессами сжигания топлива на тепловых электростанциях.

В выбросах ТЭС содержатся основные загрязняющие вещества — двуокись серы, окись азота, окись углерода, а также пыль. В зависимости от режима работы ТЭС и вида топлива концентрация указанных компонентов в выбросе существенно меняется. Так, например, при уменьшении избытка воздуха в зоне горения на 10% концентрация окиси азота в дымовых газах увеличивается в три раза [1], но одновременно из-за неполного сгорания увеличивается содержание окиси углерода.

Контроль за правильностью технологического процесса сжигания топлива на большинстве ТЭС осуществляется по содержанию остаточного кислорода в отходящих дымовых газах. Номинальное значение концентрации кислорода в соответствии с режимной картой котлоагрегата поддерживается регулированием избытка воздуха в топке, случайное возникновение химического недожога топлива определяется по содержанию сажи в дымовых газах.

Одновременная непрерывная регистрация концентрации кислорода, окислов углерода и окислов азота в дымовых газах котлоагрегатов позволяет производить регулирование процесса горения с целью уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, не ухудшая экономических показателей производства электроэнергии.

Для решения этой задачи необходимо оснащение предприятий Минэнерго газоаналитической аппаратурой локального контроля состава отходящих дымовых газов в газоходах котлоагрегатов. Одним из решений этой проблемы может быть дистанционный контроль выброса на выходе из дымовых труб.

Как следует из зарубежных источников, результаты измерения состава выбросов ТЭС дистанционными лазерными средствами [4, 5] согласуются с результатами измерений концентрации загрязнений в дымовых газах локальными средствами.

В СССР разработаны экспериментальные макеты СКР-лидаров для контроля промышленных выбросов (ПВ) в атмосферу. Наиболее совершенным среди известных является макет лидара ИС АН СССР [2]. Его чувствительность по компонентам ПВ $0,4 - 2 \text{ г/м}^3$ при дальности зондирования 200 м и пространственном разрешении 20 м.

Эксперименты показали, что возможно достижение чувствительности лидара 30 - 100 мг/м³; ограничение чувствительности обусловлено флуоресценцией атмосферы и выбросов.

Лидар, разработанный ГГО совместно с другими организациями, имеет следующие технические характеристики, обеспечивающие при дальности 300 м и пространственном разрешении 15 м контроль состава выброса ТЭС:

длина волны излучения, нм	266 ± 0,2
средняя мощность излучения, Вт	0,6 ± 1
частота следования импульсов, Гц	10 - 100
расходимость по уровню 0,5, мрад	4
световой диаметр главного зеркала приемного телескопа, мм	400
фокусное расстояние телескопа, м	3 - 35
пределы фокусировки по дальности, м	60 - 400
обратная линейная дисперсия монохроматора, нм/мм	0,6

Наличие пяти приемных каналов в системе регистрации лидара обеспечивает следующие режимы работы: регистрация всех сигналов с одного участка трассы зондирования с разрешением 15 м, регистрация сигналов с трех участков трассы с разрешением 15 м, измерение аналитического сигнала на линии комбинационного рассеяния компонента ПВ без учета фоновых сигналов (например, фона неба).

Зондирование атмосферы с помощью СКР-лидара производится импульсным лазерным излучением с последующим спектральным анализом рассеянного излучения. О качественном и количественном содержании примесей в атмосфере судят по интенсивности спектральных линий, смещенных по частоте относительно зондирующего излучения. Концентрация примесей определяется путем сравнения сигналов, полученных с одного и того же участка трассы зондирования, от примесей и от атмосферного азота. Расчет производится по формуле:

$$C_x = \frac{I_x \sigma_{N_2} C_{N_2}}{I_{N_2} \sigma_x},$$

где C_x и C_{N_2} - концентрация анализируемой примеси и атмосферного азота, I_x и I_{N_2} - интенсивности сигналов, σ_x и σ_{N_2} - сечения комбинационного рассеяния. Значения σ_{N_2} и σ_x измерены в лабораторных условиях при возбуждении комбинационного рассеяния газов: CO, CO₂, O₂, CH и паров воды лазерным излучением с длиной волны 266 нм.

Измерение концентрации указанных загрязняющих веществ в выбросах дымовых труб ТЭС с помощью передвижного СКР-лидара производились одновременно с локальным контролем концентрации

тех же веществ в газоходах. Инструментальные методы измерения двуокиси серы и окиси углерода в выбросах приборами ГМИ-1 и ГМИ-3 описаны в настоящем сборнике. Для автоматического измерения концентраций окислов азота был использован опытный образец газоанализатора ГХЛ-1, принцип действия которого основан на измерении интенсивности хемиллюминесценции, возникающей при реакции окиси азота с озоном. Прибор позволяет измерять концентрации NO и $(NO + NO_2)$ в пробе после восстановления двуокиси азота [3].

Концентрация углекислого газа в газоходе измерялась химическим методом и с помощью шахтного интерферометра ШИ-2, концентрация кислорода – газоанализатором ГХЛ-3М и кислородомером МН-5107.

Результаты измерения концентрации примесей в выбросах дымовых труб высотой 70 и 120 м (расстояние от лидача до устья труб соответственно 120 и 270 м) представлены в таблице.

Таблица

Концентрации компонентов ПВ ($г/м^3$) в дымовых газах ТЭС при отсутствии водяного аэрозоля над устьем труб в шлейфе

Топливо	Высота трубы, м	Метод измерения	Компоненты ПВ						
			SO_2	CO	CO_2	H_2O	$C_n H_m$	NO	O_2
Уголь	120	дистанционный	0,4-0,5	0	70-110	-	-	-	130
		локальный	0,5-0,6	0,03-0,05	100	-	-	-	90-110
Мазут	70	дистанционный	2,0	5 - 7	-	37-40	1,5-1,7	1,8	210
		локальный	2,0-2,3	10	-	-	-	-	150

Из таблицы видно удовлетворительное совпадение результатов дистанционных и локальных измерений концентраций двуокиси серы, окиси углерода и кислорода, что доказывает возможность использования дистанционного метода и аппаратуры для контроля многокомпонентных газовых выбросов ТЭС.

Передвижной СКР-лидар может быть использован для инспекционного контроля промышленных выбросов в атмосферу предприятиями Минэнерго после доработки конструкции с целью улучшения эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова С. Т., Дергачев Н. Ф., Крейдина Т. М. Выбросы тепловых электростанций и мероприятия по их снижению. Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. - Л.: Гидрометеиздат, 1977, с.44 - 48.
2. Вайнер Д.Г. и др. Метеорология и гидрология 1980, № 12, с.39 - 47.
3. Куриный В. К., Кравченко А. А., Милеев В. Б., Сенков Н. Г. Хемиллюминесцентный газоанализатор для измерения окислов азота в атмосферном воздухе. - Труды ГГО, 1981, вып.453, с.41 - 47.
4. Raungartner R. A. et al. A comparison of lidar and air quality station NO₂ measurements. - JAPCA, 1979, 29, № II, II62 - II65.
5. YAG laser radar to observe pollution. - Look Japan, 1971, vol.16, № 184, p.15.

О. Н. Гейко, В. Ф. Гончарук, Е. Г. Мазан,
В. В. Михайлов, А. И. Разливанов,
Е. Г. Тохтуев

ОБРАЗЦОВЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР НА УГЛЕВОДОРОДЫ

В нашей стране проблеме контроля загрязнения окружающей среды уделяется большое внимание. В результате совместных работ в рамках этой проблемы организаций Госкомгидромета и Минприбора был разработан ряд приборов, предназначенных для контроля загрязнения атмосферы. Внедрение этих приборов на сети контроля загрязнения атмосферы позволит решить задачу планомерного исследования загрязнения окружающей среды.

Широкое внедрение разрабатываемой Минприбором газоаналитической аппаратуры требует дальнейшего совершенствования метрологического обеспечения. Это связано с увеличением как в количественном, в связи с ростом потребления эталонных газовых смесей, так и в качественном отношении, ввиду возросших требований к чувствительности аппаратуры.

Описываемый в настоящей статье прибор предназначен для метрологического контроля и аттестации эталонных газовых смесей, содержащих углеводороды.

Как известно, образцовый газоанализатор должен отвечать следующим требованиям: обладать высокой чувствительностью и селективностью, малой погрешностью измерений и высоким уровнем автоматизации.

Для осуществления указанных требований, разработчиком проведены исследования по выбору физического метода определения концентрации углеводородов и минимизации погрешности измерений и обработки информации.

Исследования, проведенные разработчиком при выборе метода анализа газового состава, заложенного в основу измерительного тракта прибора, показали, что наиболее полно, поставленным требованиям отвечает метод прямого поглощения оптического излучения с использованием, в качестве источника излучения лазера [1]. Выбранный метод анализа, учитывает назначение прибора и определяет схему его построения (рис. 1).

Схему условно можно разделить на три блока: оптический, включающий в себя источник излучения 1, модулятор 2, светоделительную пластину 3, измерительные кюветы 4-7, многоходовую измерительную кювету 8, расположенные последовательно по ходу пучка излучения фотоприемники 9, 10; газовый включающий газопроводы и газовые клапаны II для коммуникации измерительных

квет, и блок обработки, состоящий из измерительного преобразователя 13, двух аналогоцифровых преобразователей 14, 15 и специализированного вычислительного устройства „Волга“ 12 .

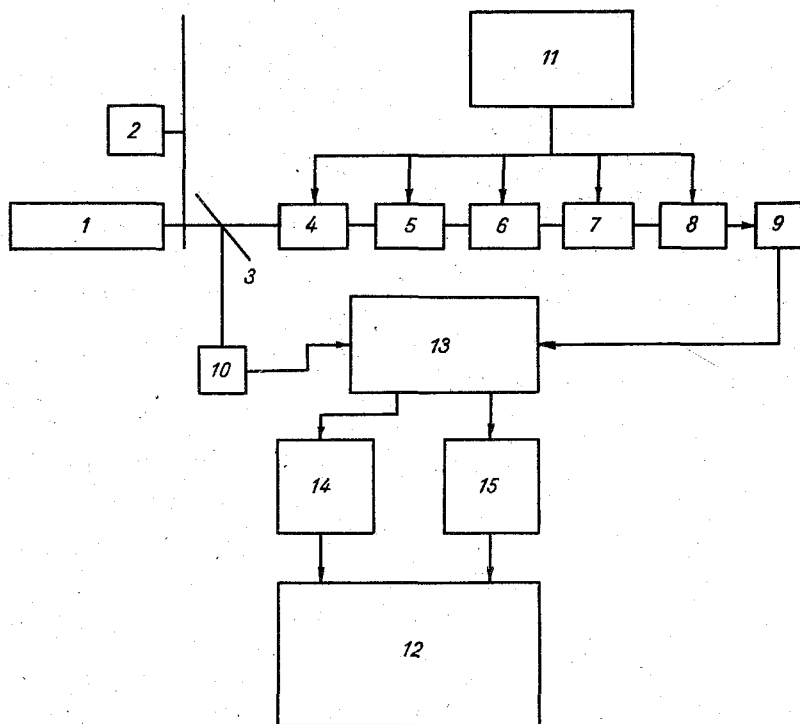


Рис.1. Схема образцового лазерного газоанализатора.

Работа прибора осуществляется следующим образом: на подготовительном этапе производится откачка газовых квет с последующим измерением пропускания оптического тракта, которое определяется при помощи вычислителя согласно формуле:

$$C_0 = \frac{1}{K_0 L p t} \ln \frac{U_{01}}{U_{02}},$$

где K_0 - коэффициент поглощения газа,
 L - оптическая длина кветы,
 C_0 - поправка, сохраняемая в памяти вычислителя при последующих измерениях,

p, t - поправочные коэффициенты, учитывающие влияние давления и температуры,

U_{O_1}, U_{O_2} - электрические сигналы от фотоприемников 9 и 10 соответственно.

Далее, при переходе непосредственно к измерению производится заполнение одной из газовых кювет, в зависимости от предполагаемой концентрации углеводородов в анализируемой газовой смеси, и измерение поглощения излучения источника с последующим определенным вычислителем искомой концентрации C_x согласно формуле:

$$C_x = \frac{1}{K_0 L p t} \ln \frac{U_{O_1}}{U_{O_2}} - C_0$$

Вывод информации о концентрации углеводородов в анализируемой смеси осуществляется либо на табло (цифровой индикатор вычислительного устройства), либо на цифropечатающее устройство.

Общий вид образцового газоанализатора на углеводороды представлен на рис. 2.

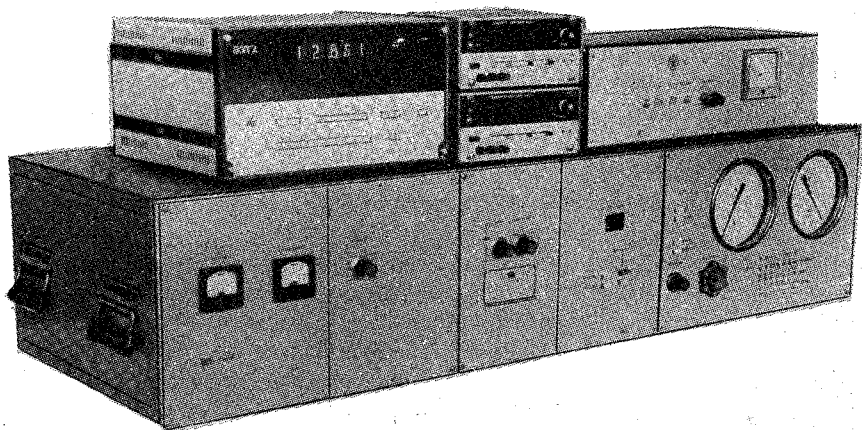


Рис. 2. Общий вид образцового лазерного газоанализатора.

Входящий в комплект прибора аналитический блок представляет собой жесткий каркас, в котором закреплены многоходовая кювета, являющаяся одновременно опорным элементом для крепления газовых кювет, фотоприемников и активного элемента лазера, газовая схема с системой клапанов и схемой управления, а также электронные блоки предварительной обработки информации и управления. На лицевую панель блока вынесены органы управления и элементы контроля.

При создании прибора особое внимание было уделено оптимизации его параметров с точки зрения минимизации погрешности.

Как известно, относительная погрешность приборов, принцип действия которых основан на законе Бера имеет вид:

$$\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 = \left(\frac{\Delta K_0}{K_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \frac{(\Delta Y/Y_0)^2 + (\Delta Y/Y)^2}{\ln^2 \Delta Y_0/Y_0},$$

где ΔC - погрешность измерения концентрации анализируемого компонента газовой смеси; ΔK_0 - погрешность определения коэффициента поглощения газа K_0 ; ΔL - погрешность определения оптической длины L пути излучения в анализируемой смеси; $\Delta Y_0, \Delta Y$ - погрешности измерения потоков излучения до кюветы Y_0 и после кюветы Y .

Первый член приведенного выражения определяет вклад в погрешность измерения нестационарности условий измерения, два других - погрешность измерительного тракта, обусловленную шумами электрической схемы, дрейфом характеристик приемников излучения и ошибками вычислений. Методы уменьшения влияния погрешности измерительного тракта традиционны, достаточно хорошо известны и дополнительного изложения не требуют. Что касается составляющей погрешности, обусловленной влиянием условий измерения, то её возникновение следует пояснить применительно к данному конкретному прибору. В виду малой ширины линий излучения лазера, относительно полосы поглощения анализируемого газа, и сильной зависимости последней от давления (рис.3), коэффициент поглощения при использовании нестабилизированного по частоте лазера, является сложной функцией от давления и частоты излучения лазера [1].

Область изменения коэффициента поглощения метана при случайном изменении частоты излучения нестабилизированного гелий-неонового лазера ЛГ-Метан-1 представлена на рис.4. Как видно из рисунка, для оптимизации условий измерения, и, следовательно, минимизации ошибки определения коэффициента поглощения метана необходимо поддержание давления анализируемой газовой смеси в области (1,5 - 3,0) 10^3 Па, при этом погрешность прибора, не превышает 2,5 - 5%.

Как показали лабораторные испытания прибора, его параметры в целом удовлетворяют требованиям технического задания.

Прибор позволяет проводить аттестацию поверочных газовых смесей для газоанализаторов:

- контроля суммарной концентрации углеводородов в атмосфере (диапазоны измерения по метану 0 - 10, 0 - 30 и 0 - 100 мг/м^3 при основной приведенной погрешности $\pm 15\%$);

- контроля суммарной концентрации углеводородов в выбросах химических производств (диапазоны измерения по пропану 0 - 200 мг/м^3 при основной приведенной погрешности $\pm 15\%$);

- контроля суммарной концентрации углеводородов в выхлопных газах автомобилей (диапазоны измерения по пропану 0 - 100, 0 - 200 мг/м³, с приведенной основной погрешностью ± 10% и 0 - 500, 0 - 1000, 0 - 2000, 0 - 5000, 0 - 20000, 0 - 100000 мг/м³ при основной приведенной погрешности ± 5%).

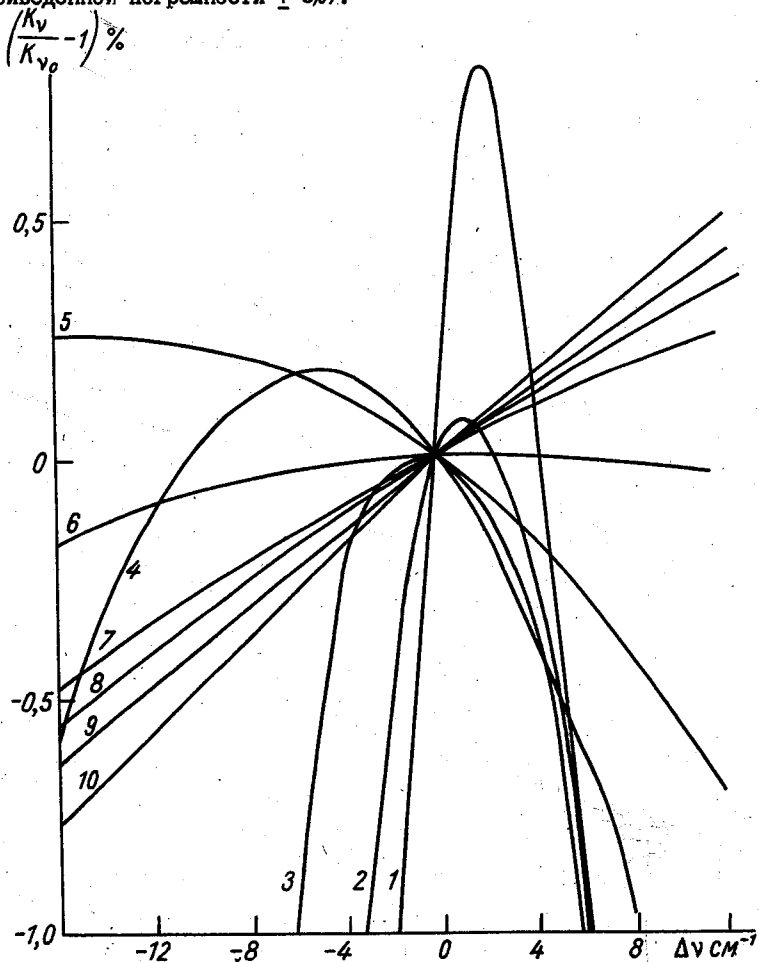


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания метана от частоты при различном давлении:

Кривая	1	2	3	4	5
P гПа	258,25	516,5	723,1	1033	1549
Кривая	6	7	8	9	10
P гПа	2066	2582,5	3099	5165	10330

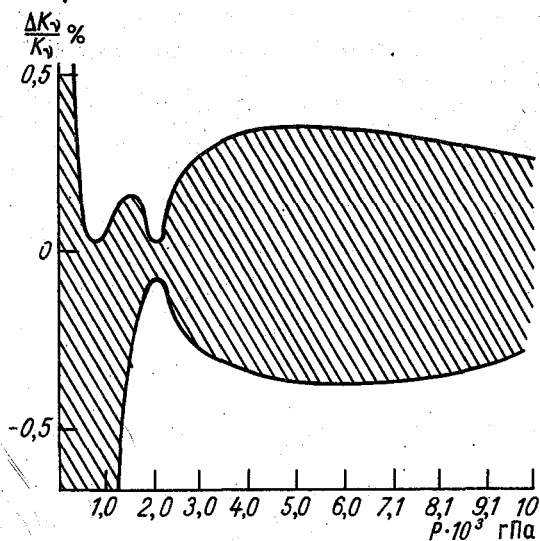


Рис.4. Зависимость погрешности коэффициента поглощения метана от давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Г. Хинкли Э. Д. Ку Р. Т., Келли П. Л. Лазерный контроль атмосферы. - М.: Мир, 1979, с.280 - 340.

СОДЕРЖАНИЕ

В.И.Красов. Контроль и управление качеством воздушного бассейна города	3
А.Н.Ясенский. Формирование структуры системы регулирования качества атмосферы города	18
В.И.Ануфриев. Информационные и структурные вопросы построения автоматизированных систем контроля промышленных выбросов	26
В.А.Глазунов, Ю.В.Федоров, А.Л.Хомяков. Выбор аппаратуры передачи информации в автоматизированной системе контроля загрязнения	34
А.Д.Зив, В.И.Красов, О.К.Тихомирова. Выбор модели загрязнения атмосферы для системы АНКЭС-АГ	40
Ю.В.Львов, Г.А.Горская. О выборе критерия размещения станций контроля загрязнения атмосферы	47
А.Н.Щербань, А.В.Примак, Т.С.Шпилева. К выбору модели размещения периферийных станций в автоматизированных системах контроля загрязнения воздуха	53
В.А.Цветков. Оптимальное проектирование спектральных газоанализаторов	60
К.В.Иванченко, Е.А.Королева, Н.С.Покровская. О возможности использования многокомпонентных спектральных газоанализаторов для контроля загрязнения атмосферы	68
В.А.Цветков, К.В.Иванченко. Сравнительные характеристики спектральных газоанализаторов эмиссионных газов	73
Н.И.Дудкин, Б.Р.Беренцвейг, С.М.Вечтомов, В.Б.Миллев. Выбор характеристик диффузионных разбавителей для контроля источников промышленных выбросов	81
Л.В.Малейко. Методика контроля градуировочной характеристики однокомпонентного ИК-газоанализатора	88
Ю.А.Дергунов, В.Д.Куксинский, В.М.Осипов. Инструментальный контроль двуокиси серы и окиси углерода в промышленных выбросах	92
В.И.Красов, Е.А.Горина. Анализ временных характеристик загрязнения города окисью углерода и сернистым газом по данным АСКЗВ.	98
В.И.Красов, А.М.Бунакова. Оценка влияния загрязнения атмосферы фторхлоруглеводородами на парниковый эффект	105
И.В.Шедова, В.Б.Миллев, Н.А.Паничев. Контроль металлов в атмосфере с применением атомно-абсорбционного метода	109
О.И.Демочка, Л.Л.Волосова, В.И.Максимов, В.А.Цветков. Контроль вредных выбросов автотранспорта с помощью фильтровых газоанализаторов	114

Л.Л.Волосова, О.И.Демочка, Л.Ф.Стрелкова, В.А.Цветков. Контроль углеводородов в выбросах автомобильного транспорта	123
В.И.Красов, В.Б.Миляев, Ю.А.Дергунов, В.Д.Куксинский. Контроль выбросов ТЭЦ с использованием автоматизированных станций контроля	129
В.М.Гордон, Е.К.Иванов, В.Д.Куксинский, В.Б.Миляев. Экспериментальная оценка методов локального и дистанцион- ного контроля состава промышленных выбросов	135
О.Н.Гейко, В.Ф.Гончарук, Е.Г.Мазан, В.В.Михайлов, А.И.Разливанов, Е.Г.Тохтуев. Образцовый газоанализатор на углеводороды	139

Труды ГГО, вып. 477

Методы и аппаратура автоматизированного
контроля атмосферных загрязнений

Редактор М.А.Кустикова. Технический редактор А.И.Кузнецов.
Корректор И.А.Крайнева.

н/к

Подписано в печать 07.02.84. М-16326. Формат 60x90^I/16.
Печать офсетная. Печ.л. 9,5. Кр.-отт. 9,75. Уч.-изд.л. 9,49.
Тираж 730 экз. Индекс МОЛ-ГО. Заказ № 701 . Цена 65 коп.

Заказное.

Гидрометеиздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, д.23.
Московская тип. № 9 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли.

109033, Москва, Ж-33, ул. Волочаевская, д. 40.