

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

*Выпуск*

464

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ  
АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Под редакцией  
канд. техн. наук В. И. КРАСОВА .



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1982

Рассматриваются вопросы контроля и регулирования загрязнения воздушного бассейна города с использованием автоматизированных средств. Приводятся результаты экспериментальной оценки программно-математического обеспечения автоматизированных систем контроля загрязнения, в том числе программ, реализующих математические модели расчета и прогнозирования загрязнения и программ оценки статистических характеристик полей загрязнения.

Значительное внимание уделяется разработке газоаналитической аппаратуры контроля. Приводятся материалы, развивающие оптимальный подход к их проектированию на основе обобщенного показателя качества. Исследуются новые главным образом спектральные методы измерения загрязнения атмосферы и уровня эмиссии источников выбросов, а также возможности повышения их технических и эксплуатационных характеристик.

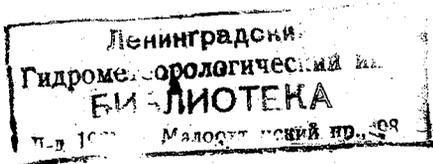
Представляет интерес для научных и технических работников, занимающихся вопросами разработки аппаратуры и методов контроля загрязнения воздушной среды.

The publication is dedicated to the problems of urban air pollution control and regulation using the automated equipment.

Results of experimental estimation of mathematical and software requirements for automated pollution control systems are given including the programs implementing the mathematical models of pollution estimation and prediction and programs for estimating the systematical pollution field characteristics.

Much attention is given to developing gaz-analysers involved in control equipment, the ways to optimise its development on the basis of the generalised efficiency quotient are described. Some of new, mainly spectral methods of air pollution and source emission level measurement are investigated, as well as the problems of improvement of its technical and performance requirements.

The publication will be of interest to researchers and engineering staff engaged in investigating the problems of air pollution control.



*В. И. Красов*

## **ПРИНЦИП АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОГО БАСЕЙНА ГОРОДА**

Созданная в нашей стране система мониторинга окружающей среды, состоящая из двух частей: подсистемы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха и подсистемы мониторинга источников загрязнения, является основой для решения задачи управления качеством атмосферного воздуха [2]. Подсистема мониторинга загрязнения решает задачи получения информации о состоянии атмосферного воздуха в сопоставлении с нормами загрязнения, оценки состояния загрязнения воздуха и выявления источников загрязнения, прогноза и оценки прогнозируемого состояния атмосферы. Подсистема мониторинга источников загрязнения осуществляет контроль за соблюдением норм предельно допустимых выбросов (ПДВ), обеспечивающих установленный уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воздухе.

Основной принцип регулирования загрязнения воздушного бассейна состоит в обеспечении нормированного показателя качества атмосферного воздуха — ПДК путем выполнения предприятиями установленных нормативов по ПДВ и специальных мероприятий по снижению уровня выбросов вредных веществ при получении предупреждения о возможном повышении загрязнения атмосферы вследствие прогнозируемых неблагоприятных метеорологических условий. Регулировать эмиссию выбросов можно путем воздействия на технологический процесс, при котором образуются загрязнители, или путем совершенствования системы пылегазоочистки. Указанный принцип регулирования является исходным для разработки основ построения автоматизированных систем управления качеством атмосферного воздуха промышленных регионов, городов, предприятий.

Сформулированный принцип управления качеством атмосферного воздуха требует для своей реализации двухуровневой системы регулирования. На первом, нижнем уровне должны быть обеспечены выбросы вредных веществ, не превышающие установ-

ленных норм ПДВ; на втором, верхнем уровне должно быть обеспечено снижение установленного уровня ПДВ при угрозе возникновения неблагоприятных для загрязнения воздуха метеорологических условий.

Структурная схема типовой автоматизированной системы управления качеством атмосферы (АСУКА) представлена на рис. 1. В АСУКА входят три подсистемы: контроля и регулирования

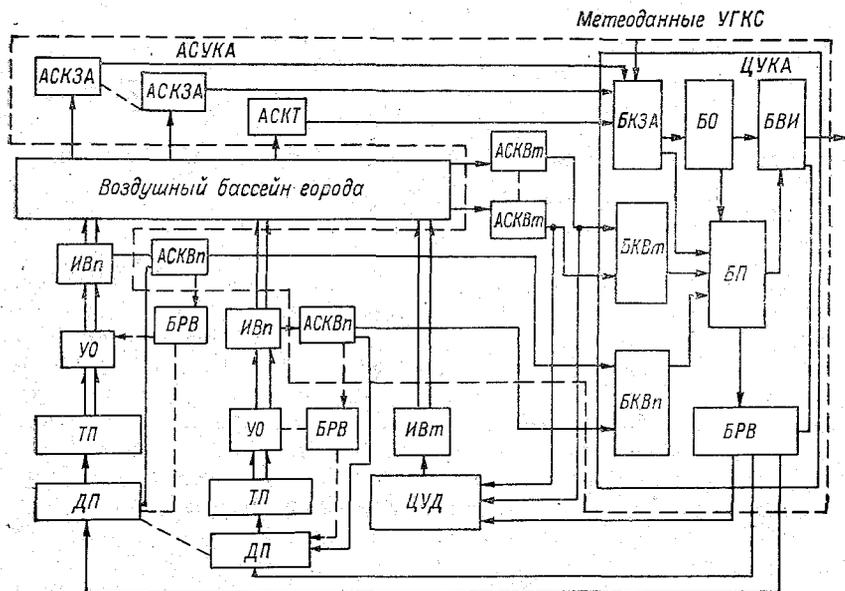


Рис. 1. Структурная схема типовой автоматизированной системы управления качеством воздушного бассейна.

АСУКА — автоматизированная система управления качеством атмосферы, АСКЗА — автоматизированная станция контроля загрязнения атмосферы, АСКТ — автоматическая станция контроля турбулентности, АСКВт — автоматическая станция контроля выбросов транспорта, АСКВп — автоматическая станция контроля выбросов промышленности, ИВп — источник выбросов промышленный, ИВт — источник выбросов транспортный, УО — устройство очистки выбросов, ТП — технологический процесс, ДП — диспетчерский пункт предприятия, ЦУД — центр управления движением, ДУКА — центр управления качеством атмосферы, БКЗА — блок контроля загрязнения атмосферы, БКВт — блок контроля выбросов транспорта, БКВп — блок контроля выбросов промышленности, БО — блок оценки состояния загрязнения атмосферы, БВИ — блок выдачи информации, БП — блок прогноза загрязнения атмосферы, БРВ — блок регулирования выбросов.

загрязнения атмосферы, контроля и регулирования промышленных выбросов и контроля и регулирования автотранспортных выбросов. Наиболее важной из них является подсистема контроля и регулирования источников промышленных выбросов. Отдельные предприятия с источниками, дающими значительный вклад в загрязнение воздушного бассейна, должны оснащаться автоматическими станциями контроля промышленных выбросов (АСКВп) и блоками регулирования выбросов (БРВ), с примене-

нием которых появляется возможность непрерывного контроля выбросов и решения задачи нижнего уровня регулирования качества атмосферы — поддержание выбросов на уровне установленных ПДВ. При этом подсистемы отдельных предприятий представляют собой автономные системы регулирования, воздействующие на интенсивность работы устройств очистки или непосредственно на технологический процесс. При существовании на предприятиях АСУ функции регулирования по информации об уровне выбросов от АСКВп могут быть переданы управляющей системе.

Как неотъемлемая часть для городов с интенсивным автомобильным движением в АСУКА входит подсистема контроля и регулирования транспортных выбросов, вносящих значительный вклад в загрязнение воздушного бассейна города окисью углерода и окислами азота. Она состоит из автоматических станций контроля выбросов транспорта (АСКВт), размещенных на автомагистралях, и центра управления движением, обеспечивающего воздействие на интенсивность движения автотранспорта и перераспределение транспортных потоков по информации от АСКВт.

Важное место в АСУКА принадлежит подсистеме контроля и регулирования загрязнения атмосферы, базой которой является автоматизированная система контроля загрязнения атмосферы, аналогичная, например, системе АСКЗВ [7] или АНКОС-АГ. Эта подсистема разрабатывается в настоящее время промышленностью и предназначается в качестве типовой для применения в различных регионах страны. По информации от автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) и контроля турбулентности приземного слоя атмосферы (АСКТ), а также по метеоданным, получаемым от службы УГКС, в подсистеме осуществляется оценка состояния загрязнения и краткосрочный прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха, которые являются исходными при решении вопроса о необходимости уменьшения выбросов [8].

Для обеспечения решения задачи управления в подсистему включается дополнительная функция по определению необходимой эмиссии вредных выбросов на основе данных прогноза загрязнения и метеорологических параметров воздушной среды. В результате ее решения формируются предложения по величине и пространственно-временной структуре снижения промышленных и автотранспортных выбросов, направляемые в диспетчерские пункты предприятий и центр управления движением. Исполнительная функция реализуется в системах контроля и поддержания ПДВ источников выбросов и, таким образом, обеспечивается решение задачи верхнего уровня регулирования.

Теория автоматического управления позволяет определить методы регулирования, которые должны быть реализованы на обоих уровнях автоматизированной системы управления качеством воздуха. В подсистемах предприятий, обеспечивающих заданный уровень выбросов, таким методом является стабилизация

ПДВ путем регулирования характеристик технологического процесса или уровня очистки отходных газов. Для процесса выбросов вредных веществ из источника, описываемого системой линейных дифференциальных уравнений:

$$A(t)x(t) = kx_3(t) + B(t)U(t), \quad (1)$$

где  $x(t)$  — вектор регулируемой переменной выбросов;  $x_3(t)$  — вектор заданного значения переменной выбросов;  $U(t)$  — вектор управления;  $k$  — общий коэффициент усиления;  $A$  — матрица состояния, отражающая взаимное влияние переменных процесса выбросов и зависящая от свойств источника;  $B(t)$  — матрица управления, определяющая влияние переменных управления на регулируемые переменные выбросов и зависящая от свойств системы управления.

Метод сводится к оптимальной коррекции регулируемых переменных процесса выбросов по критерию качества, определяющемуся функционалом отклонений текущих значений переменных от заданных, соответствующих ПДВ:

$$I = \int_0^T \{ [x_3(t) - x(t)]^2 + [U_0(t) - U(t)]^2 \} dt, \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq T,$$

где второе слагаемое учитывает требование минимизации энергозатрат на управление процессом.

В общем виде задача оптимальной стабилизации или коррекции ПДВ источника формулируется следующим образом: в классе допустимых на интервале управления функций управления, удовлетворяющих ограничениям по величине воздействия, например  $0 \leq U(t) \leq U_{\max}$ , уравнению связи (1) и граничным условиям, накладываемым на переменные регулирования, найти такие их значения  $U(t)$ , при которых критерий качества управления процессом (2) минимизируется. Указанная задача реализуется автономно работающими системами контроля и регулирования предприятий.

Верхний уровень регулирования призван решить более сложную с точки зрения управления задачу — определить оптимальный закон изменения уровня выбросов и, как следствие, программу регулирования источников промышленных и автотранспортных выбросов в зависимости от метеорологического состояния воздушного бассейна. Формулирование ее в терминах теории оптимального управления и анализ основных этапов решения [4] процессом (2) минимизируется. Указанная задача реализуется атмосферного воздуха во всем пространственно распределенном бассейне города, промышленного района и т. д. путем воздействия на систему регулирования выбросов отдельных источников.

Основным вопросом, определяющим правильность постановки задачи, является обоснованный выбор критерия качества управления. Такой критерий должен быть достаточно общим, предста-

вительным для всего управляемого бассейна, учитывающим вклад основных выбросов в фоновое загрязнение воздуха. Широкое применение в практике оценки степени загрязнения атмосферы нашли такие показатели [5], как осредненная по площади и количеству наблюдений за день концентрация, параметр  $P$ , характеризующий меру повышенных концентраций в общем числе измерений за день, а также различные индексы загрязнения, сформулированные на основе национальных стандартов [12] и характеризующие меру соответствия им. Указанные показатели и индексы, являясь объективной мерой загрязнения, тем не менее не применимы в качестве критерия загрязнения воздуха в автоматизированных системах управления, так как не являются по своей сути оперативными и не позволяют учесть пространственные характеристики поля. Более эффективным представляется средний взвешенный по площади и усредненный по времени показатель [6]:

$$I = \frac{1}{S_0 T} \int_T^t \int_S c(a) da dt, \quad (3)$$

где  $S_0$  — площадь, на которой осуществляется управление;  $c(a)$  — уровень загрязненности в точке  $a$ ;  $T$  — контролируемый промежуток времени.

Показатель (3) для целей управления можно записать в следующем виде:

$$I = \frac{1}{S_0 T} \int_0^t \int_S \int_S |c_i^*(x, y) - c_i(x, y, t)|^2 dx dy dt, \quad (4)$$

сделав его для удобства управления квадратичным.

Теперь задача оптимального управления сводится к определению закона управления, т. е. программы изменения уровня выбросов в пространстве и во времени с учетом ограничений, удовлетворяющих дифференциальному уравнению объекта управления воздушного бассейна [4]. При этом обеспечивается минимизация критерия качества [2]. Особенностью задачи, осложняющей ее решение, является многомерный характер системы управления, проявляющийся во взаимосвязи управляющих воздействий отдельных систем регулирования на состояние воздушной среды. Обе сформулированные задачи оптимального управления сводятся к вариационным двухточечным задачам и могут быть решены известными методами оптимального управления.

Следует отметить, что регулирование качества атмосферного воздуха путем регулирования выбросов уже находит в настоящее время применение. В соответствии с рекомендациями [5] на ряде предприятий страны разработана и осуществляется система мероприятий по сокращению выбросов при поступлении информации метеослужбы о неблагоприятных для загрязнения воздуха условиях погоды.

Управление качеством атмосферного воздуха в пределах воздушного бассейна города с использованием энергетической системы, состоящей из группы ТЭЦ [10], представляет пример реализации оптимального регулирования поля загрязнения атмосферы по данным прогноза, использующего информацию со станций контроля загрязнения. Оптимальные исправляющие воздействия в виде временных графиков производства энергии ТЭЦ обеспечивают требуемый спрос на электроэнергию при одновременном сохранении нормированного уровня загрязнения.

Опыт применения систем управления качеством воздушного бассейна промышленного региона в Японии [11], в котором используется информация с подсистем контроля загрязнения атмосферы и контроля выбросов источников десятков предприятий, указывает на эффективность использования автоматизированных систем для обеспечения требований стандартов загрязнения воздуха.

Из систем регулирования автотранспортных выбросов заслуживает внимания автоматизированная система управления уровнем окиси углерода, применяемая в г. Бордо (Франция) [9]. Эта система с помощью светофоров осуществляет регулирование количества и скорости движения автомашин по информации со станций контроля окиси углерода в атмосфере.

Пока еще незначительный опыт применения автоматических систем контроля и управления качеством атмосферного воздуха свидетельствует, однако, о том, что реализация рассмотренного принципа регулирования в объектах различного назначения позволяет не только обеспечить требования норм загрязнения воздуха, но и в ряде случаев добиться экономического эффекта путем оптимизации использования топливных ресурсов.

Практическая реализация АСУКА требует создания специальных технических средств, прежде всего газоанализаторов контроля загрязнения атмосферы, промышленных и автотранспортных выбросов, станций автоматического контроля и комплекса средств системы управления. Задача разработки газоанализаторов на основные параметры загрязнения атмосферы [3] завершается, близится к окончанию работа по выпуску комплекса технических средств подсистемы контроля загрязнения. В настоящее время в соответствии с комплексной программой ГКНТ разворачиваются работы по созданию газоанализаторов контроля промышленных и автотранспортных выбросов и других технических средств систем управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Э. П. Разработка автоматизированных систем контроля загрязнения воздушного бассейна выбросами тепловых электростанций. — Труды Моск. энерг. ин-та, 1979, вып. 435, с. 8—13.
2. Израэль Ю. А. и др. Осуществление в СССР системы мониторинга загрязнения природной среды. — Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 8—28.

3. Красов В. И. Автоматизированный контроль загрязнения атмосферы и его приборное обеспечение.—Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 3—12.
4. Красов В. И. Основные направления решения проблемы контроля и регулирования загрязнения атмосферы.—Труды ГГО, 1981, вып. 453, с. 3—12.
5. Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах/Под ред. М. Е. Берлянда.—Л.: Гидрометеониздат, 1979.—79 с.
6. Отиаи М., Найто М. О показателях территориального загрязнения.—Когай то тайсаку, т. 13, № 9, 1977.
7. Примак А. В., Щербань А. Н. Методы и средства контроля загрязнения атмосферы.—Киев; Наукова Думка, 1980, с. 265—270.
8. Akizuki K. Prediction of air pollution based on observed data.—Envir. Syst. Plan. Des and Control. Proc. IFAC Symp. Kyoto, 1977, vol. 2. Oxford, 1978, p. 279—286.
9. Faugere J. G. Surveillance de la pollution oreycarbonee clans l'agglomeration bordelaise.—Pollut. atmos., 1980, vol. 22, N 85, p. 98—102.
10. Kai-ching Chure. a. Real-time urban power dispatch with ambient air quality constraints.—Environ. Syst. Plan. Des. and Control, Proc. IFAC Symp., Kyoto, 1977, vol. 1, p. 309—316.
11. Moriyama e. a. Stack gas monitoring system for warning and control.—Envir. System Plan., Des. and Control, Proc. IFAC Symp, Kyoto, 1977. vol. 1, p. 129—134.
12. Mu Hao S., Wang e. a. Computer — aided air quality management.—J. Envir. Manag., 1979, vol. 9, N 1, p. 61—87.

А. Д. Зив

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ СЕРНИСТЫМ ГАЗОМ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСКЗВ

При эксплуатации автоматизированной системы контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ) большое значение имеют методы расчета и краткосрочного прогноза поля загрязнения в городе. Поскольку их количество весьма велико, необходимо оптимально выбрать ту модель, которая, с одной стороны, в большей степени отвечала бы целям и условиям АСКЗВ, и, с другой, реально отражала бы загрязненность города.

Прогнозируя загрязнение, мы можем использовать как традиционные статистические [1, 3], так и не менее распространенные аналитические методы [1, 4, 5], основанные на различных полуэмпирических формулах. Наличие автоматизированной системы дает большие возможности для накопления материала при ее непрерывном функционировании. В то же время весьма ограниченное в настоящее время количество контрольно-замерных станций (КЗС) не позволяет детально изучить поле загрязнения в таком большом городе, как, например, Ленинград. Поэтому на данном этапе целесообразно применить моделирование с необходимыми поправками, даваемыми АСКЗВ.

Вопрос моделирования распространения примесей часто упирается в невозможность или крайнюю затруднительность инвентаризации выбросов вредных веществ. Если в небольших городах очевидно определяющее влияние крупных источников (трубы предприятий, ТЭС и т. д.), то в крупных городах может оказаться нецелесообразным учет каждого такого источника по отдельности. Об этом говорят, в частности, результаты разложения поля концентрации сернистого газа в Ленинграде по системе естественных ортогональных функций. Было показано [2], что в этом разложении вклад первого слагаемого, отвечающего за изменение концентрации, в целом по городу составляет 43 %.

В настоящее время проводятся работы по экспериментальной проверке различных подходов к моделированию распространения примеси применительно к АСКЗВ.

В частности, была проведена обработка результатов опытной эксплуатации автоматизированной системы. В процессе недельной работы осенью и весной измерялись концентрации сернистого газа на шести (осенью) и трех (весной) КЗС. Синхронно проводились измерения ветра, температуры, влажности, давления, а также два раза в сутки радиозондирование до высоты 2 км над поверхностью города. Данные на КЗС получали ежедневно с 7 до 19 ч весной и круглосуточно осенью.

Одной из задач обработки результатов эксперимента было исследование зависимости между направлением ветра и уровнем загрязнения на постах КЗС. Оно позволило в какой-то мере выяснить вопрос о решающем значении выбросов отдельных крупных предприятий.

Надо отметить, что использование АСКЗВ с регулярными и довольно частыми (1 или 2 раза в час) измерениями дает возможность проанализировать колебания загрязнения воздуха с периодами, существенно меньшими, чем при обычных ручных измерениях. Однако в настоящем эксперименте были известны лишь мгновенные значения концентрации. Поэтому результаты, по-видимому, сильно искажались вследствие как случайных флуктуаций уровня загрязнения, так и ошибок измерения.

Сравнительно небольшой объем экспериментального материала не позволяет получить численные статистические зависимости загрязнения от метеопараметров (в частности, и от направления ветра). Кроме того, вследствие большой инерционности поля загрязнения примесями в основном промышленного происхождения (например,  $\text{SO}_2$ ) [5] при анализе его зависимости от метеопараметров, очевидно, большее значение имеет его изменение с периодом порядка 6—12 ч. Поэтому мы ограничиваемся лишь качественным описанием зависимости наземной концентрации сернистого газа от направления ветра. Мы также не имели возможности исследовать ее при прочих сходных условиях. В этом отношении материал весеннего эксперимента несколько лучше, поскольку осенью в пятый и шестой дни эксперимента наблюда-

Распределение загрязнения сернистым газом в зависимости от направления ветра (d)

Станция	Время суток	d°											
		0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
О сень													
I	День	1,06	1,11	0,84	0,63	0,67	1,32	0,95	0,52	1,13	0,92	1,62	1,33
	Ночь	1,06	1,06	1,05	1,06	0,85	0,85	1,06	0,64	0,85	1,5	1,06	0,85
II	День	1,0	1,30	1,30	1,30	0,17	1,20	0,83	1,0	1,2	1,2	1,0	1,2
	Ночь	0,86	1,30	0,86	0	1,30	1,10	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0
III	День	0,69	0,80	0,68	0,92	0,69	0,73	0,80	0,69	0,93	3,2	0,69	1,03
	Ночь	0,80	0,80	0,80	0,80	1,0	0,80	1,0	0,8	1,2	0,9	1,0	1,0
IV	День	2,25	0,50	0,25	0,50	1,25	2,0	2,0	2,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Ночь	0,80	1,07	0,93	1,20	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	1,2	1,2	0,93
V	День	1,0	1,10	1,0	1,10	0,75	0,88	1,10	1,0	1,10	1,10	1,10	1,0
	Ночь	1,0	1,0	1,30	1,0	1,0	1,0	1,20	1,0	1,20	1,50	1,50	1,20
VI	День	0,63	1,56	1,10	1,40	0,50	1,10	0,94	0,94	1,10	0,78	0,94	1,10
	Ночь	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,59	0,88	0,88	1,18	0,88	2,05	1,20
Весна													
I	День	1,06	1,11	0,84	0,63	0,67	1,32	0,95	0,52	1,13	0,92	1,62	1,33
III	День	0,89	0,89	1,22	0,89	0,78	1,37	0,73	0,67	1,13	1,10	1,19	1,41
VI	День	0	1,64	0,55	0,19	1,32	0,43	1,89	1,51	0,30	0,30	2,31	1,62

лось сильное увеличение концентрации примеси вследствие поднятых инверсий.

Для каждой КЗС строились диаграммы распределения уровней загрязнения атмосферы по направлениям ветра. Все данные о концентрации были разбиты на 12 групп в соответствии с сопутствующими направлениями ветра. Кроме того, данные осеннего эксперимента были разбиты также на дневные и ночные. В каждой группе вычислялись средние значения и дисперсия. В таблице приведены значения отношений средней концентрации

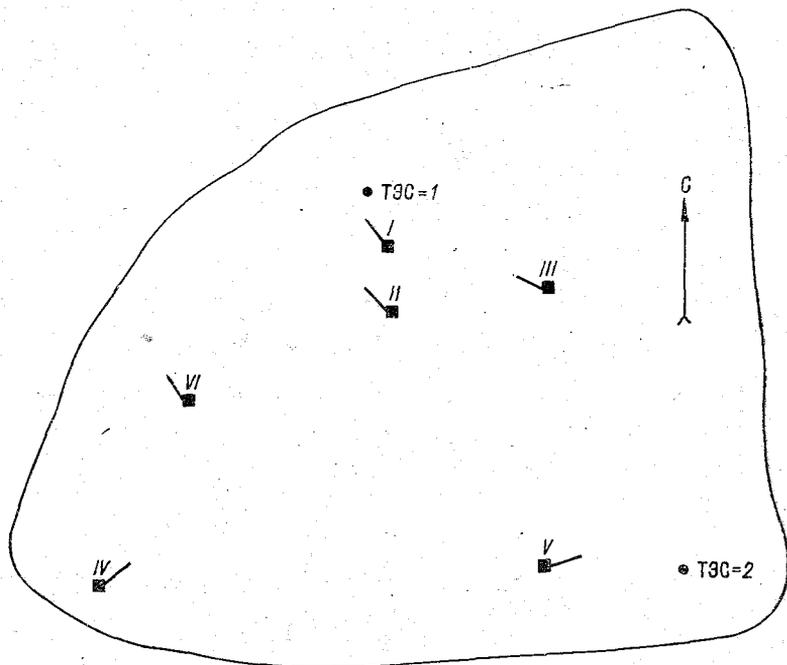


Рис. 1. Расположение основных источников загрязнения  $\text{SO}_2$  и станций АСКЗВ.

в соответствующем секторе к средней концентрации по всем секторам.

На рис. 1 представлен схематический план расположения в городе основных источников загрязнения сернистым газом и станций АСКЗВ. Стрелками отмечены сектора направлений ветра с наибольшей средней концентрацией. При этом для станций I—III отмечен средний результат по осеннему и весеннему распределению, а для станций IV—VI только по осеннему (весной они не работали).

Как видно из таблицы, загрязнение слабо зависит от направления ветра, особенно на станциях в южной части города. Кроме

того, общий уровень загрязнения на них ниже, чем в центре города. Особенно сильно заметно влияние ТЭС-1 на КЗС I и III. При этом интересно отметить, что загрязнение на КЗС III существенно выше, чем на КЗС I. При этом, КЗС I располагался от источника на расстоянии примерно в 3 раза меньшем, чем КЗС III.

Северные направления ветра приводят, как правило, к более высокому загрязнению, чем южные и восточные, что связано, очевидно, с расположением крупного комбината на северо-востоке (примерно в 20 км от города).

На основании данных таблицы можно сделать один весьма важный вывод о том, что уровень загрязнения в городе определяется в основном распределением по площади суммарного загрязнения от источников сернистого газа, и лишь в районе расположения ТЭС-1 необходимо принимать во внимание ее выбросы. При этом интенсивность загрязнения по площади города падает с северо-востока на юго-запад.

Неясным остался тот факт, что КЗС III характеризуется весьма неравномерным загрязнением как в зависимости от направления ветра, так и в зависимости от времени. Причем это вряд ли можно отнести к погрешностям измерений, поскольку такую же картину дают результаты ручных измерений в том же районе.

Проведенное исследование распределения загрязнения сернистым газом по направлениям ветра позволяет сделать следующие выводы.

Уровень концентрации  $\text{SO}_2$  в южной части города (КЗС IV—VI) определяется в основном не направлением ветра и, следовательно, не функционированием отдельных крупных источников эмиссии  $\text{SO}_2$ , а общим городским фоном загрязнения.

Кроме того, загрязнение на этих станциях в целом примерно в 2—3 раза ниже, чем на станциях в центре города.

Особенно сильной изменчивостью характеризуется загрязнение в районе КЗС III. Кроме того, КЗС I и III также испытывают заметное влияние направления ветра, что обусловлено наличием ТЭС к северо-западу от них.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что небольшой объем данных, которым мы располагали, не позволил проанализировать влияние случайных ошибок измерений, а также непоказательных значений концентраций. Поэтому более строгие выводы будут возможны лишь при дополнительных экспериментах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1975. — 448 с.
2. Еликоева Л. И., Чувашина И. Е. Анализ поля концентраций сернистого газа методом разложения по естественным ортогональным функциям. — М.: Труды ГГО, вып. 436, 1979, с. 72—78.
3. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения воздуха в городах. Труды ГГО, вып. 314, 1974, с. 42—51.

4. Demerjian K. L. Photochemical diffusion models for air quality simulation.— Transp. Res. Board Spec., 1976, N 167, p. 21—33.

5. Liu M. K., Whitney A. C., Roth Ph. M. Effects of atmospheric parameters on photochemical air pollutants.— J. Appl. Met., 1976, vol. 15, N 8, p. 829—835.

*А. М. Бунакова, В. И. Красов*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АКИНОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНЫХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ**

Создание эффективной системы контроля загрязнения атмосферы является одной из важнейших задач проблемы охраны окружающей среды [5].

Система предназначена для наблюдения и контроля за уровнем загрязнения атмосферы с целью изучения распределения загрязняющих веществ во времени и пространстве, оценки состояния и качества окружающей среды, выявления источников загрязнения и определения эффективности мероприятий по защите окружающей среды. Такая типовая система должна производить измерение большого числа компонент загрязнения атмосферного воздуха: пыли, окиси углерода, сернистого ангидрида, суммарных углеводородов, окислов азота, озона и др.; метеорологических параметров: скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха [7].

Весьма существенную роль в исследовании атмосферных загрязнений играют оптические методы, основанные на измерениях спектров поглощений загрязняющих компонент (см., например, [3]). До настоящего времени эти методы использовались в основном для измерений локальных концентраций газовых примесей в различных точках приземного слоя атмосферы. Однако данных, полученных даже от большой совокупности наземных датчиков, недостаточно для полного описания и прогнозирования атмосферных загрязнений: в полученной таким путем двумерной картине не хватает информации о вертикальном распределении или хотя бы о средней толщине слоя загрязняющей примеси. В данной работе рассматриваются принципиальные возможности извлечения этой недостающей информации из различных актинометрических данных в комплексе с результатами наземных локальных измерений.

Наибольшая информация о молекулярных спектрах поглощения загрязняющих примесей (окислы азота, CO, SO<sub>2</sub> и т. д.) может быть получена в ИК диапазоне, где расположены наиболее интенсивные линии молекулярного поглощения. Основная задача

актинометрических методов состоит в измерении интенсивности приходящего излучения в участке спектра, содержащего линии поглощения исследуемых атмосферных компонент.

Спектральная интенсивность излучения, приходящего из атмосферы в прибор, расположенный в приземном слое, определяется выражением

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^0 P_{\lambda}(z=H) + \int_{P_{\lambda}(z=0)}^{P_{\lambda}(z=H)} I_{\lambda}(z) dP_{\lambda}(z). \quad (1)$$

Здесь  $I_{\lambda}^0$  — спектральная интенсивность внеатмосферного источника (обычно Солнца),  $I_{\lambda}(z)$  — спектральная интенсивность излучения слоя атмосферы на высоте,  $H$  — высота верхней границы атмосферы,  $P_{\lambda}(z)$  — функция пропускания, характеризующая ослабление радиации с длиной волны  $\lambda$  на участке от точки, лежащей на трассе луча на высоте  $z$  до точки наблюдения  $z=0$ . В общем случае она имеет вид

$$P_{\lambda}(z) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \int_0^z \tau_{\lambda}^i(\zeta) \rho^i(\zeta) ds(\zeta)\right\}, \quad (2)$$

где  $n$  — число ослабляющих радиацию компонентов атмосферы,  $\tau_{\lambda}$  — коэффициент ослабления,  $\rho^i(z)$  — плотность  $i$ -й ослабляющей компоненты в точке трассы на высоте  $z$ , а элемент трассы  $ds$  связан (для плоско-параллельной атмосферы в отсутствие рефракции) с зенитным углом  $\theta$  выражением

$$ds = \frac{dz}{\cos \theta}. \quad (3)$$

Разумеется  $I_{\lambda}(z)$  в выражении (1) состоит из двух частей:

$$I_{\lambda}(z) = A_{\lambda}(z) + E_{\lambda}(z). \quad (4)$$

Член  $A_{\lambda}(z)$  определяет интенсивность рассеяния радиации в элементе объема, а функция  $E_{\lambda}$  — интенсивность переизлучения радиации, поглощенной рассматриваемым объемом. В случае локального термодинамического равновесия

$$E_{\lambda}(z) = k_{\lambda}(z) \cdot B_{\lambda} \cdot T(z), \quad (5)$$

где  $k_{\lambda}(z)$  — коэффициент поглощения;  $B_{\lambda}$  — интенсивность излучения абсолютно черного тела при температуре  $T(z)$ .

В инфракрасном диапазоне можно в первом приближении пренебречь вкладом аэрозольного рассеяния ( $A_{\lambda} \approx 0$ ), поскольку здесь характерный параметр теории рассеяния  $\frac{a}{\lambda} \ll 1$  (средний радиус аэрозольных частиц  $\bar{a} \approx 0,05 \div 0,07$  мкм [4]), и рассеяние резко затухает с ростом  $\lambda$ .

Если линия поглощения изучаемой компоненты лежит в окне прозрачности атмосферы 8—12 мкм, то задача сильно упроща-

ется, так как на этом участке для основных компонент атмосферы значения  $k_\lambda$ , а следовательно, и  $E_\lambda$  пренебрежимо малы, и в уравнении (1) остается лишь первый член — солнечная радиация, ослабляемая рассматриваемой поглощаемой компонентой на трассе наблюдения:

$$I_\lambda = I_\lambda^0 \exp\left(-\int_0^H k_\lambda(z) \rho(z) \frac{dz}{\cos \theta}\right). \quad (6)$$

Следует учесть, что атмосферное загрязнение, как правило, локализовано в довольно узком приповерхностном слое. Поскольку в настоящее время мы располагаем весьма скудной информацией о деталях реального хода вертикального распределения загрязнения  $\rho(z)$ , имеет смысл в первом приближении считать это распределение ступенчатым со средней плотностью  $\rho_0$  и высотой  $h$ . Вообще говоря, коэффициент поглощения  $k_\lambda$  сложным образом зависит от температуры  $T$  и давления  $p$  на высоте  $z$  и для описания этой зависимости существуют различные эмпирические аппроксимации и теоретические модели функций пропускания (см., например, [9]). В простейшем случае этой зависимостью можно пренебречь, считая  $k$  постоянным по всей высоте поглощающего слоя. Тогда мы получим из формулы (6) обычный закон Бугера:

$$I_\lambda = I_\lambda^0 \exp\left(-k_\lambda \rho_0 \frac{h}{\cos \theta}\right). \quad (7)$$

Таким образом, измерив ослабление солнечной радиации в окне прозрачности  $I_\lambda / I_\lambda^0$ , мы можем по измеренной локальной концентрации определить среднюю высоту слоя загрязняющей компоненты на трассе луча, определяемой зенитным углом  $\theta$ .

Из формулы (7) видно, что чувствительность метода резко возрастает с ростом зенитного угла, когда  $\cos \theta$  стремится к 0 и трасса проходит через все большую толщину поглощающего газа. В модельном случае плоскопараллельной атмосферы интенсивность при  $\theta = 90^\circ$  падает до 0. В случае сферической атмосферы при  $\theta = 90^\circ$  в показателе экспоненты появится величина  $\sqrt{2} h R$  ( $R$  — радиус Земли). Если внизу в точке наблюдения были проделаны добавочные наземные локальные замеры загрязняющей компоненты, давшие отличные от  $\rho_0$  значения плотности, нетрудно модифицировать метод с помощью линейной интерполяции распределения плотности в горизонтальном направлении. При этом связь между расстоянием по горизонтали  $x$  и высотой  $z$  дается соотношением  $x = z \operatorname{tg} \alpha$ .

Даже в окне прозрачности существует поглощение, обусловленное вкладом от континуума поглощения водяного пара. Если концентрация  $\rho_0$  или мощность слоя загрязняющей компоненты очень невелики, то это поглощение может сильно исказить результаты, получаемые по формуле (7). В этом случае можно

улучшить точность метода, если вместо величины  $I_\lambda/I_\lambda^0$  измерять отношение

$$\frac{2I_\lambda}{I_{\lambda_1} + I_{\lambda_2}} \approx P_\lambda(z=H). \quad (8)$$

Здесь  $I_\lambda$  — интенсивность излучения в центре интересующей нас полосы поглощения, а  $I_{\lambda_1}$  и  $I_{\lambda_2}$  — интенсивности излучения, замеренные по краям этой полосы.

Другое уточнение расчетов по описанной схеме должно состоять в выборе более точной функции пропускания, в которой в явном виде учитывается зависимость  $k_\lambda$  (или  $k_\lambda \rho$ ) от температуры и давления. В этом случае толщину слоя загрязнения  $h$  придется определять по формуле (6). При этом должны быть известны вертикальные профили температуры и давления. Задача, однако, существенно упрощается в типичном случае, когда толщина слоя загрязнения невелика. При этом можно надеяться, что вплоть до высоты  $z$  температура несущественно отличается от значения  $T(z=0)$  на поверхности, а давление  $p(z)$  связано с  $p(z=0)$  обычной барометрической формулой.

Выше описывалась методика получения информации о пространственном распределении загрязнения в том случае, когда полоса поглощения загрязняющей примеси находится в области окна прозрачности атмосферы. Ситуация существенно меняется, если полоса поглощения лежит вне окна (например, полоса 5,3 мкм для NO; полоса 4,6 мкм для CO и т. д.). В этом случае интенсивность прямой солнечной радиации сравнивается с интенсивностью радиации, испускаемой атмосферой (с так называемым противоизлучением атмосферы). Формально это означает, что нельзя пренебрегать членом  $E(z)$  в уравнениях (4) и (1). При этом простые выражения (6) — (8), связывающие интенсивность приходящего излучения  $I_\lambda$  с функцией пропускания, становятся неприменимыми и необходимо решать уравнение переноса вида:

$$I_\lambda = I_\lambda^0 P_\lambda(z=H) + \int_{P_\lambda(z=0)}^{P_\lambda(z=H)} E_\lambda(z) dP_\lambda(z). \quad (9)$$

Для решения этих уравнений необходимо знать высотное распределение в атмосфере водяного пара и CO<sub>2</sub>, обуславливающих противоизлучение, а также иметь информацию по вертикальным профилям температуры  $T(z)$ . Следует учитывать, однако, что благодаря мощному поглощению радиации на этих длинах волн основной вклад в противоизлучение вносит лишь относительно тонкий приземный слой атмосферы. По расчетам, приведенным в [1], 90% противоизлучения атмосферы формируется в приземном слое толщиной около 600 м. Поэтому интеграл в правой части формулы (9) следует вычислять лишь до высот  $z=H_0 \approx \approx 600$  м, а температурный профиль и распределение водяного

пара  $\rho(z)$  в таком узком диапазоне высот получить гораздо легче, чем для всей атмосферы.

В связи с этим возникает еще одна возможность использования актинометрических измерений. Действительно, теперь противоизлучение атмосферы вносит такой же вклад в  $I_\lambda$ , что и прямая солнечная радиация. С другой стороны, известно, что суточная вариация интенсивности противоизлучения не превышает 30%. Поэтому при ИК измерениях вне окна прозрачности можно производить измерения и в ночное время.

Разумеется, обработка данных вне окна прозрачности требует задания с высокой степенью точности функций пропускания основных ослабляющих компонент — водяного пара и  $\text{CO}_2$ , а также по высотным профилям их концентраций вплоть до  $H_0 \approx 600$  м. Следует также провести предварительные теоретические расчеты для определения чувствительности метода в различных спектральных диапазонах и для разных концентраций загрязняющих примесей. Может оказаться, что существующей точности теоретических и экспериментальных методов пока что недостаточно для надежного определения загрязняющих примесей вне окна прозрачности. Пока что можно привести добавочные аргументы в пользу такой методики, поскольку в спектре противоизлучения происходит инверсия: минимумы полос поглощения заменяются максимумами эмиссионных полос, интенсивность которых зависит от температуры излучающего слоя. Если загрязняющая примесь сконцентрирована в узком приземном слое ( $h \ll H_0$ ), то обычно температура ее будет максимальной среди всех  $T(z)$ . Поэтому можно ожидать увеличения интенсивности ее эмиссионных полос на фоне излучения водяного пара, приходящего из более высоких и холодных слоев атмосферы. Расчеты [2], например, показывают, что даже на фоне полосы поглощения основной компоненты атмосферы при больших зенитных углах можно отчетливо регистрировать малую примесь  $\text{N}_2\text{O}$  (примерно  $1 \text{ млн}^{-1}$ ). Отношение сигнала от  $\text{N}_2\text{O}$  к «фону» основной компоненты оказывается равным примерно 1.

Можно, наконец, рассмотреть еще одну возможность использования противоизлучения в окне прозрачности для определения высоты загрязняющего слоя. В этом случае в прибор не попадает прямая солнечная радиация и интенсивность регистрируемого излучения определяется выражением

$$I_\lambda = \int_{P(z=0)}^{P(z=H)} E_\lambda(z) dP(z). \quad (10)$$

Экспериментальные и теоретические данные [1, 6, 8] показывают, что чувствительности существующих методов вполне достаточно для надежной идентификации весьма слабых примесей (например, полосы озона с концентрацией  $1-10 \text{ млн}^{-1}$  видны очень отчетливо). Преимуществом такой методики является, как

уже отмечалось, возможность использовать ее и в ночное время [4].

Как и в случае формулы (7), с увеличением зенитного угла трасса наблюдения проходит по все более утолщающему слою  $h/\cos\theta$  загрязняющей примеси с возрастающей температурой. Это означает, что с ростом  $\theta$  нарастает и интенсивность наблюдаемой эмиссионной линии, т. е. чувствительность метода к наблюдаемой газовой примеси.

Во всех случаях, где требуется учет противоионизации атмосферы, принцип расчета эффективной высоты  $h$  слоя загрязняющей примеси и привязка результатов к данным локальных измерений концентрации примеси  $\rho_0$  остается таким же, как и при использовании простых формул (7) и (8), хотя обработка данных теперь усложняется. От приборов требуется высокое спектральное разрешение, достаточное для того, чтобы четко обрисовать интересующую нас полосу (т. е. не хуже, чем 0,1 мкм).

Особенно перспективной является методика использования наклонных трасс с большими зенитными углами, которая, как уже отмечалось, резко повышает чувствительность метода к слабым примесям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ащеулов С. В., Стиро Д. Б. Анализ спектров противоионизации атмосферы. — «Проблемы физики атмосферы», 1967, вып. 5.
2. Бунакова А. М. Уходящее тепловое излучение как источник информации о газовом составе атмосферы. Проблемы физики атмосферы. — 1974, вып. 12.
3. Броунштейн А. М., Парамонова Н. Н., Фролов А. Д., Шашков А. А. Оптический метод определения общего содержания  $\text{CO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы. — Труды ГГО, 1976, вып. 369, с. 5—24.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. — М.: Мир, 1971.
5. Израэль Ю. А., Гасилина Н. К., Ровинский Ф. Я. Система наблюдения и контроля загрязнений природной среды в СССР. — Метеорология и гидрология, 1978, № 10, с. 3—8.
6. Кондратьев К. Я. Актинометрия. — Л.: Гидрометиздат, 1965.
7. Красов В. И. Автоматизированный контроль загрязнения атмосферы и его приборное обеспечение. — Труды ГГО, 1978, вып. 421, с. 3—12.
8. Юрганов Л. Н., Дианов-Клоков В. И. О сезонных вариациях окиси углерода в атмосфере. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971, т. 8, с. 346—349.
9. Mc Clathrey e. a. Optical properties of the atmosphere. — Environ. Res. Pap., 1971, N 354.

## К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА СРЕДСТВ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О ЗАГРЯЗНЕНИИ ВОЗДУХА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Суммарный социально-экономический эффект от функционирования автоматизированной системы контроля и управления уровнем загрязнения воздуха (ЗВ) определяется выражением

$$\mathcal{E}_{АСУ} = \mathcal{E}_{АСКЗВ} + \mathcal{E}_{рег} + \mathcal{E}_{упр}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{АСКЗВ}$  — эффект за счет применения автоматизированной системы контроля (АСКЗВ) для замены ручных методов измерения уровня ЗВ;  $\mathcal{E}_{рег}$  — эффект за счет применения АСКЗВ для установления оптимальных форм регулирования эмиссии определенных ингредиентов при превышении экономически допустимого уровня ЗВ;  $\mathcal{E}_{упр}$  — эффект от осуществления оптимальных атмосфероохранных мероприятий в составе АСУ при использовании фактической и прогнозной информации АСКЗВ.

Первая составляющая выражения (1) определяется технико-экономической эффективностью комплекса технических средств АСКЗВ, две других — приведенными к единице суммарного загрязнения затратами на оздоровление атмосферы [4]. Указанные факторы связаны между собой через репрезентативность получаемой информации о ЗВ, достоверность оперативной оценки степени суммарного загрязнения и прогноза его уровня [7]. Исходной предпосылкой их оптимизации является рациональный выбор количества периферийных контрольно-замерных станций (КЗС) АСКЗВ и размещения их на площади. Подобная задача принадлежит к оптимизационному классу задач [5] целочисленного программирования, в частности задач с булевыми переменными. Математическая модель такой задачи имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_j \{ \leq = \geq \} b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

в области, определенной условиями

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Нужно найти решение  $x = |x_1, x_2, \dots, x_n|$ , при котором минимизируется (максимизируется) функция цели

$$F(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j. \quad (3)$$

Функциональная зависимость для (3) может быть выражена исходя из следующих соображений. Чем больше точек отбора проб, тем точнее характеристики функций концентраций и метеопараметров; чем меньше этих точек, тем больше вероятность ошибки в определении степени ЗВ, но меньше материальные затраты на систему. Наилучшее количество КЗС должно учитывать, с одной стороны, материальные затраты на создание и эксплуатацию АСКЗВ, с другой,— принятый уровень ошибки в оценке степени ЗВ и связанный с этим ущерб [2].

Рассмотрим линейную модель однокомпонентного  $k$ -го загрязнителя.

1.1. Имеется разбиение контролируемого объекта на  $M$  элементарных площадей  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) с идентификацией свойств элементарной области в ее центре. В каждой  $S_i$  задано количество выбросов  $a_i^k$  и может быть определена соответственно элементарная относительная массовая концентрация  $c_i^k = (a_i^k/v_i)/\rho_i$ .

В малонаселенных районах  $S_i$  имеет размер  $(d \times d)$  единиц длины. В плотнонаселенных районах сеть  $S_i$  должна быть гуще с ячейкой размером  $(\frac{d}{r} \times \frac{d}{r})$  единиц длины. Максимально густой сетка будет в высокопромышленных районах с сильной эмиссией загрязнителей. Для определения  $r$  ( $r \geq 1$ ) может быть использована простейшая математическая модель, например [8]:

— для жилого района

$$r = r_1 = \alpha N_1, \quad (4)$$

— для индустриального района

$$r = r_2 = \alpha N_2 + \sum_{i=1}^n \beta_i M_i, \quad (5)$$

— для смешанного района

$$r = r_3 = (N_1 r_1 + N_2 r_2) / (N_1 + N_2). \quad (6)$$

Здесь  $N_1$  — среднее число жителей на площади  $d^2$ ;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, определяемый географией, конфигурацией застройки, особенностями циркуляции и застойных явлений в приземных слоях атмосферы;  $N_2$  — максимальное число жителей в районе  $d^2$  в рабочие часы;  $n$  — число предприятий в  $d^2$ ;  $M_i$  — общая масса загрязненного воздуха, выбрасываемого каждым из  $n$  предприятий;  $\beta_i$  — эмпирически определяемый усредненный коэффициент загрязненности, зависящий от мощности предприятия и очистных сооружений.

Для упрощения расчета экономического ущерба следует выдерживать

$$S_i c_i^k = \text{const} = T, \quad (7)$$

где либо  $S$ , либо  $T$  выбирается произвольно, что позволяет учесть

такие факторы, как однородность поля выбросов, топографические особенности местности, размещение промышленных и жилых зданий и т. п. При учете воздействия  $L$  ( $L > 1$ ) загрязнителей элементарные зоны для различных ингредиентов должны совпадать.

1.2. Имеется  $m \leq M$  пунктов, в которых можно разместить КЗС.

1.3. Имеется общее количество (масса)  $b^k$  ингредиента  $k$ , выбрасываемого в атмосферу,

$$b^k = \sum_{i=1}^M a_i^k. \quad (8)$$

1.4. Имеется матрица  $\Pi_{ij}^k$  величин ущерба от неустановки КЗС (нерегистрации ЗВ) в точке  $j$  по отношению к точке  $i$  при определенном уровне  $k$ -го ингредиента в точке  $i$ . Подобный ущерб может быть вычислен путем интегрирования ущерба по элементарному коридору от точки  $i$  до точки  $j$ . Интегральная величина  $\Pi_{ij}^k$  определяется по формуле

$$\Pi_{ij}^k = \sum_{l=i}^j (\Pi_l^k - \Pi_j^k), \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N; \\ k = 1, 2, \dots, L; \quad \Pi_{ii}^k = 0, \quad (9)$$

где суммирование по  $l$  производится по кратчайшему пути от  $i$ -й зоны до зоны  $j$ , в которой находится КЗС.

1.5. Имеется  $g_j^k$ , характеризующая стоимость установки и эксплуатации КЗС в точке  $j$  в зависимости от количества и состава компонентов ЗВ, на контроль которых она рассчитана.

1.6. Имеется функция  $k_m^k$ , характеризующая величину капитальных затрат (не входящих в  $g_j^k$ ) на строительство АСКЗВ и функционирование АСУ.

1.7. Искомая матрица  $X_{ij}^k$  — матрица регистрации относительной массовой концентрации  $k$ -го ингредиента в точке  $j$  от выброса в элементарной зоне  $i$ .

Задача оптимизации количества КЗС и их расположения формулируется следующим образом. Ищется

$$\min \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}^k X_{ij}^k + \sum_{j=1}^N g_j^k + k_m^k \right] \quad (10)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^N X_{ij}^k \leq c_i^k, \quad i = 1, \dots, M, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^M X_{ij}^k V_i \rho_i \leq b^k = \sum_{i=1}^M a_i^k, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

При одновременном учете влияния нескольких компонентов ЗВ ищется соответственно

$$\min \sum_{k=1}^L \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^M C_{ij}^k X_{ij}^k + \sum_{i=1}^m g_i^k + k_m^k \right] \quad (14)$$

также при ограничениях (11)–(13).

Решение задач типа (10) и (14) методом последовательных расчетов позволяет найти оптимальное подмножество  $m \leq M$  путем расчета лишь незначительной части всех возможных вариантов. После нахождения значений  $X_{ij}^k$  при известном (априорно заданном) общем числе  $m$ , определяется  $m$  точек с наи-

большими значениями  $A_j = \sum_{i=1}^M X_{ij}^k$ , которые характеризуют наиболее репрезентативные места установки КЗС. Случайный характер большинства величин в (10)–(14) позволяет рассматривать оптимизационные задачи определения числа КЗС и мест их расположения как задачи стохастической оптимизации. В такой постановке целесообразно рассматривать минимизацию математического ожидания функций цели (10) и (14) и решать эти задачи методами стохастического программирования.

В соответствии с тенденцией централизации обработки информации и децентрализации управления в иерархической структуре АСУ уровнем ЗВ [6] следует рассматривать отдельно две задачи оптимизации комплекса технических средств (КТС): А — сбора и предварительной обработки информации (КЗС, центральная станция — ЦС АСКЗВ [3]) и Б — оперативной и статистической обработки информации (ИВЦ). Обе задачи должны решаться на своих уровнях, так как цели, суммарное количество информации и сравнительная стоимость КТС на каждом уровне различны.

Основная идея решения оптимизационной задачи А (по  $k$ -му загрязнителю) заключается в минимизации функции затрат на КТС при максимизации качества работы последнего.

Пусть задано:

2.1. Количество рассматриваемых исходных наборов КТС  $i = 1, 2, \dots, N$ ; из них  $1 \leq i \leq n$  — выпускаются промышленностью,  $n < i \leq N$  — не выпускаемые, но перспективные системы.

2.2. Множество вариантов режимов работы (частота опроса и т. п.)  $i$ -го комплекса  $1 \leq a_i \leq M$  (здесь  $M$  — максимально возможное число вариантов).

2.3. Матрица количества кодированной информации на выходе  $i$ -го комплекса при заданном варианте работы  $j$  —  $A_{ij}$ .

2.4. Матрица удельной стоимости на единицу выходной информации  $i$ -го комплекса  $C_{ij}$  (за год).

2.5. Общее количество  $i$ -х систем для выполнения  $j$ -х работ  $Z_{ij}$ .

2.6. Векторы  $C_{ic}$  и  $C_{ib}$  — затраты на серийное изготовление

и средние годовые эксплуатационные затраты  $i$ -го комплекса. Компоненты их зависят от  $z_{ij} - C_{ic} = C_{ic}(Z_{ij})$ ,  $C_{is} = C_{is}(Z_{ij})$ .

2.7. Вектор  $C_{i0}$  — стоимость разработки и внедрения  $i$ -го комплекса.

2.8. Вектор  $\delta_i$  с булевыми компонентами

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & \text{если } 1 \leq i \leq n, \\ 1 & n < i < N. \end{cases}$$

Искомые величины  $X_{ij}$  идентифицируют удельный относительный ущерб от неточности преобразования информации о  $k$ -м ингредиенте ЗВ. Физический смысл их заключается в том, что одновременно оцениваются качество измерений (точность, надежность преобразования сигналов) и ущерб, наносимый окружающей среде. Это проявляется в вариативной адаптивности КТС к изменению качества среды и ухудшению обратной связи АСУ. Минимизируемая функция имеет вид

$$\min \left[ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N A_{ij} C_{ij} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N A_{ij} X_{ij} \right] \quad (15)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^M \sigma_{ij} X_{ij} < M k_i(Y_0), \quad i = 1, \dots, N, \quad (16)$$

где  $\sigma_{ij}$  — матрица с булевыми переменными, равная 0, если данного варианта работы  $i$ -го комплекса не существует;  $Y_0$  — полный экономический ущерб за год в данном районе;  $k_i(Y_0)$  — функция, отражающая часть ущерба при использовании  $i$ -го комплекса (смысл этого ограничения в том, что рассматриваемые комплексы не должны быть слишком плохими по своим параметрам);

$$X_{ij} \geq d_{ij} k_i(Y_0), \quad (17)$$

где коэффициенты  $d_{ij}$  отражают оценку качества аппаратуры. Например, возможно  $d_{ij} = 1 - P_i$  ( $P_i$  — доверительный уровень вероятности точности измерений и преобразования сигналов);

$$X_{ij} \quad (1 \leq i \leq n) \geq X_{ij} \quad (n < i \leq N), \quad (18)$$

указывающем, что разработке и серийному выпуску подлежат только устройства с улучшенными экономическими характеристиками относительного ущерба окружающей среды;

$$b_i T Y_0 \geq (T c_{is} z_{ij} + c_{ic} z_{ij} + c_{i0} \delta_i), \quad (19)$$

характеризующем экономическое обоснование КТС группы А по заданному сроку окупаемости  $T$  (в годах). Здесь  $b_i$  — коэффициенты, оценивающие долю  $i$ -го комплекса от общей стоимости КТС (А+Б) данного района.

Годовые затраты могут приближенно исчисляться по формуле

$$A_{ij} C_{ij} = [(C_{ic} + t C_{is}) Z_{ij} + C_{i0} \delta_i] t^{-1}, \quad (20)$$

где  $t$  — среднее время эксплуатации  $i$ -го комплекса КТС группы А в годах.

Постановку задачи оптимизации средств ВТ группы Б для локальных АСУ [6] можно сформулировать следующим образом. Пусть: 1) имеется  $N$  пунктов с выходом цифровой информации объема  $b_j > 0$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ . Будем отождествлять их с выходами КТС (КЗС, ЦС) группы А;

2) на ЦВМ имеется  $M$  пунктов возможного размещения аппаратуры оперативной (статистической) обработки информации  $H$  ( $1 \leq i \leq M$ );

3) для каждого  $i$ -го пункта известна функция стоимости обработки информации  $g_i(X_i)$  в зависимости от объема информации  $X$ . В эту функцию входят и затраты на капитальные вложения и эксплуатацию.

4) задана матрица  $C_{ij}^{(1)}$  стоимости передачи единицы информации между  $j$ -й КЗС и  $i$ -м пунктом с аппаратурой  $H$ ;

5) известна матрица коэффициентов  $X_{ij}$ , определяющих относительную часть информации передаваемой обратно от  $i$ -го  $H$  к  $j$ -й КЗС.

Оптимизационная задача состоит в определении числа  $m \leq M$ , пунктов размещения аппаратуры  $H$ , самих пунктов размещения, объемов перерабатываемой информации  $X_i$ , набора КЗС (ЦС), соединенных с данным  $H_i$ , количества передаваемой из  $j$ -й КЗС (ЦС) в  $H_i$  информации  $X_{ij}$ . Найдя

$$\min \left[ \sum_i \sum_j C_{ij}^{(1)} (X_{ij} + \gamma_{ij} X_{ij}) + \sum_i g_i(X_i) \right] \quad (21)$$

при

$$\sum_j X_{ij} = b_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (22)$$

$$\sum_i X_{ij} = X_i, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (23)$$

например, методом [1], дальнейшую оптимизацию КТС группы Б можно осуществить на основании простейших экономических соображений: из заданных наборов  $H_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) с различными технико-экономическими параметрами, удовлетворяющими решению задачи (21) — (23) и выпускаемыми промышленностью, на основе минимизации затрат и перспективы развития определяется искомый комплекс.

Изложенный подход к оптимизации технической структуры средств сбора и обработки данных о ЗВ может быть использован при организации работ по созданию соответствующих АСУ как на базе экспериментальной АСКЗВ, разработанной ИТТФ АН УССР совместно с ГГО, так и на базе разрабатываемой Минприбором и Госкомгидрометом типовой автоматизированной системы наблюдения и контроля за загрязнением окружающей среды — АНКОС-А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абуов К. А., Черенин В. П. Решение задачи о размещении кустовых информационно-вычислительных центров методом последовательных расчетов. — ЖВММФ, 1978, т. 18, № 1, с. 240—243.
2. Балацкий О. Ф., Коваленко Г. П., Халдеев В. Т. Модель экономического ущерба от загрязнения атмосферы и ее использование в автоматизированных системах контроля за качеством атмосферы. — Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения, 1978, вып. 4, с. 75—80.
3. Опыт разработки системы непрерывного сбора и обработки информации о загрязнении воздушного бассейна/А. Н. Щербань, А. В. Примак, А. С. Покаржевский и др. — В кн.: Проблемы контроля и обеспечения чистоты атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975, с. 85—100.
4. Примак А. В., Стеклогоров Е. Б. Оценка эффективности системы передачи данных о загрязнении воздушного бассейна. — Химическая технология, 1977, № 3, с. 56—60.
5. Сергиенко И. В. Вопросы разработки одного подхода к решению дискретных задач оптимизации в системах обработки данных и АСУ. — Управляющие системы и машины, 1974, № 6, с. 107—114.
6. Стратегия автоматизации санитарно-химического контроля атмосферы/А. Н. Щербань, А. В. Примак, В. И. Копейкин, А. С. Покаржевский. — Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения, 1976, вып. 2, с. 3—10.
7. Щербань А. Н., Примак А. В., Стеклогоров Е. Б. Эмпирико-статистический метод оперативного прогнозирования суммарного загрязнения атмосферы средствами АСКЗВ. — Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения, 1978, вып. 4, с. 80—88.
8. Tauber S. A systems approach to air pollution control. — *Atm. Environ.*, 1976, N 10, p. 633—635.

*А. И. Никушкин*

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

Теоретические основы метрологии в ее классическом представлении [9] базируются на теории вероятности и математической статистике, что довольно долгие годы удовлетворяло и удовлетворяет в большинстве случаев современным требованиям и обеспечивает дальнейшее совершенствование и развитие средств измерительной техники. Вместе с тем в [4] отмечается, что в настоящее время существует некоторая ограниченность старых оценок в прикладных аспектах метрологии, связанных с теорией измерений и измерительных устройств.

В этой связи необходимо отметить, что теория вероятностей и математическая статистика как основа научных знаний в области измерений, позволяя определять общие закономерности отдельных событий, не обеспечивает в полной мере изучения явления в целом во взаимообусловленности и причинно-следственной связи отдельных событий. Например, решение задач, связанных с исследованием метрологической надежности средств измерений (СИ), а также с изучением и обнаружением скрытых постепен-

ных отказов, к которым относятся метрологические отказы, практически во всех публикациях рассматриваются с позиций теории надежности [12], в то время как вопросы поверок СИ и их организационно-техническое обеспечение рассматриваются и изучаются в работах по метрологии. При этом оба направления научных исследований развиваются самостоятельно без заметной связи друг с другом. Опубликовано лишь несколько работ [4, 7, 20], в которых явно или в какой-то степени обнаруживается тенденция зависимости метрологической надежности СИ от комплекса мероприятий метрологического обеспечения.

Анализ вероятностных априорных моделей и статические апостериорные выводы составляют сущность методологических основ современного понимания прикладных аспектов метрологии и теории метрологической надежности СИ. Однако продуктивность и реализуемость априорного анализа зависит прежде всего от того, насколько близки к действительности и просты для использования выбранные модели [8].

В [3, 16] показано, что связующим звеном теории вероятностей и математической статистики может рассматриваться теория информации, которая по выражению С. Кульбака «... есть ветвь математической теории вероятностей и математической статистики, и ... позволяет унифицировать известные результаты и ведет к естественным обобщениям и новым результатам». Теория информации, развитая в работах [1, 3, 16, 21] и др. уже нашла применение в области теории измерений и измерительных устройств [4, 5, 10] и оценке качества и эффективности информационно-измерительных систем [5, 13].

Состав технических средств и организационные мероприятия метрологического обеспечения газоаналитических измерений можно рассматривать как процесс управления качеством.

С позиций кибернетики процесс управления есть прежде всего процесс циркуляции информации между управляемым и управляющими объектами, а важнейшим результатом кибернетики является установление связи между управлением и информационными процессами в информационно-управляющих системах (ИУС) [11, 14].

В отличие от информации вообще или свободной информации [1] в ИУС циркулирует измерительная или техническая информация [3] в виде сигналов, имеющих отражательную (информационную) и регулирующую (управляющую) функции. В свою очередь каждый сигнал характеризуется двумя тесно связанными друг с другом сторонами — содержанием и формой [2, 18].

Основываясь на понятии содержания и формы сигналов ИУС и интерпретации их физического смысла применительно к прикладным аспектам метрологии, в частности к мероприятиям процесса поверки газоанализаторов (ГА), следует отметить, что поскольку содержание сигналов инвариантно относительно преобразований их формы, то независимо от вида поверяемого ГА структура организационно-технических мероприятий процесса по-

верки должна быть адекватной для всех ГА, так как цель комплекса мероприятий метрологического обеспечения всегда остается неизменной и заключается в обеспечении единства и требуемой точности измерений.

Вместе с тем современная теория информации не рассматривает качественного разнообразия сообщений, не определяет их смысловую или семантическую сторону, а поэтому и не позволяет оценить существенность или важность какого-либо сообщения в определенной системе знаний, а также его полезность для получателя, т. е. не рассматривает так называемую прагматическую сторону информации [18]. В отличие от процесса циркуляции информации по техническим системам, восприятие и переработка информации человеком-оператором при осуществлении комплекса мероприятий метрологического обеспечения является процессом познавательным, а сама информация, благодаря которой организуется собственно мыслительная деятельность человека-оператора в принятии решений по управляющим воздействиям и оценке состояния управляемого объекта носит семантическое или предметное содержание. В этом заключается одно из важнейших отличий психического отражения информационных сигналов в мозговых центрах человека при осуществлении мероприятий метрологического обеспечения СИ от процессов переработки информации в логико-вычислительных устройствах ИУС.

Из признаков психического отражения информации следует заключение о том, что при метрологическом обеспечении ГА как операции управления, так правила и критерии оценки соответствия при поверках ГА в зависимости от их точности и условий проведения испытаний, будут иметь отличия по объему испытаний и правилам оценки соответствия.

Таким образом, рассмотрение прикладных аспектов метрологии с позиций теории информации позволяет сделать вывод о том, что обеспечение единства и заданной точности измерений в структуре мероприятий метрологического обеспечения связано с упорядоченной циркуляцией информации в замкнутой информационно-управляющей системе, конечным звеном которой является человек-оператор, обеспечивающий предметное или семантическое восприятие и переработку информации с выработкой оценки ее достоверности и соответствия образцовой мере.

Важность и полезность введения понятий теории информации в науку об измерениях особенно заметны при решении прикладных аспектов метрологии, связанных с принятием или отвержением статистических гипотез [3] о годности ГА по метрологическим показателям при поверках, определением граничных точек, характеризующих разрешающую и пропускную способность, определением критериев и оценок качества функционирования при эксплуатации и др. Покажем возможность решения некоторых из перечисленных задач с позиций теории информации.

Будем считать, что одномерная область измеряемого пространства  $L$  разбита на два непересекающихся подмножества  $n_0$

и  $n_{ii}$ , каждое из которых характеризуется равномерными интервалами  $(-\Delta x_0, \Delta x_0)$  и  $(-\Delta x_{ii}, \Delta x_{ii})$ , в пределах которых передаются сигналы  $x_{0i}$  и  $x_{ii}$ . Поверочная процедура заключается в оценке величины  $x_{ii}$  по  $x_{0i}$ , принятой за меру сравнения. На основании теоремы Байеса, определяющей апостериорные вероятности гипотез по априорным вероятностям событий, в [3] показано, что средняя или взаимная информация связи двух нормально распределенных случайных величин  $x_{0i}$  и  $x_{ii}$ , которую можно интерпретировать как количество информации об  $x_{0i}$ , содержащееся, в  $x_{ii}$ , определяется соотношением

$$I(x_{0i}; x_{ii}) = -\frac{1}{2} \lg(1 - \rho^2), \quad (1)$$

где  $\rho$  — коэффициент корреляции двух случайных величин  $x_{0i}$  и  $x_{ii}$ , определяющий степень связи между ними.

Из (1) следует, что в зависимости от коэффициента корреляции, принимающего значения  $0 < \rho \leq 1$ , количество информации об  $x_{0i}$  содержащееся в  $x_{ii}$  может изменяться от 0 до  $\infty$ .

Обозначая результат измерения передаваемого сигнала  $x_i$  в области измеримого подмножества  $n_0$

$$x_{0i} \approx x_i \pm \Delta x_0 \approx x_i \pm \sigma_0 \quad (2)$$

в области подмножества  $n_{ii}$

$$x_{ii} = x_i \pm \Delta x_{ii} \approx x_i \pm \sigma_{ii}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma_{ii}$  — средние квадратические отклонения результатов измерений; по выборке объема  $n$  можно определить коэффициент корреляции случайных величин  $x_{0i}$  и  $x_{ii}$

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{0i} x_{ii} - \bar{x}_{0i} \bar{x}_{ii}}{\sigma_0 \sigma_{ii}}, \quad (4)$$

где  $\bar{x}_{0i}$  и  $\bar{x}_{ii}$  — средние значения  $x_{0i}$  и  $x_{ii}$  в выборке. Из (1) с учетом (4) получим

$$I(x_{0i}; x_{ii}) = -\frac{1}{2} \lg \left[ \frac{\sigma_0^2 \sigma_{ii}^2}{\sigma_0^2 \sigma_{ii}^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{0i} x_{ii} - \bar{x}_{0i} \bar{x}_{ii} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

Интерпретируя приведенные результаты к ГА и понимая под подмножеством  $n_0$  результаты наблюдений аттестованной газовой смеси или образцового ГА, а под подмножеством  $n_{ii}$  — поверяемого ГА, на основании (5) можно заключить, что количество информации, передаваемое ГА о величине измеряемого параметра и определяемое в общем случае числом различных уровней измеряемой величины или точностью [1, 5],

$$I(x_{0i}; x_{ii}) = \lg \frac{L}{2 \Delta x_{ii}} = \lg n_{ii} \quad (6)$$

зависит от коэффициента корреляции случайных величин на входе и выходе ГА. Следовательно, на основании (5) решающими факторами в определении точности ГА являются объем и тщательность измерений при снятии номинальной статистической характеристики ГА, а также корректность нормирования составляющих погрешности образцовой меры и воспроизводимость результатов измерений.

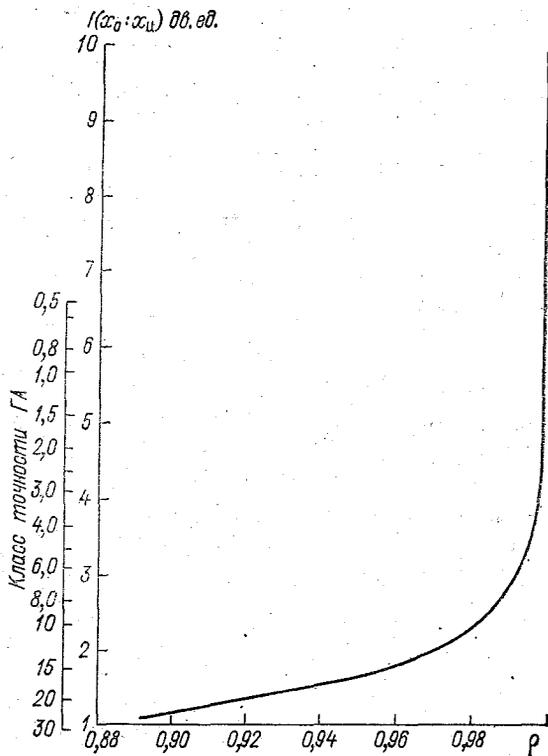


Рис. 1. Зависимость  $I(x_0: x_n)$  от  $\rho$  и соответствующие  $I(x_0: x_n)$  классы точности ГА.

На рис. 1 показана графическая зависимость количества информации  $I(x_0: x_n)$  от коэффициента корреляции  $\rho$  и соответствующие  $I(x_0: x_n)$  классы точности ГА.

Соотношения (1) и (6), обеспечивающие связь информационных и статистических показателей, могут быть использованы для проверки корректности реализации заданных требований к предельным допускам погрешностей ГА при проектировании. Выполнение при проектировании условия

$$\lg \frac{L}{2\Delta x_n} \leq -\frac{1}{2} \lg(1 - \rho^2) \quad (7)$$

обеспечивает техническую реализуемость ГА с заданной погрешностью измерения.

Основываясь на общей теории связи [19, 21], теории передачи информации [2, 17], с учетом специфики информационно-измерительной техники [6] независимо от формы передаваемого сигнала каждое СИ как техническое устройство, преобразующее и передающее измерительную информацию, с точки зрения количества передающей информации можно характеризовать чувствительностью  $\Delta S$ , разрешающей способностью  $\varepsilon$  и пропускной способностью  $n$ .

Чувствительность СИ определяется превышением мощности измеряемого сигнала  $P_c$  над мощностью шумов  $P_{ш}$  при минимально возможном уровне измеряемого параметра и зависит от оператора преобразования [14] измеряемого параметра в электрический сигнал и совокупности технических средств и приемов реализации СИ, обуславливающих превышение уровня сигнала над помехой. При заданной чувствительности количество информации

$$I(x_{и. \min} | \Delta S) = \lg \frac{P_c}{P_{ш}} = \lg \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{и}^2 - \sigma_0^2} \quad (8)$$

определяет меру расхождения [3] между гипотезами о годности или негодности СИ по чувствительности или меру трудности обнаружения сигнала.

Разрешающая способность СИ определяется интервалом квантования измеряемого параметра, равным интервалу погрешности измерений, в пределах которой обеспечивается передача минимума различающей измерительной информации [3]. При нормальном законе распределения  $x_0$  и  $x_{и}$  в пределах интервалов  $(-\Delta x_0, \Delta x_0)$  и  $(-\Delta x_{и}, \Delta x_{и})$  минимум различающей информации равен

$$I(\Delta x \in \Delta x_{и} | \varepsilon) = \frac{(2 \Delta x_{и} - 2 \Delta x_0)^2}{2 \sigma_0^2} \quad (9)$$

Из (9) следует, что требуемая разрешающая способность ГА при их градуировании и поверках может быть обеспечена соответствующим выбором точности образцовой меры, которая во всех случаях не может быть ниже точности вновь разрабатываемых или поверяемых ГА.

Пропускная способность или информационная емкость СИ, обусловленная нормированным интервалом погрешности измерений определяется числом интервалов квантования максимальной величины измеряемого параметра, в пределах которых обеспечивается передача максимума измерительной информации равной  $\lg n$  [1], т. е.

$$I(\Delta x \in \Delta x_{и} | n) = \lg n \quad (10)$$

С учетом оператора преобразования измеряемого параметра в электрический сигнал характеристика согласно (10) не может

быть признана достаточной, поскольку равенство (10) в начальном и конечных участках диапазона ГА может быть обеспечено только при определенной их величине. В отличие от общей теории связи, где пропускная способность канала связи характеризуется длительностью сигнала и полосой пропускаемых частот, пропускную способность ГА целесообразно характеризовать по минимальному и максимальному уровню измеряемого параметра, при которых обеспечивается максимальное значение информации об измеряемом параметре в пределах заданной погрешности измерений. В этом случае на основании (10) с учетом (9), принимая  $\Delta x_0 \approx \sigma_0$ , пропускная способность ГА по минимальному уровню измеряемого параметра определится соотношением

$$x_{и. \min} = \Delta x_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \sqrt{2 \lg n} \right); \quad (11)$$

пропускная способность по максимальному уровню

$$x_{и. \max} = \Delta x_0 (2n - 1) \left( 1 + \frac{1}{2} \sqrt{2 \lg n} \right). \quad (12)$$

Из (9) с учетом (10) может быть получено выражение для определения оптимального соотношения точностей поверяемых и образцовых ГА, при котором обеспечивается передача максимума измерительной информации при поверках

$$\frac{\Delta x_{и}}{\Delta x_0} = \frac{1}{2} \sqrt{2 \lg n} + 1. \quad (13)$$

На основании (13) можно заключить, что выбор соотношения точностей при проведении поверок должен производиться с учетом точности поверяемых ГА.

В результате расчета согласно (13) для ГА различных классов точности получены следующие значения  $\Delta x_{и}/\Delta x_0$ :

Таблица 1

Класс точности ГА . . . . .	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\Delta x_{и}/\Delta x_0$ . . . . .	2,82	2,79	2,73	2,68	2,60	2,52	2,47	2,43
Класс точности ГА . . . . .	4,0	5,0	6,0	8,0	10	15	20	30
$\Delta x_{и}/\Delta x_0$ . . . . .	2,35	2,29	2,24	2,15	2,08	1,93	1,81	1,68

И наконец, основываясь на предельных свойствах информационных мер [3] и понятии энтропии [1] в оценке равновесного состояния систем [15], теория информации совместно с математической статистикой и теорией проверки статистических гипотез позволяет решать задачи по определению показателей достоверности результатов измерений при нормировании погрешности и поверках с учетом ошибок I и II рода, а также исследовать процесс ухудшения качества функционирования ГА при эксплуатации.

Приведенные результаты исследований применимы к оценке показателей качества не только ГА, но и всех типов СИ, что позволяет сделать следующие общие выводы.

1. Глубокая аналогия в целях и содержании организационно-технических задач метрологического обеспечения СИ и информационно-управляющих систем как объектов контроля и управления, выражающаяся в процессе преобразования и циркуляции информации между управляемым и управляющим объектами, а также во взаимосвязи содержания и формы сигналов с количественно-качественными показателями состояния объекта контроля и управления, подтверждает возможность решения задач метрологии с единых обобщающих позиций технической кибернетики и теории информации.

2. Приведенные некоторые результаты свидетельствуют о важности и практической полезности введения в теоретические и прикладные аспекты метрологии основ теории информации, позволили придать новый смысл и содержание коэффициенту корреляции случайных величин на входе и выходе СИ, а также определили возможность использования для оценки метрологических свойств СИ физических характеристик каналов связи: разрешающую способность, пропускную способность по минимуму и максимуму измеряемой величины и зависимость соотношения точностей СИ при нормировании погрешности и поверках от точности разрабатываемых СИ.

3. Введение в статические закономерности оценки качества измерительных устройств и измерений понятий теории информации и изучение общих законов передачи и преобразования измерительной информации применительно к специфике измерений открывает широкие возможности в обобщении и осмысленной оценке научных и организационно-технических мероприятий метрологического обеспечения, а также в получении новых научных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриллюэн Л. Наука и теория информации/Пер. с англ. — М.: Физматгиз, 1960. — 392 с.
2. Зюко А. Г., Коробов Ю. Ф. Теория передачи сигналов. — М.: Связь, 1972, с. 27—36.
3. Кульбак С. Теория информации и статистика/Пер. с англ. — М.: Наука, 1967, с. 11—85.
4. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. — М.: Энергия, 1974, с. 7—70.
5. Краус М., Вошни Э. Измерительные информационные системы/Пер. с нем. — М.: Мир, 1975. — 309 с.
6. Куликовский Л. Ф., Морозов В. К. Основы информационной техники. — М.: Высшая школа, 1971, с. 49—77.
7. Келлин А. В., Криксунов В. М. О сроках поверки радиоизмерительных приборов. — Измерительная техника, 1966, № 3.
8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники, ч. 1. — М.: Сов. радио, 1974. — 549 с.

9. Маликов М. Ф. Основы метрологии. — М.: Госстандарт, 1979. — 477 с.
10. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. — Л.: Энергия, 1968. — 248 с.
11. Новик Н. Б. К вопросу о единстве предмета и метода кибернетики. Кибернетика, Мышление, Жизнь. — М.: Мысль, 1964, с. 110—118.
12. Половко А. М. Основы теории надежности. — М.: Наука, 1964.
13. Прохоренко В. А., Смирнов А. Н. Прогнозирование качества систем. — Минск: Наука и техника, 1976, с. 116—150.
14. Пугачев В. С. и др. Основы автоматического управления. — М.: Наука, 1974, с. 31—39.
15. Разумихин Б. С. Физические модели и методы теории равновесия в программировании и экономике. — М.: Наука, 1975, с. 9—57.
16. Стратонович Р. Л. Теория информации. — М.: Сов. радио, 1975. — 423 с.
17. Советов Б. Я. Теория информации. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — 183 с.
18. Тюхтин В. С. Сущность отражения и теория информации. Кибернетика, Мышление, Жизнь. — М.: 1964, с. 309—317.
19. Харкевич А. А. Борьба с помехами. — М.: Наука, 1965. — 274 с.
20. Цейтлин В. Г. К вопросу надежности измерительных устройств. — Измерительная техника, 1966, № 3.
21. Шеннон К. Э. Работы по теории информации и кибернетики/Пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 829 с.

*В. И. Ануфриев*

## ВРЕМЕННАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ И ОСРЕДНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ

При определении числовых характеристик случайных полей концентраций примесей средствами автоматизированной системы контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ) возникают задачи временной дискретизации параметров загрязнения воздуха (ЗВ). При дискретизации по времени непрерывная по аргументу функция  $x(t)$  преобразуется в функцию  $x(t_i)$  дискретного аргумента  $t_i$ . Реальные процессы ЗВ являются в общем случае нестационарными, представляющими собой сочетание регулярных (суточных, годовых и других) колебаний концентраций примесей и нерегулярных колебаний, обусловленных турбулентностью атмосферы различных временных и пространственных масштабов. При анализе рассматриваемых процессов поведение элемента может быть представлено в виде

$$x(t) = g(t) + p(t), \quad (1)$$

где  $g(t)$  — регулярное,  $p(t)$  — случайное изменение элемента.

Наличие регулярных составляющих в спектре колебаний метеорологического и связанного с ним процесса ЗВ имеет прежде всего астрономическую обусловленность [9]. Так, уровень солнечной радиации, являющейся первопричиной развития земных

атмосферных процессов, зависит в первую очередь от орбитального положения Земли относительно Солнца и времени суток. На регулярные изменения потока солнечного тепла накладываются случайные факторы, к которым относится неоднородность источника излучения: Солнца, земной поверхности, случайные процессы, происходящие в атмосфере и океане [11].

Случайные изменения элемента  $p(t)$ , в свою очередь, представляют в самом общем виде сумму

$$p(t) = s(t) + n(t), \quad (2)$$

где  $s(t)$  — синоптическая компонента спектра (макротурбулентность),  $n(t)$  — мелкомасштабная компонента спектра (микротурбулентность) динамического и конвективного происхождения. Параметры колебаний, составляющих рассматриваемого процесса, можно записать в виде суммы двух видов движений:

$$x(t) = m(t) + n(t), \quad (3)$$

где  $m(t) = g(t) + s(t)$  — низкочастотная и  $n(t)$  — высокочастотная части процесса (мелкомасштабные турбулентные пульсации).

Разделение процесса на два вида движений (3) удобно использовать при разработке требований к средствам измерений. За границу разделения этих двух видов движений обычно принимают мезометеорологический минимум, разделяющий синоптические и микрометеорологические колебания в метеорологических спектрах в интервале периодов от нескольких минут до нескольких часов [8]. Учитывая определяющее влияние метеорологических элементов в формировании структуры спектров процессов ЗВ, интервал частот мезометеорологического минимума должен характеризоваться практически отсутствием колебаний процессов ЗВ в этой части спектра. Таким образом, при постановке задачи измерений в АСКЗВ  $m(t)$  принимается за информативную часть спектра, а  $n(t)$  — за помеху. Низкочастотная часть  $m(t)$  процесса  $x(t)$  является случайной функцией с ограниченным спектром, которая может быть отнесена к классу вырожденных функций, поэтому теорема В. А. Котельникова для таких функций, строго говоря несправедлива.

При решении задачи временной дискретизации данного класса функций необходимо исключить погрешности, вызванные маскировкой частот и высокочастотной случайной компонентой. В связи с этим в литературе приводятся два метода [7]. Один из них состоит в выборе наибольшей частоты дискретизации с учетом наивысшей частоты спектра, выше которой в исследуемом процессе составляющие были бы физически невозможны. Другие методы предполагают фильтрацию процесса перед проведением операции снятия отсчетов, в результате чего в отфильтрованном процессе составляющие с частотами выше граничной частоты  $f_T$  в спектре содержаться не будут. Второй метод имеет ряд преимуществ перед первым, так как позволяет уменьшить

расход машинного времени и тем самым снизить стоимость расчетов.

Достижение наилучшего воспроизведения низкочастотной компоненты  $m(t)$ , рассматриваемой как полезный сигнал, в присутствии высокочастотной компоненты  $n(t)$ , принимаемой за помеху, составляет основу репрезентативных наблюдений и в теоретическом аспекте решается методами теории сглаживания случайных функций [12]. В инженерной практике в качестве оператора сглаживания иногда используют такое преобразование случайных процессов, которое можно легко реализовать и которое удовлетворяет некоторым дополнительным требованиям, например, эксплуатационным, экономическим и др. Такие операторы получили в литературе название квазиоптимальных [3].

Имеются соотношения, позволяющие оценить погрешность при отсечении среднего значения путем суммирования нескольких отсчетов безинерционного средства измерения и получена оценка среднеквадратической погрешности для стационарного случайного процесса. В работе [6] рассматривается более общий случай, когда среднее значение исследуемого процесса определяется как сумма  $n$  отсчетов инерционного прибора. Полученные зависимости в этой работе позволяют произвести оценку методических погрешностей и выбор параметров для используемых метеорологических средств измерений. Результаты этих работ представляют интерес и могут быть использованы для решения методических задач измерения параметров загрязнения воздуха, так как изменчивость этих процессов в большой степени обусловлена воздействием ряда метеоэлементов (например, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра и др.).

Рассмотрим исходные данные, необходимые для разработки квазиоптимального алгоритма осреднения параметров загрязнения воздуха.

Выражение дисперсии погрешности среднего значения, полученного из отсчетов выходной величины инерционного средства измерений, имеет вид [11]

$$\sigma^2(\tau) = M^2 \left\{ \int_0^\infty h(t') dt' \sum_{i=1}^n b_i - 1 \right\}^2 + \sigma_L^2(\tau) + \sigma_W^2 - 2K_{LW}(\tau), \quad (4)$$

где  $\sigma_L^2(\tau) = \frac{1}{T_0^2} \int_0^{T_0} \int_0^{T_0} K_x(t' - t'') dt' dt''$  — дисперсия средней величины случайного процесса на входе в средства измерения за период осред-

нения  $T_0$ ;  $\sigma_W^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_i b_j K_z(t_i - t_j)$  — дисперсия средней величины из  $n$  отсчетов на выходе инерционного средства измерения за период  $T_0$ ;  $K_{LW}(\tau)$  — взаимная корреляционная функция осредненных процессов на входе и оценки  $W$  на выходе средств измере-

ний;  $K_{LW}(\tau) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n b_i \int_0^T K_{xz}(t - t_i) dt' = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n b_i \int_0^T \int_0^\infty K_x(t'' - t_i + t') \times \times h(t') dt' dt''$ ;  $h(t)$  — импульсная переходная функция средств

измерения.

Примем

$$\int_0^{\infty} h(t') dt' \sum_{i=1}^n b_i = \Phi(p) \sum_{i=1}^n b_i = 1, \quad \text{при } p = 0,$$

где  $\Phi(p)$  — передаточная функция газоанализатора. Тогда первый член в выражении (4) обратится в нуль. Из (4) следует, что для определения дисперсии погрешности осредненной выходной величины инерционного средства измерений необходимо располагать данными о частотных свойствах измеряемого процесса, средств измерений и предварительной обработки измерительной информации.

Сопоставляя методы дискретизации и сглаживания измерительной информации, а также учитывая особенности реальных процессов ЗВ [1], частота дискретизации  $f_0 = \frac{1}{T_0}$  в разрабатываемом операторе была принята в 3—10 раз превышающей наивысшую частоту ( $f_r$ ) низкочастотной части спектра  $m(t)$ . При этом одновременно удалилась мелкая структура путем осреднения отсчетов инерционного газоанализатора. Такой алгоритм может быть аппаратно сравнительно просто реализован, что дает ему определенные преимущества по отношению к другим рассмотренным ранее алгоритмам. За граничную частоту  $f_r$  была принята частота, находящаяся внутри частотного интервала, соответствующего мезометеорологическому минимуму, и равная  $2,77 \cdot 10^{-6}$ . Тогда с учетом принятого соотношения  $f_0 = (3 \div 10) f_r$  был получен период дискретизации параметров ЗВ  $T_0 = 6 \div 20$  мин.

Из полученных экспериментальных данных [1] следует, что вес составляющих спектра вблизи мезометеорологического минимума в реальных процессах ЗВ составляет ничтожную часть от общей энергии процесса. Это позволяет несколько ослабить требования к точности определения этих составляющих. Таким образом, окончательное значение периода дискретизации  $T_0$  будет находиться в пределах 20—30 мин, что соответствует надежному выявлению колебаний, начиная с периодов 1 ч 30 мин — 2 ч 30 мин или  $f_0 = (1,1 \div 1,85) \cdot 10^{-4}$  Гц.

Оценки нормированных корреляционных функций процессов измерения двуокиси серы имеют вид [1]

$$K_m(\tau) \approx \sum_{k=1}^{n-r-1} C_{gk} e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_k \tau + \sum_{l=n-r}^n C_{sl} e^{-\alpha_l \tau}, \quad (5)$$

где  $\sum_{k=1}^{n-r-1} C_{gk} + \sum_{l=n-r}^n C_{sl} = 1$  (первая сумма — линейная комбинация затухающих косинусов относится к регулярным, а вторая сумма — к экспоненциальным членам разложения, которые соответствуют случайным компонентам низкочастотной части  $m(t)$  процесса ЗВ). Исходя из опытных данных [7] выборочные стати-

стические модели ЗВ отличаются числом членов разложения и величинами параметров, что приводит к необходимости систематизации выборочных данных параметров ЗВ и обоснования схемы расчета.

При выборе параметров экспериментальных корреляционных функций процессов ЗВ для расчета дисперсий погрешности был рассмотрен ряд подходов [4]. Можно, например, отобрать наиболее часто встречающиеся по частотным свойствам выборки случайных процессов, наблюдаемых в различных пунктах города, или процессы, которые могут вызвать наибольшую дисперсию погрешности. Однако в этих случаях полученные результаты будут нести локальный характер и учитывать в лучшем случае особенности ЗВ данного города (района). Наиболее целесообразным

Таблиц

$C_k$	$\alpha_k \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$	$\omega_{0k} \cdot 10^6$ рад/с	$f_{0k} \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$	$C_k$	$\alpha_k \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$	$\omega_{0k} \cdot 10^6$ рад/с	$f_{0k} \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$
Тип I				0,050	2,77	72,6	11,6
				0,025	2,77	72,6	11,6
0,250	2,77	10,3	1,6	0,050	2,77	80,0	13,2
0,050	2,77	20,7	3,3	0,025	2,77	89,5	14,0
0,075	4,17	31,1	4,9	0,025	2,77	98,2	15,6
0,075	4,17	48,5	7,6	0,025	4,17	145,0	23,2
0,100	2,77	72,6	11,6	0,050	5,55	670,0	106,8
0,450	4,17	0	0	0,250	2,77	0	0
Тип II				Тип III			
0,250	2,77	10,3	1,6	0,05	11,0	10,4	1,6
0,100	4,17	22,2	3,6	0,20	11,0	16,5	2,6
0,100	4,17	28,9	4,4	0,40	11,0	72,6	11,6
0,050	2,77	48,5	7,4	0,05	27,7	697,0	111,0
0,050	2,77	58,1	8,7	0,30	277,0	0	0

оказался предложенный нами подход, предполагающий выявление из множества выборок  $\{x(t)\}$ , полученных в различных городах, некоторых реализаций, которые в частотном смысле наиболее полно характеризуют всю совокупность реализаций, входящих в рассматриваемое множество независимо от частоты их появления.

В результате этой работы из 80 экспериментальных корреляционных функций были отобраны три оценки, которые в частотном отношении заметно отличаются друг от друга и тем самым характеризуют подмножество реальных процессов ЗВ [1, 3]. В таблице приведены параметры оценок типовых корреляционных функций, которые затем были использованы при определении параметров алгоритма осреднения [1].

Проведенные нами исследования показали, что динамические свойства анализатора двуокиси серы ГКП-1 отличаются от образца к образцу, изменяются от времени и зависят от уровня измеряемой концентрации. Из приведенных в работе нескольких видов передаточных функций на данном этапе оказалось наиболее целесообразным использование передаточной функции ГКП-1 в виде [2]:

$$\Phi(p) = \frac{nT_{\Phi}p + 1}{T_{\Phi}p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_{\Phi}$  — постоянная времени газоанализатора,  $n = c_0/c_{\infty}$  — отношение двух выходных значений ГКП-1 (при  $t=0$   $t \rightarrow \infty$ ).

Для начального рассмотрения наибольший интерес представляет случай процессов ЗВ, характеризующихся большим размахом колебаний концентраций примесей (случай  $n \rightarrow 0$ ). Тогда передаточная функция принимает вид апериодического звена

$$\Phi(p) = \frac{1}{T_{\Phi}p + 1}. \quad (7)$$

Выражению (7) при  $t > 0$  соответствует импульсная переходная функция в виде

$$h(t) = \frac{1}{T_{\Phi}} e^{-\frac{1}{T_{\Phi}}t}. \quad (8)$$

По данным работ [2, 5], постоянные времени газоанализаторов ГКП-1 различных образцов  $T_{\Phi}$  могут принимать значения от 20 до 60 с.

В настоящей статье приводятся сведения об особенностях статистической структуры процессов ЗВ, результаты выбора вида оператора временной дискретизации и сглаживания параметров ЗВ, а также обоснованное определение всех необходимых дополнительных данных, используемых при синтезе квазиоптимального алгоритма осреднения параметров ЗВ в функционирующей АСКЗВ.

Данные этой статьи были использованы при разработке расчетного выражения дисперсии погрешности средних, полученных из отсчетов инерционных газоанализаторов. Результаты расчетов, приведенные в работах [3, 4], позволили произвести обоснованный выбор параметров квазиоптимального алгоритма осреднения измеряемых процессов ЗВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ануфриев В. И. Корреляционный анализ процессов изменения концентраций двуокиси серы в атмосферном воздухе. — Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения, 1979, вып. 5, с. 18—23.
2. Ануфриев В. И. Метод определения передаточных функций автоматических кулонометрических газоанализаторов. — Труды ГГО, 1974, вып. 325, с. 175—185.

3. Ануфриев В. И. Вопросы методологии автоматизированных систем контроля и статистических исследований процессов загрязнения воздуха. — Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Л.: ГГО им. А. И. Воейкова, 1979. — 16 с.
4. Ануфриев В. И. Методические вопросы измерения параметров загрязнения воздуха в автоматизированных системах контроля. Тезисы докл. Всес. научно-техн. конф. «Проблемы разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния окружающей среды». — Казань: Татарский ЦНТИ, 1979, с. 55—58.
5. Ануфриев В. И., Зайцев А. С. Статистический анализ результатов международных сравнений автоматических газоанализаторов. — Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 72—80.
6. Грушин С. И., Персин С. М. К вопросу о погрешности измерения средних значений инерционными приборами. — Труды ГГО, 1971, вып. 259, с. 3—13.
7. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2. — М.: Мир, 1971. — 316 с.
8. Колесникова В. Н., Монин А. С. О спектрах колебаний метеорологических полей. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1965, т. 1, № 7, с. 653—669.
9. Монин А. С. Вращение Земли и Климат. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 112 с.
10. Персин С. М. О погрешности методов нахождения средних с помощью аналого-дискретных фильтров. — Труды ГГО, 1971, вып. 259, с. 116—131.
11. Поляк И. И. Численные методы анализа наблюдений. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 212 с.
12. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. — М.: Физматгиз, 1962. — 884 с.

*В. А. Цветков, В. И. Красов*

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АБСОРБЦИОННЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Одним из основных вопросов разработки газоанализаторов, является рациональный выбор структуры построения и оптимизация основных характеристик прибора. В работе [2] показано, что для решения этих задач наиболее предпочтительны информационные показатели, объединяющие единым математическим аппаратом объект измерения, газоанализатор и потребителя информации.

Применительно к абсорбционным газоанализаторам информационная способность равна экспоненте от разности энтропий значений измеряемой величины, например потока излучения, приведенного ко входу фотоприемника до и после измерения. Однако в связи с трудностями вычисления информационных показателей в аналитическом виде [4] воспользуемся численным методом расчета с использованием кусочной аппроксимации.

Предположим, что поток  $\Phi$  на входе фотоприемника и погрешность определения потока  $\Delta\Phi$ , приведенные ко входу фотоприемника, аппроксимируются в виде многочленов:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_0 \cdot F(x_0) = \Phi_0(a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 + a_3 x_0^3) \\ \Delta\Phi &= \delta_0 \Phi_0 + \delta_s \Phi + \delta_n \Phi^2 + \delta'_n \Phi^3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F(x)$  — функция пропускания кювет;  $\Phi_0$  — поток, создаваемый излучателем;  $x_0 = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$  — нормированное значение оптической плотности исследуемой газовой смеси;  $\delta_0$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_n$ ,  $\delta'_n$  — аддитивная, мультипликативная и две нелинейные составляющие погрешностей соответственно;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  — коэффициенты аппроксимации функции пропускания.

Нормированное значение потока

$$\Phi_n = \frac{F(x_0) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}}. \quad (2)$$

Вероятностные характеристики анализируемого процесса представим в виде гистограммы плотностей и распределения потока  $w_i(\Phi)$  на  $i$ -ом участке аппроксимации:

$$w_i(\Phi) = \frac{w_i(c)}{\left| \frac{d\Phi}{dc} \right|} = \frac{\alpha_i}{\Delta x_{0i}} \frac{d^{-1}}{dx_0} \frac{F(x_0) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  — нормированная высота гистограммы распределения концентрации анализируемого газа  $w_i(c)$  ( $\sum \alpha_i = 1$ );  $\Delta x_{0i}$  — интервал аппроксимации нормированной оптической плотности.

Энтропия потока на входе фотоприемника равна сумме неопределенностей на каждом участке аппроксимации, т. е.

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{(i)} \int_{\Delta\Phi_i} w_i(\Phi_n) \ln(w_i(\Phi_n)) d\Phi_n = \\ &= \sum_{(i)} \alpha_i \cdot \ln \frac{\Delta x_{0i}}{\alpha_i} \frac{d}{dx_{0i}} \frac{F_i(x_0) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Усредненная по диапазону измерения потока остаточная неопределенность

$$H_{\text{ср}} = \sum_{(i)} \int_{\Delta\Phi_i} w_i(\Phi_n) \ln \beta^{-1} \Delta\Phi d\Phi_n = \sum_{(i)} \alpha_i \cdot \ln \frac{\Delta_F \beta^{-1}}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad (5)$$

где  $\beta$  — коэффициент, учитывающий законы распределения  $\Phi$  и  $\Delta\Phi$  [3];  $\Delta_F = \Phi^{-1} \Delta\Phi$ .

Пропуская промежуточные вычисления, можно показать, что из формул (1)–(5) можно получить информационную способность

$$N = \exp \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot \ln \left[ \frac{1}{\alpha_i n \Delta_i} \frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right], \quad (6)$$

где

$$\Delta_i = \delta_0 + \delta_s F_i + \delta_n F_i^2 + \delta'_n F_i^3$$

— погрешность измерения функции пропускания, приведенная ко входу фотоприемника,

$$F_i = (a_0 + a_1 x d + a_2 x^2 d^2 + a_3 x^3 d^3) + \\ + \kappa_i (1 - d) \cdot x (a_1 + 2a_2 x d + 3a_3 x^2 d^2) + \\ + \kappa_i^2 (1 - d)^2 x^2 (a_2 + 3a_3 x d) + \kappa_i^3 x^3 (1 - d)^3 a_3,$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial \kappa_i} = x(1 - d)(a_1 + 2a_2 x d + 3a_3 x^2 d^2) + \\ + 2 \kappa_i x^2 (1 - d)^2 (a_2 + 3a_3 x d) + 3 \kappa_i^2 x^3 (1 - d)^3 a_3,$$

$n$  — число участков аппроксимации,  $\kappa_i = i/n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) —

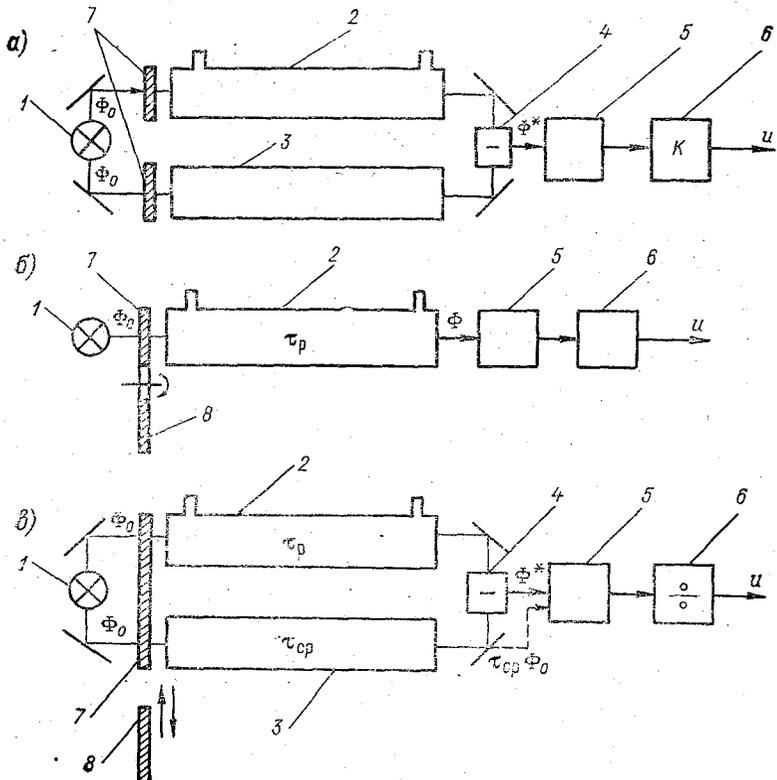


Рис. 1. Структурные схемы абсорбционных газоанализаторов: разности (а), отношения (б) и комбинированная (в).

1 — излучатель, 2 — рабочая кювета, 3 — сравнительная кювета, 4 — устройство вычитания потоков, 5 — фотоприемник, 6 — схема выделения и обработки сигналов, 7 — измерительный фильтр, 8 — эталонный фильтр.

число участков аппроксимации,  $d = x_{\min}/x_{\max}$  — величина, обратная диапазону измерения.

В соответствии с выражением (6) была рассчитана информационная способность для трех структур построения фильтровых абсорбционных газоанализаторов (рис. 1) применительно к задаче контроля окиси углерода в выхлопных газах автомобилей.

На рис. 1 а изображена схема разности, в которой выходной сигнал  $u$  пропорционален разности потоков излучения, прошедших сравнительную и рабочую кюветы, т. е.

$$u = [\tau_{cp} \Phi_0 - \tau_p(1 - A_x)\Phi_0]K, \quad (7)$$

где  $K$  — коэффициент передачи схемы выделения сигнала,  $\tau_p$  и  $\tau_{cp}$  — пропускание рабочей и сравнительной кювет соответственно,  $A_x$  — поглощение потока измеряемым компонентом.

На рис. 1 б изображена схема отношения, реализующая алгоритм отношения потоков, прошедших измерительный и эталонный фильтры:

$$u = \frac{\Phi_{0и}}{\Phi_{0э}} \frac{K_{и}}{K_{э}} (1 - A_x)K. \quad (8)$$

Третья структурная схема (рис. 1 в) является комбинированной. В ней реализовано отношение разности потоков сравнительного и рабочего каналов на их сумму [1], т. е.

$$u = K \frac{\tau_{cp} - \tau_p(1 - A_x)}{\tau_{cp} + \tau_p(1 - A_x)} \Big|_{\tau_{cp} \approx \tau_p} \approx \frac{A_x}{2 - A_x} K. \quad (9)$$

Оценим погрешность определения потока  $\Delta\Phi$  для первой структуры, представленной на рис. 1 а. Реальный выходной сигнал  $u_z$  в результате изменения пропускания кювет коэффициентов передач, шумов фотоприемника и наличия мешающих компонент принимает вид

$$u_z \approx K \cdot \Phi_0 (1 + \delta_K) (1 + \delta_{\Phi_0}) [(\tau_{cp} - \tau_p) + \tau_p \delta_{\Delta\tau} + \tau_p(A_x + \Delta A_x + A_M)] + \Phi_{ш} K + \Delta u_p, \quad (10)$$

где  $\delta_j$  — относительная погрешность  $j$ -го параметра;  $\Phi_{ш}$  — мощность шумов фотоприемника;  $\Delta u_p$  — погрешность регистрирующего устройства;  $\delta_{\Delta\tau}$  — относительная погрешность, вызванная взаимным изменением пропускания рабочей и сравнительной кювет.

Погрешность определения потока  $\Delta\Phi$  в соответствии с (7) и (10) при условии пренебрежения слагаемыми второго порядка малости ( $\delta_j \ll 1$ ,  $A_M \ll A_x$  и  $\Delta A_x < A_x$ ), равна

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \frac{u_z - u}{K} = \Phi_0 [\tau_p \delta_{\Delta\tau} + \delta_K A_x \tau_p + \delta_{\Phi_0} A_x \tau_p + \\ &+ \tau_p A_M + \delta_\varepsilon \tau_p A_x + \tau_p A_x \delta_{cp}] + \Phi_{ш} + \frac{\Delta u_p}{K} = \\ &= \left( \delta_{ш} \tau_p \Phi_0 + \frac{\Delta u_p}{K} + \tau_p \Phi_0 \delta_{\Delta\tau} \right) + \Phi^* (\delta_K + \delta_{\Phi_0} + \delta_M + \delta_\varepsilon + \delta_{cp}), \quad (11) \end{aligned}$$

где  $\delta_\varepsilon = \frac{\Delta A_x}{A_x}$  — относительная погрешность, вызванная изменением коэффициента поглощения;  $\delta_M = \frac{\Delta A_M}{A_x}$  — относительная погрешность, вызванная влиянием мешающих компонентов;  $\Phi^* = \tau_p \Phi_0 A_x$  — разностный поток, приведенный ко входу фотоприемника;  $\delta_{ш} = \frac{\Phi_{ш}}{\tau_p \Phi_0}$  — относительная мощность шумов фотоприемника.

Таблица 1

**Составляющие погрешностей различных структурных схем**

Схема	Погрешность			
	$\delta_0$	$\delta_s$	$\delta_H$	$\delta'_H$
Рис. 1а	$\delta_{ш}, \delta_{\Delta\tau},$ $\frac{\Delta u_p}{u_{max}} A_{max}$	$\delta_\tau, \delta_{\Phi_0}, \delta_K,$ $\delta_\varepsilon, \delta_M$	$\frac{1}{2}, \delta_\varepsilon, \delta_M$	$\frac{1}{6}, \frac{1}{2} \delta_\varepsilon, \frac{1}{2} \delta_M$
Рис. 1б	$\sqrt{2} \delta_{ш}, \delta_{\Delta\tau}, \delta_{\Delta\Phi_0}$ $\delta_{\Delta K}, \frac{\Delta u_p}{u_{max}} A_{max}$	$\delta_{ш}, \delta_{\Delta\Phi_0}, \delta_{\Delta\tau},$ $\delta_{\Delta K}, \delta_\varepsilon, \Delta\delta_M$	$\frac{1}{2}, \delta_\varepsilon, \Delta\delta_M$	$\frac{1}{6}, \frac{1}{2} \delta_\varepsilon, \frac{1}{2} \Delta\delta_M$
Рис. 1в	$\delta_{ш}, \delta_{\Delta\tau}, \delta_{\Delta\Phi_0},$ $\frac{\Delta u_p}{u_{max}} A_{max}$	$\frac{\sqrt{5}}{2} \delta_{ш}, \frac{1}{2} \delta_{\Delta\Phi_0},$ $\delta_\varepsilon, \delta_M, \frac{\Delta u_p}{u_{max}} A_{max}$	$\frac{\sqrt{5}}{4} \delta_{ш}, \frac{1}{2} \delta_\varepsilon,$ $\frac{1}{4} \delta_{\Delta\tau}, \frac{1}{4} \delta_{\Delta\Phi_0},$ $(\delta_M + \delta_M^2)$	$\frac{1}{12}, \frac{\sqrt{5}}{8} \delta_{ш}, \frac{1}{4} \delta_\varepsilon,$ $\frac{1}{8} \delta_{\Delta\tau}, \frac{1}{8} \delta_{\Delta\Phi_0},$ $(\delta_M^2 + \delta_M^3)$

При требовании линейности выходного сигнала от анализируемой концентрации  $c$  в предположении экспоненциальной зависимости поглощения от  $c$  в выражении (11) для погрешности появляются дополнительные слагаемые, пропорциональные потоку  $\Phi^*$  во второй, третьей и т. д. степенях. Опустив промежуточные вычисления, получим выражение для определения погрешности  $\Delta_F$ :

$$\begin{aligned} \Delta_F = \frac{\Delta\Phi}{\tau_p \Phi_0} = & \left( \delta_{ш} + \frac{\Delta u_p}{K \tau_p \Phi_0} + \delta_{\Delta\tau} \right) + \\ & + F(\delta_K + \delta_{\Phi_0} + \delta_M + \delta_\varepsilon + \delta_{\tau_p}) + F^2 \left( \frac{1}{2} + \delta_\varepsilon + \delta_M \right) + \\ & + F^3 \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \delta_\varepsilon + \frac{1}{2} \delta_M \right) + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Первые три слагаемых представляют аддитивную  $\delta_0$  составляющую погрешности в выражении (6), вторые пять — мультипликативную  $\delta_s$  и оставшиеся — нелинейные  $\delta_H$  и  $\delta'_H$ .

Аналогичным образом определены составляющие погрешностей для остальных структурных схем построения газоанализаторов (табл. 1).

Оценим численные значения для каждой из составляющих погрешностей, приведенных в табл. 1.

Погрешность  $\delta_{ш}$ , обусловленную шумами фотоприемника, определим для фотоприемника типа БП-2-1 с мощностью шумов  $\Phi_{пор} \approx 10^{-7}$  Вт и теплового излучателя от газоанализатора ОА2109, излучающего в полосе поглощения окиси углерода примерно  $10^{-4}$  Вт ( $\tau \approx 0,1$ ):

$$\delta_{ш} = \frac{\Phi_{пор}}{\tau \Phi_0} = \frac{10^{-7}}{10^{-5}} = 0,01.$$

Погрешность  $\delta_\varepsilon$  определяется в основном колебаниями температуры  $T$  и давления  $P$  [1] по формуле

$$\delta_\varepsilon = \sqrt{\delta_P^2 + \frac{1}{4} \delta_T^2}; \quad (13)$$

для диапазона изменения давления в пределах от 101,3 до 104,7 кПа ( $\delta_P = \frac{\Delta P}{P}$ ) и температуры от 320 до 330 К ( $\delta_T = \frac{\Delta T}{T}$ ) она равна примерно 3,6 %.

Относительное изменение потока излучения на рабочей и эталонной длинах волн обусловлено в основном изменением температуры излучателя. Полагая, что излучатель — абсолютно чер-

Таблица 2

Значения составляющих погрешностей

Погрешность	Значение	Примечание
$\delta_\varepsilon$	0,036	$\Delta P = 3,33$ кПа $\Delta T = 10$ К
$\delta_{ш}$	0,010	$\Phi_{пор} = 10^{-6}$ Вт, $\Phi_0 = 10^{-4}$ Вт
$\delta_\Phi$	0,025	$\Delta T = 10$ К, $T = 1000$ К, $\lambda = 4,6$ мкм
$\delta_{\Delta\Phi}$	0,001	$\Delta T = 10$ К, $T = 1100$ К, $\lambda_p = 4,6$ мкм $\lambda_s = 4,4$ мкм
$\delta_K$	0,050	$\Delta T = 10$ К
$\delta_{\Delta K}$	0,005	$\Delta T = 10$ К
$\delta_M$	0,020	$c_{max} = 16\%$ , $CO_2$ по шкале „0“ $CO$ с использованием фильтровых кювет
$\Delta\delta_M$	0,005	То же
$\Delta u_p$	0,010	$u_{max} = 1$ В, $A_{max} = 0,2$
$\delta_\tau$	0,020	
$\delta_{\Delta\tau}$	0,002	

ное тело, изменение потока на рабочей  $\lambda_p$  и эталонной  $\lambda_0$  длинах волн равно

$$\delta_{\Delta\Phi} = \frac{\Delta T}{T} \left[ \frac{C}{\lambda_p T} \left( 1 - e^{-\frac{C}{\lambda_p T}} \right)^{-1} - \frac{C}{\lambda_0 T} \left( 1 - e^{-\frac{C}{\lambda_0 T}} \right)^{-1} \right], \quad (14)$$

где  $C = 1,44 \cdot 10^4$  мкм·К.

Аналогичным образом оценены значения остальных составляющих погрешностей табл. 2 с учетом реальных значений в существующих серийных газоанализаторах.

Для вычисления информационной способности по (6) требуется знание коэффициентов  $\alpha_i$ , характеризующих вероятностные параметры анализируемого процесса. Так, например, при исследовании

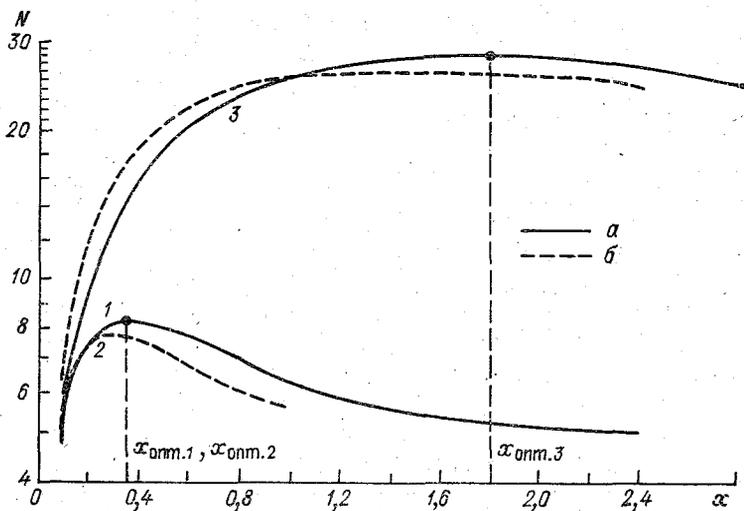


Рис. 2. Зависимость информационной способности газоанализаторов от оптической плотности с учетом распределения концентрации СО по диапазону измерения (а) и при равномерном ее распределении (б).

1 — схема разности, 2 — схема отношения, 3 — комбинированная схема.

довании окиси углерода в выхлопных газах автомобилей необходимо знать концентрации окиси углерода в разных режимах работы двигателя, а также вероятность работы двигателя в том или ином режиме.

На основании статистических наблюдений установлено, что в условиях уличного движения в городах Европы доля работы двигателя в различных режимах составляет [5]: холостой ход — 35 %, ускорение — 22 %, замедление 14 % и постоянная номинальная частота вращения — 29 %, причем в каждом из этих режимов бензиновым двигателем выбрасывается в среднем по объему 7, 1,8, 2 и 2,5 % окиси углерода соответственно.

Полагая в первом приближении распределение концентраций окиси углерода равномерным в каждом режиме работы в диапазоне  $\pm(1,5 \div 2) \%$  можно построить приближенную гистограмму распределения окиси углерода по концентрациям в диапазоне 0—10 %.

Если разбить весь диапазон на десять участков аппроксимации  $i$ , вероятности концентраций  $w_i$  и нормированные коэффициенты  $\alpha_i$  будут равны:

$i$ . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$w_i$ . . . . .	25	63	64	48	15	26	34	34	18	2
$\alpha_i$ . . . . .	0,08	0,19	0,19	0,15	0,05	0,08	0,10	0,10	0,05	0,01

Полученные вероятностные параметры анализируемого процесса  $\alpha_i$  и численные значения составляющих погрешностей  $\delta_i$  каждой структурной схемы подставлялись в (6), затем на ЕС ЭВМ находилась информационная способность  $N$  в зависимости от оптической плотности.

При этом погрешность измерения в выражении (6) определялась как корень квадратный из суммы квадратов отдельных составляющих погрешностей.

Как следует из результатов расчетов по формуле (6), представленных на рис. 2, информационная способность имеет максимум при определенном значении оптической плотности  $\lambda_{\text{опт}}$ , г. е. правомерна задача нахождения оптимальных параметров при проектировании газоанализаторов. Кроме того, сравнительный анализ различных структурных схем построения газоанализаторов позволяет при одних и тех же комплектующих элементах выявить лучшую структуру для поставленной задачи газового анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джемисон Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения. — М.: Сов. радио, 1965.
2. Кавалеров Г. Н., Мендельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. — М.: Энергия, 1974. — 376 с.
3. Николаев В. И. Информационная теория контроля и управления. — Л.: Судостроение, 1973. — 288 с.
4. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. — Л.: Энергия, 1968. — 248 с.
5. Якубовский Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. — М.: Транспорт, 1979. — 198 с.

## **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ**

Существующие ИК-газоанализаторы, хорошо зарекомендовавшие себя при определении концентраций широкого спектра токсичных газов и паров в воздухе промышленных зон [4], позволяют вести наблюдения за концентрациями на уровне ПДК для жилых зон лишь для отдельных загрязнителей атмосферы. Отечественная промышленность выпускает оптико-акустические газоанализаторы только на один загрязнитель — окись углерода: ГМК-3, ГИАМ-1, ГИП-10 и др. Измерение концентраций других поллютантов ( $\text{NO}_x$ ,  $\Sigma\text{CH}$ ,  $\text{SO}_2$  и т. д.) производится приборами, основанными на других физических и химических методах, что затрудняет эксплуатацию и обслуживание приборного парка, находящегося на сети наблюдений Госкомгидромета.

Анализ возможностей оптических газоанализаторов с интерференционными фильтрами, проведенный в [3], показал, что лучшие из зарубежных абсорбционных ИК газоанализаторов, оснащенные многоходовыми кюветами (серия приборов типа «Миран») способны осуществлять контроль концентрации на уровне ПДК для жилых зон только для окиси и двуокиси углерода и ряда веществ, не входящих в число основных загрязнителей, что объясняется малыми величинами ПДК [10] и низкими значениями интегральных коэффициентов поглощения большинства загрязнителей атмосферы.

Кроме того, аналитические возможности фильтровых газоанализаторов ограничиваются недостаточной их избирательностью при анализе сложных многокомпонентных смесей. Особенно сильно влияние углекислого газа и паров воды, имеющих многочисленные полосы поглощения в инфракрасном диапазоне длин волн. Проведенные нами испытания наиболее совершенной модели многокомпонентного ИК газоанализатора «Миран-80» фирмы Уилкс с многоходовой двадцатиметровой кюветой и микрокомпьютером показали, что аналитическое разделение вклада в поглощение ИК излучения интерферирующих с углекислым газом и парами воды загрязнителей атмосферы при помощи только микрокомпьютера «Миран-80» невозможно из-за несоизмеримости их оптических плотностей и отсутствия разработанной методики калибровки газоанализатора по влажности в широком диапазоне изменения внешних условий.

Применение методов осушки и очистки от сопутствующих газов (на входе газоанализатора) приводит к появлению неконтролируемой погрешности измерения, так как силикагели, цеолиты

и другие сорбенты адсорбируют частично и контролируемые компоненты. Ниже приводится расчет минимальных концентраций, которые могут быть определены с помощью фильтровых ИК-газоанализаторов. За типовую принята двухканальная однолучевая оптическая схема (рис. 1) с выходным сигналом  $u_{\text{вых}}$ , пропорциональным разности сигналов рабочего  $u_p$  и эталонного  $u_э$  каналов [6]. Выводы относительно порога чувствительности по концентрации, полученные при анализе данной схемы, могут быть распространены на другие возможные варианты построения структурных схем газоанализаторов.

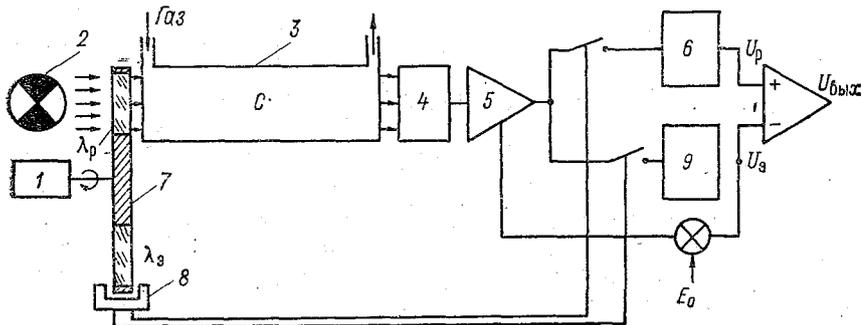


Рис. 1. Двухканальная однолучевая оптическая схема фильтрового ИК газоанализатора.

1 — синхронный двигатель, 2 — ИК источник, 3 — клетка, 4 — ИК приемник, 5 — коллектор, 6 и 9 — рабочий и эталонный детекторы, 7 — модулятор, 8 — устройство синхронизации.

Выходной сигнал газоанализатора в отсутствии мешающих компонентов

$$u_{\text{вых}} = u_э - u_p = \Phi_{0э} S_э K_э - \Phi_{0p} S_p K_p e^{-\epsilon c l}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{0э}$  и  $\Phi_{0p}$  — мощность излучения теплового источника в полосах пропускания фильтров эталонного и рабочего каналов соответственно;  $S_э$ ,  $S_p$  — чувствительность фотоприемника для ИК излучения эталонного и рабочего каналов;  $K_э$  и  $K_p$  — коэффициенты передачи электрических цепей эталонного и рабочего каналов;  $\epsilon$  — интегральный коэффициент поглощения анализируемого газа в полосе пропускания оптического фильтра рабочего канала;  $c$  — концентрация анализируемого газа;  $l$  — толщина поглощающего слоя анализируемого газа.

Введение обратной связи по эталонному каналу для компенсации изменения параметров элементов рассматриваемой схемы соответствует условию уравновешенности схемы

$$u_э = \Phi_{0э} S K_э = E_0, \quad (2)$$

где  $E_0$  — опорное напряжение.

Принимая  $S_o = S_p = S$ ,  $K_o = K_p = K$ , получим

$$u_{\text{вых}} = E_o \left( 1 - \frac{\Phi_{op}}{\Phi_{o3}} e^{-\varepsilon cl} \right) = E_o (1 - \tau), \quad (3)$$

где  $\tau = \frac{\Phi_{op}}{\Phi_{o3}} e^{-\varepsilon cl}$  — оптическое пропускание.

Относительная погрешность выходного сигнала при  $\varepsilon = \text{const}$  соответственно имеет вид

$$\frac{\Delta u_{\text{вых}}}{u_{\text{вых}}} = \frac{\Delta E_o}{E_o} + \frac{e^{-\varepsilon cl}}{1 - \tau} \Delta \left( \frac{\Phi_{op}}{\Phi_{o3}} \right) + \frac{\varepsilon cl \tau}{1 - \tau} \Delta c. \quad (4)$$

Одновременно, учитывая, что

$$\Delta u_{\text{вых}} = u_{\text{вых, min}} = \Phi_{\text{пор}} SK, \quad (5)$$

где  $\Phi_{\text{пор}}$  — порог чувствительности фотоприемника, получим

$$\Delta c = \frac{1}{\varepsilon l} \left[ \frac{\Delta \Phi_{op} / \Phi_{o3}}{\Phi_{op} / \Phi_{o3}} + \frac{1 - \tau}{\tau} \frac{\Delta E_o}{E_o} + \frac{1}{\tau} \frac{\Phi_{\text{пор}}}{\Phi_{o3}} \right]. \quad (6)$$

Полагая, что тепловой источник излучает в заданном спектральном диапазоне как абсолютно черное тело [11], получим при  $c \rightarrow 0$  выражение для минимально определяемой газоанализатором концентрации

$$c_{\text{min}} \approx \frac{1}{\varepsilon l} \left[ \frac{\Phi_{\text{пор}}}{\Phi_{op}} + \frac{C_2}{\lambda T_{\text{ист}}} \frac{\Delta T_{\text{ист}}}{T_{\text{ист}}} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right], \quad (7)$$

где  $\lambda$  — среднее значение длины волны,  $\Delta \lambda = (\lambda_p - \lambda_o)$ ,  $C_2 = 14\,380$  мкм·К,  $T$  — температура телеканала источника излучения.

Значение второго слагаемого в формуле (7) зависит для данной схемы от стабильности температуры источника излучения и пропорционально  $\Delta \lambda$ , значение же первого слагаемого, характеризующего случайную составляющую погрешности, определяется пороговой мощностью фотоприемника и мощностью источника излучения. Можно показать, что для любых структурных схем фильтровых газоанализаторов порог чувствительности

$$c_{\text{пор}} \approx \frac{1}{\varepsilon l} \frac{\Phi_{\text{пор}}}{\Phi_{op}}. \quad (8)$$

Варьирование входящих в (8) параметров на практике ограничено характеристиками существующих фотоприемников ( $\Phi_{\text{пор, min}}$ ), требованиями экономичности ( $\Phi_{\text{ист, max}}$ ), заданными габаритами и светосилой оптической системы ( $l_{\text{max}}$ ).

На практике при использовании фотоприемников с  $\Phi_{\text{пор}} \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$  Вт длина оптического хода луча в газовой кювете ограничивается примерно 20 м [9]. Наличие интерферирующих газовых компонент существенно снижает порог концентрационной чувствительности ИК фильтровых газоанализаторов и делает вообще невозможным определение концентрации анализируемого

газа, если его аналитическая полоса поглощения полностью перекрывается более сильными полосами поглощения мешающих компонентов.

Повысить чувствительность, избирательность и стабильность ИК газоанализаторов можно путем измерения концентрации по поглощению на отдельных линиях анализируемого газа. Известно, что вращательно-колебательные полосы поглощения большинства газов и паров при атмосферном давлении состоят из отдельных линий с полушириной  $0,01-0,1 \text{ см}^{-1}$ . Расстояние между линиями поглощения составляет несколько единиц обратных сантиметров, поэтому интегральный коэффициент поглощения в полосе, состоящей из отдельных линий, на 1—2 порядка меньше, чем коэффициент поглощения для спектральной линии газа. Так, для  $\text{CO}$  по данным [12] интегральный коэффициент поглощения в 155 раз меньше, чем на линии с  $\lambda=4,72 \text{ мкм}$ . Другие спектральные линии  $\text{CO}$  имеют меньшие коэффициенты поглощения; однако в среднем отношение коэффициентов поглощения в полосе и на линиях  $\text{CO}$  составляет примерно 100.

Таким образом, переход к измерению концентрации по поглощению ИК излучения на линиях газа позволяет, согласно (8), повысить чувствительность газоанализатора на два порядка.

Выделение тонкой структуры спектра поглощения приводит к существенному повышению селективности анализа. По нашим оценкам, для полосы  $4,7 \text{ мкм}$  перекрытие линий поглощения  $\text{CO}$  линиями  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  не превышает 1%. Высокая стабильность ИК газоанализатора, работающего на тонкой структуре спектра поглощения, может быть обеспечена благодаря возможности выполнения условия  $\Delta\lambda \rightarrow 0$  (см. ниже).

Не затрагивая область лазерной спектроскопии, не нашедшую пока широкого применения в газовом анализе из-за отсутствия серийно выпускаемых ОКГ с требуемыми параметрами излучения, и ограничивая задачу рассмотрения ИК газоанализаторов с некогерентными источниками излучения, можно выделить два основных способа перехода к измерению концентрации по поглощению излучения в тонкой структуре спектра анализируемого газа: применение газонаполненных приемников или использование селективных источников.

Газоанализаторы с газонаполненными приемниками излучения (оптико-акустические и оптико-термические), работающие по существу на тонкой структуре полосы поглощения анализируемого газа, нашли широкое применение в газовом анализе благодаря относительной простоте конструкции и невысокой стоимости [2]. Однако аналитические возможности этих газоанализаторов ограничиваются недостаточной чувствительностью приемников, основанных на оптико-акустическом и оптико-термическом эффектах, а их применение осложнено тем, что оптико-акустические приемники воспринимают широкий спектр вибрационных колебаний, параметры же оптико-термических приемников сильно зависят от температуры окружающего воздуха.

Более перспективным направлением при решении задач повышения чувствительности и избирательности ИК газоанализаторов является применение селективных источников излучения в сочетании с твердотельными фотоприемниками, свободными от недостатков, присущих газонаполненным фотоприемникам.

Излучение в спектре частот, совпадающем с тонкой структурой полосы поглощения газа, может быть получено от теплового источника при использовании диспергирующей оптической системы. Такой способ получения селективного излучения положен в основу корреляционного метода анализа, при котором поглощение измеряется сразу по нескольким линиям анализируемого газа, выделяемым диспергирующей системой [1].

Например, в многокомпонентном газоанализаторе [13] в качестве диспергирующей системы использованы многощелевая решетка и модулирующее устройство с колеблющимся зеркалом, расположенным во входной щели спектрофотометра. Луч развертывается по двум рядам щелей, что обеспечивает выделение серий линий поглощения анализируемых газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $n$ -гексан, формальдегид) и близких им спектральных интервалов, где поглощение отсутствует (эталонный канал).

Общим недостатком приборов, основанных на корреляционных методах, является их сложность и высокая стоимость, что обуславливается необходимостью применения диспергирующей системы с высокой разрешающей способностью и наличием большого числа движущихся элементов, совершающих взаимосвязанные перемещения.

Селективное излучение может быть также получено путем электронного возбуждения объема газа [5] или под воздействием теплового излучения источника возбуждения (флуоресцентное излучение). Принцип действия флуоресцентных источников излучения основан на способности газов переизлучать часть поглощенной ИК энергии на длинах волн, соответствующих структуре полос поглощения.

Мощность резонансного ИК излучения флуоресцентного источника можно рассчитать по формуле

$$\Phi_{\text{фл}} = \eta \int_0^{\infty} \Phi_{0\nu} (1 - e^{-\varepsilon_{\nu} c l_1}) d\nu, \quad (9)$$

где  $\Phi_{0\nu}$  — спектральная плотность возбуждающего излучения внешнего источника;  $\varepsilon_{\nu}$  — молекулярный коэффициент поглощения ИК излучения рабочим газом источника;  $c$  — концентрация рабочего газа;  $l_1$  — длина кюветы;  $\eta$  — доля поглощенного излучения, которая выйдет из флуоресцентного источника в виде резонансного ИК излучения.

Следует отметить, что величина  $\Phi_{\text{фл}}$  задает мощность излучения флуоресцентного источника от всего его объема.

Учитывая, что величина  $\varepsilon_{\nu}$  отлична от нуля только в небольшом интервале частот  $\Delta\nu$  (внутри полосы поглощения), в кото-

ром спектральная плотность возбуждающего источника меняется незначительно, выражение (9) можно упростить и представить в виде

$$\Phi_{\text{фл}} = \eta \Phi_{0(\Delta\nu)} (1 - e^{-\bar{\epsilon}_\nu c l_1}), \quad (10)$$

где  $\Phi_{0(\Delta\nu)}$  — мощность возбуждающего источника в интервале частот  $\Delta\nu$ ,  $\bar{\epsilon}_\nu$  — среднее значение коэффициента поглощения в пределах полосы поглощения.

Поглощенное излучение приводит к возбуждению колебательных уровней энергии рабочего газа и последующему их разрушению и безызлучательной дезактивации. Отношение вероятностей этих процессов определяет долю поглощения излучения, которая выйдет из флуоресцентного источника в виде резонансного ИК излучения. Таким образом, коэффициент  $\eta$  можно представить в виде

$$\eta = \frac{A_r}{\bar{v}c q + A_r}, \quad (11)$$

где  $A_r$  — вероятность радиационного перехода;  $\bar{v}$  — средняя тепловая скорость молекул;  $q$  — суммарное сечение дезактивирующих столкновительных процессов.

Следует отметить, что при расчете величины  $q$  необходимо учитывать не только сечение процесса  $(V-T)$ -релаксации молекул, но и  $(V-V)$ -релаксации, так как последний имеет очень большое сечение (до  $10^{-15}$  см<sup>2</sup>) и может приводить к такому перераспределению молекул по колебательным уровням, которое связано с уменьшением выхода резонансного излучения.

Подставляя выражение (11) в (10), получим

$$\Phi_{\text{фл}} = \Phi_{0(\Delta\nu)} \frac{1 - e^{-\bar{\epsilon}_\nu c l_1}}{\bar{v}c q + A_r} A_r. \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что величина  $\Phi_{\text{фл}}$  сначала увеличивается с ростом  $c$ , а затем начинает уменьшаться. Таким образом, выражение (12) имеет максимум при некотором  $c_0$ . Значение  $c_0$  можно получить, дифференцируя выражение (12) по  $c$  и приравнявая числитель получающейся дроби к нулю. С учетом того, что

$$\frac{A_r \bar{\epsilon}_\nu l_1}{\bar{v}q} \ll 1,$$

приближенные выражения для расчета  $c_0$  и  $\Phi_{\text{фл}}$  равны:

$$c_0 \approx \sqrt{\frac{A_r}{\bar{\epsilon}_\nu l_1 \bar{v} q}}, \quad (13)$$

$$\Phi_{\text{фл}} \approx \Phi_{0(\Delta\nu)} \frac{A_r \bar{\epsilon}_\nu l_1}{\bar{v}q}. \quad (14)$$

Полагая  $\bar{\nu} \approx 10^{-18} \text{ см}^{-1}$ ,  $v \approx 10^5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $q \approx 10^{-17} \text{ см}^2$ ,  $A_r \approx 100 \text{ с}^{-1}$  и  $l_1 \approx 10 \text{ см}$ , получаем  $c_0 \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\Phi_{\text{фл}} \approx \Phi_0(\Delta \nu) \cdot 10^{-3}$ .

Для полосы CO с  $\lambda = 4,7 \text{ мкм}$  и источника накачки с температурой тела накала  $T \approx 900 \text{ К}$  и интегральной мощностью около  $10 \text{ Вт}$  значение  $\Phi_{\text{фл}}$  равно примерно  $10^{-4} \text{ Вт}$ . Эта мощность излучается во всем объеме флуоресцентного источника.

Так как мощность флуоресцентного излучения сравнительно невелика, основными техническими задачами при конструировании ИК газоанализаторов с флуоресцентными источниками излучения являются отделение флуоресцентного излучения от излучения источника возбуждения и обеспечение достаточной энергетической

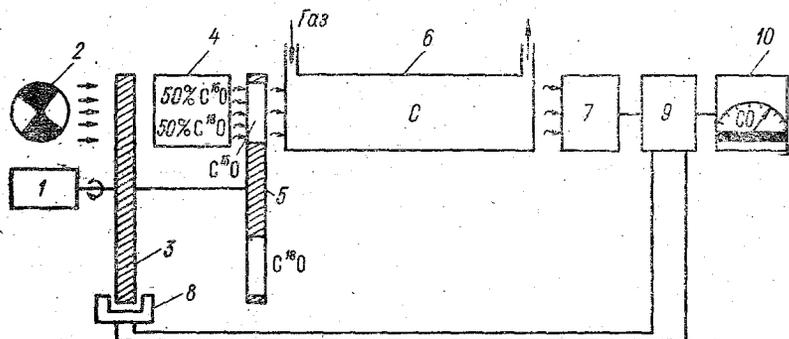


Рис. 2. Блок-схема ИК газоанализатора с флуоресцентным источником.

1 — синхронный двигатель, 2 — ИК источник, 3 и 5 — скрещенные модуляторы, 4 — камера с флуоресцирующим газом; 6 — кювета, 7 — фотоприемник, 8 — устройство синхронизации, 9 — блок обработки и выделения сигнала, 10 — показывающий прибор.

эффективности системы. Ряд устройств для одновременного разделения первичного и вторичного излучения и варианты схем газоанализаторов с флуоресцентными источниками запатентованы в [8].

В серийно выпускаемом приборе [14] с диапазонами измерения концентраций CO 0—20, 0—50, 0—100 и 0—200 млн<sup>-1</sup> использован другой способ выделения флуоресцентного излучения основанный на использовании послесвечения газов, время жизни которого составляет десятки миллисекунд.

Схема прибора приведена на рис. 2. Газоанализатор работает следующим образом. Камера 4, заполненная разреженной смесью изотопов C<sup>16</sup>O и C<sup>18</sup>O, расположена между скрещенными модуляторами 3 и 5, вращаемыми синхронным двигателем 1 с частотой 83 об/с. Таким образом, во время облучения объема камеры 4 ИК источником 2 кювета 6 и фотоприемник 7 экранируются и фотоприемник регистрирует только прошедшее через кювету флуорес

центное излучение. Модулятор 5, представляющий собой газовое колесо с фильтровыми камерами, заполненными при атмосферном давлении  $C^{16}O$  и  $C^{18}O$ , служит также для разделения спектров излучения  $C^{16}O$  и  $C^{18}O$ . Так как встречающаяся в природе и технике окись углерода на 99,8% состоит из  $C^{16}O$ , то излучение на линиях  $C^{16}O$  будет поглощаться окисью углерода, находящейся в кювете, тогда как излучение на линиях  $C^{18}O$  пройдет без изменения и может быть использовано в качестве эталонного.

Линии излучения  $C^{16}O$  и  $C^{18}O$  незначительно сдвинуты друг относительно друга ( $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ), поэтому второе слагаемое в формуле (7) для данной схемы близко к нулю и влияние изменения температуры на показания прибора несущественно, что позволяет отказаться от термостатирования. Использование отношения сигналов рабочего (излучение  $C^{16}O$ ) и эталонного (излучение  $C^{18}O$ ) каналов, выделенных при помощи синхронного детектирования, позволяет получить результат измерения независимым от дрейфа параметров элементов конструкции газоанализатора.

Коэффициент пропускания оптических окон описываемого прибора может меняться на 50% без снижения характеристик прибора, что позволяет эксплуатировать его в условиях повышенной запыленности и конденсации влаги.

Работа по тонкой структуре полосы поглощения при длине кюветы примерно 1 м и постоянной времени электронного устройства 25 с, а также при наличии паров воды и  $CO_2$  с концентрациями по крайней мере 20 000:1 по отношению к содержанию  $CO$  позволяет достигать порога концентрационной чувствительности  $CO$ , равного  $0,05 \text{ млн}^{-1}$ .

Описанный прибор, разработанный в США, успешно использовался на космической станции Скайлэб. После изменения газового наполнения излучающей и фильтровых камер прибор может быть использован для измерения концентраций  $NO$  и  $CO_2$ .

Сравнительно небольшая  $U$  образная кювета, отказ от термостатирования, пробоподготовки и коррекции показаний за счет высокой стабильности и селективности прибора позволили конструкторам сконструировать газоанализатор в небольшой переносный блок при сохранении высоких метрологических характеристик.

Конструкция газоанализаторов не включает дорогостоящих элементов, поэтому их себестоимость при массовом производстве не превышает себестоимости оптико-акустических газоанализаторов. Перспективность создания и развития таких приборов можно оценить, например, с помощью конструктивной эффективности  $G$ , базирующейся на статистическом анализе существующих абсорбционных газоанализаторов и характеризующей качество конкретного прибора. Конструктивная эффективность равна объему возможностей газоанализатора  $V$ , выраженному через основные его характеристики, деленному на затраты по созданию прибора,

выраженные, например, массой газоанализатора  $m$ . В соответствии с [7] выражение для  $G$  принимает вид:

$$G = \frac{V}{m} = 972 D^{-0,25} \delta^{-0,58} t^{-0,45} t_c^{0,36} \Theta^{0,15} m^{-1}, \quad (15)$$

где  $D$  — минимальный диапазон измерения ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );  $\delta$  — класс газоанализатора (%);  $t$  — время переходного процесса (с);  $t_c$  — стабильность газоанализатора (ч);  $\Theta$  — температурный диапазон работы ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Для рассмотренного выше газоанализатора минимальный диапазон измерения  $D=25 \text{ мг}/\text{м}^3$  ( $20 \text{ млн}^{-1}$ ), масса прибора около 30 кг, время переходного процесса при длине кюветы 1 м определяется временем прокачки анализируемой газовой смеси по газовому тракту и не превышает 120 с.

Класс газоанализатора при существующем порядке аттестации газоаналитических приборов не может быть меньше удвоенного значения погрешности аттестации ПГС, поэтому можно принять  $\delta=5\%$ . Так как в газоанализаторе отсутствует блок коррекции и подстройки, то  $t_c \approx 25$  ч. Подставив эти значения в формулу (15), получим:

$$G = 972 \cdot 25^{-0,24} \cdot 5^{-0,58} \cdot 120^{-0,45} \cdot 25^{0,36} \cdot 30^{0,15} \cdot 30^{-1} = 3,62 \text{ ранг}/\text{кг}.$$

Зная средний статистический уровень развития абсорбционных газоанализаторов как функцию текущего года  $T$ , т. е.  $\bar{G}(T) = 0,024(T-1970)$  [7], можно показать, что созданный с указанными параметрами газоанализатор будет перспективен по крайней мере в течение ближайших 30 лет, пока его конструктивная эффективность  $G$  не станет хуже среднего статистического уровня  $\bar{G}$ .

Проведенный анализ указывает на перспективность использования газоанализаторов с селективными некогерентными источниками излучения для решения задач контроля загрязнения атмосферы и позволяет сделать заключение о целесообразности разработки таких газоанализаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батчер С., Чарлсон Р. Введение в химию атмосферы. — М.: Мир 1977. — 270 с.
2. Бреслер П. И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. — Л.: Энергия, 1980. — 164 с.
3. Гоженко Н. А. и др. Аналитические возможности и области применения оптических анализаторов с интерференционными фильтрами. — Сборник науч. трудов ВНИИАП. Оптические и электрооптические методы и приборный анализ состава веществ. — Киев, 1977, с. 7—19.
4. Иванов Я. А. Приборы газового анализа, выпускаемые фирмами США, Англии, ФРГ. — М.: Машиностроение, 1963. — 126 с.
5. Королева Е. А., Хворостовский С. Н., Хворостовская Л. Е., Цветков В. А. Исследование резонансного излучения колебательных полос молекул CO и CO<sub>2</sub>. Труды ГГО, 1981, вып. 453.

6. Красов В. И., Малейко Л. В., Цветков В. А. Инфракрасный газоанализатор двуокси углерода и водяного пара в атмосфере. — Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 18—26.

7. Красов В. И., Цветков В. А., К вопросу о выборе газоанализаторов для систем контроля загрязнения атмосферы. Всес. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния окружающей среды». Тезисы докл. Казань, 1979, с. 88—89.

8. Недисперсионный ИК газоанализатор с флуоресцентным источником. — Патент Великобритании № 1350231, 1974.

9. Проспект фирмы Wilks/Foxboro — США, 1977.

10. Руководство по контролю загрязнения атмосферы/Под ред. М. Е. Берлянда. — Л.: Гидрометеоздат, 1979.

11. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972. 534 с.

12. Golden В. М., Yeung E. S. Analytical lines for long-part infrared absorption spectrometry of air pollutants. — Anal. Chem., 1975, vol. 47, N 13, p. 2132—2135.

13. Decker J. A. Hadamard-transform exhaust analysis spectrometer. — Appl. Opt., 1971, vol. 10, N 1, p. 24—27.

14. Kazasek F. W. Infrared fluorescence analysis. — Research/Development, Nov., 1972, p. 36—37.

*М. С. Алейников, Н. М. Галимулин,  
В. И. Красов, Е. М. Яковлева*

## **О ПРИМЕНЕНИИ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ**

Для контроля концентраций токсичных газов и паров на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) [12] необходимо повышение чувствительности газоанализаторов. Одним из способов повышения чувствительности спектрофотометрических газоанализаторов является сжатие анализируемой смеси, приводящее к уширению полосы поглощения и, как следствие, к увеличению интегрального поглощения оптического излучения, что позволяет понизить минимально определяемую концентрацию анализируемого газа [3, 7, 9].

При использовании модели полосы поглощения оптического излучения газом СО в области 4,7 мкм, предложенной в [8], для расчета значения изменения пропускания в зависимости от общего давления газовой смеси  $\text{CO} + \text{N}_2$  ( $\text{N}_2$  — уширяющий газ) нами получено, что с увеличением давления газовой смеси до  $2 \cdot 10^3$  гПа интегральное поглощение увеличивается в 2,6 раза, а с увеличением давления газовой смеси до  $10^4$  гПа поглощение увеличивается в 24 раза (расчеты произведены для концентрации СО в газовой смеси 0,1 % об.). Техническая реализация описанных в [3, 7] способов повышения давления в рабочей кювете приводит к усложнению газоанализаторов в целом.

В настоящее время промышленностью выпускаются пьезокерамические ультразвуковые излучатели различных геометриче-

ских форм, которые широко используются в электронно-оптических приборах [5, 6, 8, 11].

Рассмотрим вопрос о применении ультразвука для повышения давления в газовой кювете.

Полное статическое давление в жидкой или газообразной среде, в которой распространяется звуковая волна, определяется выражением Стокса [10]

$$P = \rho_0 V_{S0}^2 (\gamma^{-1} + \theta), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность среды (в недеформированном состоянии);  $V_{S0}$  — лапласовская скорость в среде;

$$\gamma = 1 + \frac{\alpha_p^2 V_{T0}}{c_V} T$$

— показатель адиабаты Пуассона (где  $\alpha_p$  — коэффициент объемного расширения,  $V_{T0}$  — ньютоновская скорость звука, равная для идеального газа корню квадратному из отношения начального давления газа  $P_0$  к начальной плотности газа  $\sqrt{P_0/\rho_0}$ ;  $c_V$  — теплоемкость газа,  $T$  — абсолютная температура газа);  $\theta = \delta\rho/\rho_0$  — сжатие газа.

Решение уравнения (1) для реальной газовой смеси сопряжено со значительными трудностями и не всегда возможно. В [1, 4, 13] приведены выражения для определения среднего значения акустического давления в произвольной точке полупространства. В частности, звуковое давление в полупространстве, отстоящем на расстоянии  $l$  от излучателя, для сферической волны определяется выражением

$$P = i \omega \rho \frac{V_{нS}}{2\pi l} e^{i\omega t - kl}, \quad (2)$$

а для плоской волны — выражением

$$P = i \omega \rho \frac{V_{нS}}{l} e^{i\omega t - kl}, \quad (3)$$

где  $V_{н}$  — скорость звука на поверхности излучателя;  $\rho$  — плотность среды;  $\omega = 2\pi f_{зв}$  — круговая частота звука;  $l$  — расстояние от излучателя до плоскости сечения площадью  $S$ , в которой определяется звуковое давление;  $k = \frac{\omega}{c_{зв}}$  — коэффициент затухания звука, распространяющегося в газе со скоростью  $c_{зв}$ .

Используя формулу Эйлера для комплексных чисел, выражения (2) и (3) запишем в виде

$$P = \omega \rho \frac{V_{нS}}{2\pi l} e^{-kl} (i \cos \omega t - \sin \omega t), \quad (4)$$

$$P = \omega \rho \frac{V_{нS}}{l} e^{-kl} (i \cos \omega t - \sin \omega t). \quad (5)$$

Из (4) и (5) находятся амплитуды звуковых давлений по выражениям:

$$P_m = \omega \rho \frac{V_n S}{2\pi l} e^{-kl} \text{ — для сферической волны,} \quad (6)$$

$$P_m = \omega \rho \frac{V_n S}{l} e^{-kl} \text{ — для плоской волны.} \quad (7)$$

Полное статистическое давление в жидкой или газообразной среде, в которой распространяется звуковая волна, определяется выражением

$$P = P_0 + \delta P_0, \quad (8)$$

где  $P_0$  — давление в среде без ультразвука;  $\delta P_0$  — амплитуда звукового давления.

Следовательно, определив по формуле (6) или (7) амплитуду звукового давления ( $P_m = \delta P_0$ ) для соответствующей конфигурации газовой кюветы и формы излучателя и подставив ее значение в (8), находят полное статическое давление газовой смеси в кювете при распространении в ней звука.

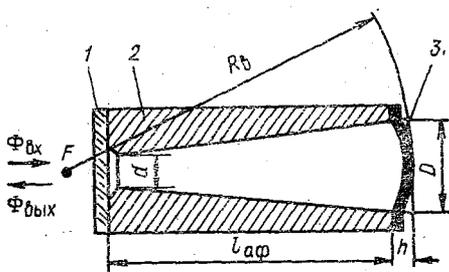


Рис. 1. Рабочая кювета с пьезокерамическим ультразвуковым вибратором. 1 — оптическое окно, 2 — афокал, 3 — фокусирующий ультразвуковой вибратор;  $F$  — точка фокуса ультразвукового вибратора,  $l_{аф}$  — длина афокал,  $R_B$  — радиус вибратора,  $h$  — высота сферического сегмента вибратора,  $d$  и  $D$  входной и выходной диаметры афокал,  $\Phi_{вх}$  — входящий в афокал поток,  $\Phi_{вых}$  — выходящий из афокал поток.

Выведем формулу для расчета среднего значения амплитуды звукового давления для кюветы, представленной на рис. 1. Такая кювета может быть использована для увеличения длины пути оптических лучей, а также для построения газоанализаторов, работающих на использовании отрицательного оптико-акустического эффекта [2].

Ультразвуковой вибратор 3 выполнен в виде сферического сегмента. Для такой конфигурации кюветы и вибратора амплитуда звуковой волны, достигшей входного торца кюветы, будет определяться выражением

$$\delta P_0 = \omega \rho \frac{V_n \left( D_{аф} \frac{R_B - l_{аф}}{R_B} \right)^2}{4\sqrt{2} \cdot l_{аф}} e^{-\frac{\omega}{c_{зв}} l_{аф}}. \quad (9)$$

Заменив в (9)  $l_{аф}$  на текущее значение длины афокал  $x$  и взяв интеграл по этой длине, получим среднее значение амплитуды звукового давления в конусе:

$$\overline{\delta P_0} = \frac{1}{l_{\text{аф}} - h} \frac{\omega \rho V_{\text{н}} D_{\text{аф}}^2}{4\sqrt{2} \cdot R_{\text{в}}} \left[ E_i\left(-\frac{\omega x}{c_{\text{зв}}}\right) + \frac{2R_{\text{в}} c_{\text{зв}}}{\omega} e^{-\frac{\omega}{c_{\text{зв}}} x} - \frac{\left(1 + \frac{\omega}{c_{\text{зв}}} x\right)^2}{\omega^2} e^{-\frac{\omega}{c_{\text{зв}}} x} \right]_{x_1=h}^{x_2=l_{\text{аф}}} \quad (10)$$

где  $E_i(-\omega x/c_{\text{зв}}) = e^{-\frac{\omega}{c_{\text{зв}}} x}/x$  — интегральная показательная функция.

Рассмотрим пример расчета среднего значения амплитуды звукового давления в кювете (рис. 1). Пусть размеры кюветы с вибратором будут равны:  $l_{\text{аф}}=100$  мм,  $D_{\text{аф}}=19,5$  мм,  $R_{\text{в}}=144,4$  мм,  $h=0,4$  мм. Ультразвуковой излучатель (вибратор) изготовлен из пьезокерамики ЦТС-19. Для этого излучателя  $V_{\text{н}}=4140$  м/с,  $f_{\text{зв}}=30$  кГц. Считаем, что кювета заполнена атмо-

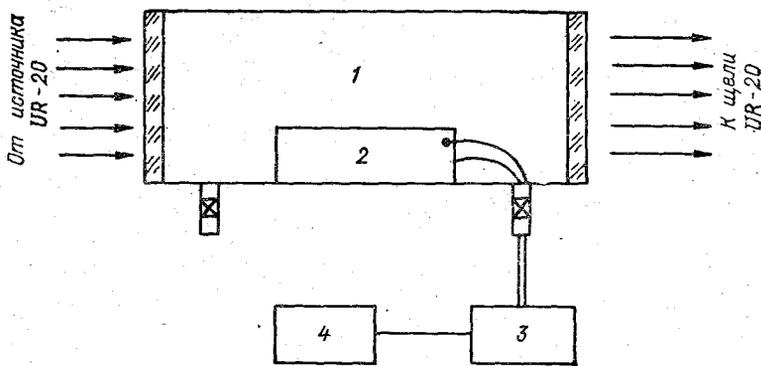


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 — кювета, 2 — излучатель, 3 — усилитель мощности, 4 — звуковой генератор.

сферным воздухом, и принимаем скорость звука в воздухе 330 м/с, а плотность воздуха  $1,293 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Тогда, подставив в (10) пределы интегрирования, получим  $\overline{\delta P_0}=399,9$  гПа. Расчеты показывают, что такое увеличение давления вызовет увеличение поглощения излучения газом СО в области 4,7 мкм в 1,8 раза.

Правомочность использования рассмотренных выше формул для расчета среднего давления в кюветах проверена экспериментально.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. В газовую кювету 1 длиной  $l=110$  мм и диаметром  $D=45$  мм с окнами из NaCl помещен полый цилиндрический излучатель 2 из пьезокерамики ЦТС-19 длиной  $l_1=27$  мм и диаметром  $d=18$  мм. Из кюветы эвакуируется воздух и в ее полость вводится 20 см<sup>3</sup> СО, разбавленного на 50% атмосферным воздухом. Давление газовой смеси в кювете составляет 113 гПа. Цилиндри-

ческий излучатель 2 возбуждается от звукового генератора 4 (ЗГ-33) через усилитель мощности 3 (ТУМ-50). Напряжение питания излучателя 120 В,  $f=25$  кГц. По формуле (6) найдены средние значения звукового давления в нескольких сечениях кюветы, а по ним определено среднее значение звукового давления во всей кювете, которое составит приблизительно 23 гПа, т. е. при возбуждении кюветы ультразвуком полное статическое давление газовой смеси в кювете будет 136 гПа. Расчет интегрального поглощения для СО в области 4,7 мкм по методике [9] показывает, что при таком давлении поглощение увеличится примерно в 1,5 раза по сравнению с поглощением при давлении 113 гПа.

На рис. 3 представлены спектры поглощения излучения газом СО в кювете 1 (см. рис. 2) без возбуждения ультразвуковых колебаний (рис. 3 а) и с возбуждением (рис. 3 б). Анализ спектра поглощения показывает, что интегральное поглощение излучения газом СО ( $\tau$ ) возросло примерно в 1,6 раза ( $\tau_{\max}$  увеличилось от 0,4 до 0,47; уширение полосы поглощения по уровню 0 и по полуширине спектра составило  $35 \text{ см}^{-1}$ ).

Таким образом, расчетные и экспериментальные значения интегрального поглощения оптического излучения газом СО при возбуждении в газовой смеси звуковых колебаний мало отличаются друг от друга. Это свидетельствует о том, что для расчета звукового давления в газовых кюветах различных форм можно пользоваться выражениями (6) и (7), преобразовав их для конкретных форм кювет (например, так, как это сделано выше для полой конической кюветы).

Следовательно, применение ультразвука в газовых кюветах газоаналитической аппаратуры приводит к увеличению полного статического давления газовой смеси и к увеличению интегрального поглощения мощности излучения светового потока. Периодическим включением и выключением ультразвукового излучателя легко осуществить модуляцию давлением, глубина которой будет определяться мощностью излучателя, частотой ультразвука, формой и размерами газовой кюветы.

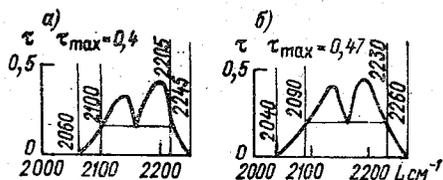


Рис. 3. Спектры поглощения излучения окисью углерода без возбуждения ультразвуковых колебаний  $f=0$  (а) и с возбуждением колебаний,  $f=25$  кГц (б).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бражников Н. И. Инженерно-физический журнал, 1970, т. XIX, № 1.
2. Бреслер П. И. Элементы теории и расчета оптико-акустических газоанализаторов. — В кн.: Автоматические газоанализаторы. М.: Изд-во ЦИТИ Электропром, 1961.

3. Герловин Я. И., Слободская Н. В. Оптика и спектроскопия, 1959, т. VII, вып. 1.
4. Гитис М. Б., Химунин А. С. О поправках на дифракцию при измерении коэффициента поглощения и скорости звука. — Акустический журнал, т. XIII, вып. 3, 1968.
5. Глозман И. Н., Пьезокерамика. — М.: Энергия, 1979.
6. Дамон Р., Мэлони В., Мак-Магон Д. Взаимодействие света с ультразвуком. Явление и его применение. — В кн.: Физическая акустика, принципы, методы. Пер. с англ. под ред. М. Г. Михайлова. М.: Мир, 1977. 311 с.
7. ИК газоанализаторы и сигнализаторы «Миран-1», «Миран-2». — Проспект фирмы ФРГ, 1978.
8. Лин Е. Акустооптическое взаимодействие в волноводных структурах. — В кн.: Введение в интегральную оптику. Пер. с англ. под ред. Т. А. Шмаонова, М.: Мир, 1977. 294 с.
9. Москаленко Н. Н. Функция спектрального пропускания в некоторых инфракрасных полосах  $H_2O$ , а также  $CO$  и  $CH_4$ . — ИАН СССР, Физика атмосферы и океана, 1968, т. IV, № 7.
10. Ноздрев В. Ф., Федорищенко И. В. Молекулярная акустика. — М.: Высшая школа, 1974.
11. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве. — М.: Сов. радио, 1971.
12. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. — Под ред. М. Е. Берлянда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979.
13. Шендаров Н. И. Волновые задачи гидроакустики. — М.: Судостроение, 1972.

*Е. А. Королева, Л. Э. Хворостовская,  
С. Н. Хворостовский, В. А. Цветков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПОЛОС МОЛЕКУЛ $CO$ И $CO_2$

Абсорбционный метод газового анализа является одним из основных для исследования качественного и количественного состава атмосферы. Метод основан на измерении потока излучения до и после его прохождения в анализируемой газовой среде. Сравнивая потоки, можно при известном значении коэффициента поглощения  $k_v$  определить концентрацию поглощающего компонента. Точность измерений связана с относительной величиной поглощенного излучения, стабильностью светового потока источника излучения и точностью измерений коэффициента поглощения.

Очевидно, что наибольшее поглощение испытывает излучение, распределение интенсивности которого по частотам совпадает с частотной зависимостью  $k_v(\nu)$ . Тепловые источники излучают в широком спектре частот и поэтому недостаточно эффективны для измерения малых концентраций составляющих атмосферы. Такие измерения требуют мощного селективного источника, спектр излучения которого близок к спектру поглощения исследуемого газа.

Источник с такими свойствами можно получить, используя флуоресценцию оптически возбужденного газа, идентичного исследуемому [2]. Способ получения резонансного инфракрасного излучения состоит в том, что газ возбуждают широкополосным инфракрасным излучателем, при этом в газе возникает спонтанное излучение, частоты которого совпадают с частотами поглощения того же газа. Однако коэффициент полезного действия такого источника невелик.

В данной работе рассмотрен другой способ возбуждения излучения источника с указанными спектральными свойствами — электрический разряд в том же газе, что и исследуемый. Основным возбуждающим фактором в такой системе является электронный удар с молекулами газа. Изменяя условия в разрядной трубке, такие, как давление газа, разрядный ток, форма и расположение электродов и т. д., можно добиться преимущественного возбуждения уровней определенной энергии за счет изменения функции распределения электронов по скоростям.

Целью настоящего исследования было создание достаточно мощного источника резонансных колебательных полос окиси углерода и углекислого газа с центрами на длинах волн  $\lambda = 4,6$  мкм и  $\lambda = 4,3$  мкм соответственно. Таким источником являлся разряд в углекислом газе в разрядной трубке [1], имеющей форму полого катода. Блок-схема установки с разрядной трубкой представлена на рис. 1. Полый катод 1 выполнен из листового никеля в виде двух коаксиальных цилиндров длиной 10 см, диаметрами 4 и 2 см. Внешний цилиндр служит анодом, а внутренний катодом. Выводы электродов, впаянные в стеклянную оболочку разрядной трубки, сделаны из молибдена. Одно из торцевых крошек 6 полого катода выполнено из флюорита  $\text{CaF}_2$ . Углекислый газ, поступающий из вакуумной системы 4 в объем полого катода, содержит не более 0,1% примесей. Давление в разряде измерялось вакуумметром 5 (ВТ-3) с поправочным коэффициентом для углекислого газа, равным 0,94 [3]. Напряжение на электроды разрядной трубки подавалось от источника питания 3

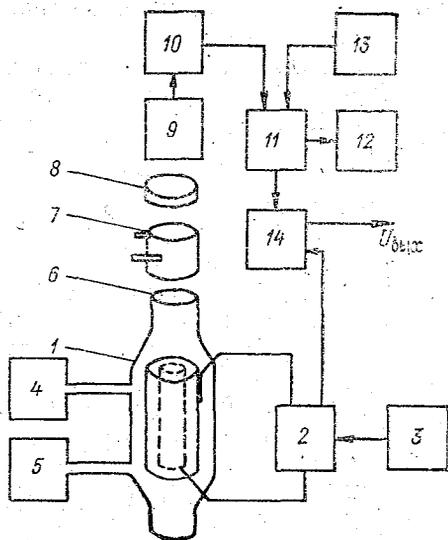


Рис. 1. Блок-схема установки с полым катодом.

1 — полый катод, 2 — модулятор, 3 — блок питания, 4 — вакуумная система с газовым баллоном, 5 — вакуумметр, 6 — флюоритовое окно, 7 — кювета, 8 — фильтр, 9 — фотосопротивление, 10 — предусилитель, 11 — усилитель, 12 — осциллограф, 13 — генератор, 14 — синхронный детектор.

(УИП-1) и составляло 400—700 В. Это напряжение модулировалось в модуляторе 2 прямоугольными импульсами с частотой 510 Гц.

Излучение из полого катода, пройдя через интерференционный фильтр 8, попадало на фотоспротивление 9 типа ФСГ-223А1 с максимумом чувствительности на длине волны 4 мкм и с длинноволновой границей чувствительности на длине волны 9 мкм. Охлаждение фотоспротивления производилось жидким азотом.

Интерференционные фильтры имели максимум пропускания равный 60 % падающего излучения, на длинах волн, равных 4,36, 4,54 и 4,72 мкм. Полуширина фильтров 0,1 мкм.

Сигнал с фотоспротивления попадал на малошумящий предусилитель 10, затем на резонансный усилитель 11 типа У2-6 и синхронный детектор 14. Проверка амплитудных и частотных характеристик импульсов и настройка У2-6 производилась с помощью осциллографа 12 (С1-47Б).

Для измерения абсолютной интенсивности падающего на фотоспротивление инфракрасного излучения использовалась система калибровки сигналов 13, состоящая из генератора прямоугольных импульсов Г5-54 и делителя напряжения, включенных на входе схемы регистрации. Изменяя амплитуду выходных импульсов с генератора Г5-54 и сравнивая сигналы на измерительном приборе синхронного детектора от импульсов генератора и от фотоспротивления, определяли коэффициент передачи электроизмерительной части установки. Мощность светового потока, падающего на окошко фотоспротивления, определялась по калибровочной кривой и паспортными данными фотоспротивления. В стационарном режиме работы фотоспротивления ошибка измерения потока не превышает 5 % и обусловлена главным образом изменением свойств фотоспротивления во времени.

Измерения инфракрасного резонансного излучения молекулы СО и СО<sub>2</sub> проводились в разряде в СО<sub>2</sub> для давлений газа  $p$  изменяющихся от 0,53 до 10,7 гПа, и токов в разряде  $I = 5 \div 30$  мА. Полученные интенсивности колебательных полос углекислого газа и окиси углерода, соответствующие контурам пропускания интерференционных фильтров, представлены в таблице. Интенсивность излучения, падающего на окошко фотоспротивления составляет  $10^{-9}$  Вт.

В условиях эксперимента соотношение телесных углов, заключающих излучение, падающее из центра разряда на окошко фотоприемника и окошко разрядной трубки, такое, что поток излучения, падающий на флюоритовое окошко разрядной трубки диаметром 4 см, в  $10^5$  раз больше потока, регистрируемого фотоприемным устройством.

Таким образом, на окошко разрядной трубки попадает излучение мощностью  $10^{-4}$  Вт, образующееся при резонансных колебательных переходах в молекулах СО и СО<sub>2</sub>. Эта оценка несколько занижена, так как не учитывалась объемность источника излучения.

Интенсивность излучения  $J \cdot 10^{-9} \text{Вт}$ 

l / Ma	P гПа														
	0,53	0,80	0,87	1,02	1,22	1,41	2,0	2,54	3,35	4,15	4,4	5,0	6,4	7,6	9,1

Углекислый газ ( $\lambda_{\text{max}}=4,36$  мкм)

5	2,6	2,6	4,4	2,8	1,2	2,6	2,2	—	1,4	0,6	—	0,4	0,5	—	—	—
10	4,6	5,0	6,4	5,0	3,2	4,6	4,2	0,8	3,4	2,2	1,6	0,7	0,9	0,08	—	1,0
15	5,0	5,6	8,4	7,8	6,0	7,0	5,0	2,0	2,2	3,2	1,6	1,8	1,1	0,14	2,0	1,3
20	6,2	8,0	7,2	9,0	7,2	8,2	7,8	2,8	3,2	3,6	1,2	2,4	1,8	2,6	1,4	0,9
25	6,8	10,8	14,4	8,6	9,4	6,6	6,8	3,2	2,0	4,4	1,6	3,2	3,0	4,4	1,6	1,2
30	7,8	9,6	12,0	8,6	8,0	9,8	6,0	4,8	1,8	5,4	1,6	4,0	3,6	4,0	1,6	2,0

Оксид углерода ( $\lambda_{\text{max}}=4,72$  мкм)

5	3,6	3,6	2,0	3,0	0,4	2,6	2,0	—	1,0	0,4	—	0,2	—	—	—	—
10	6,2	5,8	7,8	7,4	0,8	3,0	3,6	0,7	1,4	2,0	1,1	0,6	0,2	0,5	—	0,8
15	5,8	5,2	10,8	10,0	1,8	4,4	5,8	1,0	1,6	3,0	1,3	1,3	0,8	1,2	1,0	1,2
20	6,4	3,8	8,5	10,4	4,6	5,6	7,0	2,8	1,6	3,4	1,0	1,8	1,2	1,6	1,2	0,7
25	8,0	4,4	10,2	9,4	7,4	6,8	6,4	3,2	1,6	3,8	1,3	2,4	2,0	2,4	1,2	1,2
30	9,2	5,0	9,6	8,0	7,4	6,4	5,6	3,4	2,2	2,6	1,6	2,6	1,4	4,2	1,3	1,3

Оценивать мощность излучения, выходящего непосредственно из области разряда, следует с учетом поглощения газа  $\text{CO}_2$  в холодном столбе длиной 8 см между окошком разрядной трубки и торцом электродов. Доля излучения  $\alpha$ , попадающая на флюоритовое окошко, рассчитана исходя из экспоненциального закона поглощения и представлена на рис. 2. Коэффициенты поглощения, использованные для расчета, были взяты из работы [4] и приведены к условиям данного эксперимента. Расчеты показали, что колебательное излучение окиси углерода практически полностью доходит до окошка разрядной трубки, а полоса излучения углекислого газа ослабляется в зависимости от давления на 20—50 %. Оценки концентрации окиси углерода были сделаны ранее в работе [1]. Очевидно, что приближая окошко разрядной трубки к области разряда, можно сократить долю поглощаемого излучения углекислого газа.

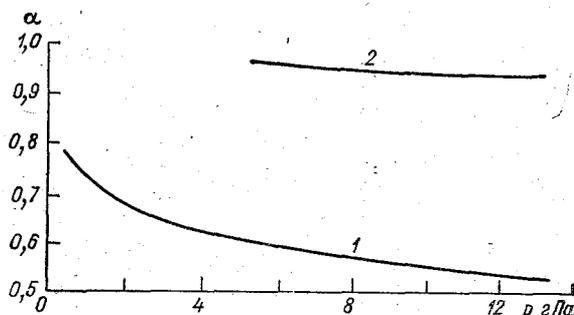


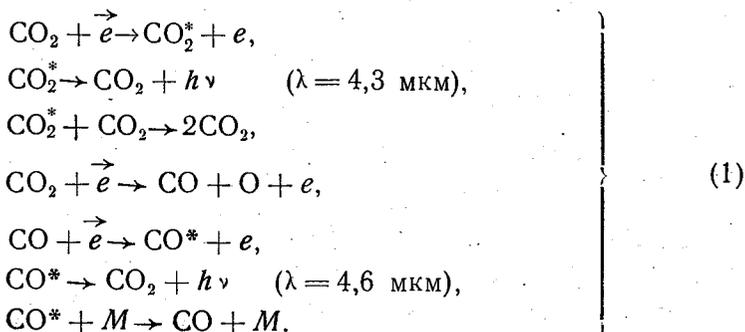
Рис. 2. Доля излучения  $\text{CO}_2$  (1) и  $\text{CO}$  (2), попадающая на окошко полого катода.

Коэффициент полезного действия источника можно оценить, сравнивая вложенную в разряд мощность с мощностью резонансных полос окиси углерода и углекислого газа, излучаемых полым катодом в телесный угол 4л. Легко подсчитать, что если на окошко разрядной трубки радиусом 2 см, находящееся на расстоянии 13 см от центра разряда, попадает  $10^{-4}$  Вт, то мощность, излучаемая во все стороны в каждой из колебательных полос составит  $2 \cdot 10^{-2}$  Вт. Разряд потребляет мощность примерно 15 Вт, следовательно, коэффициент полезного действия источника для каждой из полос составляет 0,12 %. Эта оценка несколько занижена, так как не принималась во внимание объемность источника.

Качественная проверка селективности исследуемого источника и его пригодности для целей газового абсорбционного анализа была произведена с помощью кюветы 7 с выводами для ввода газовых смесей. Кювета помещалась между источником излучения и фотоспротивлением (см. рис. 1).

При заполнении кюветы чистой окисью углерода при давлении, равном атмосферному, интенсивность излучения, проходящего через фильтр с максимумом пропускания на длине волны  $\lambda = 4,72$  мкм, падала практически до нуля, а при использовании интерференционного фильтра с максимумом пропускания на  $\lambda = 4,36$  мкм, сигнал регистрирующей системы не изменялся.

Если атмосферный воздух в кювете обогащался углекислым газом, то при совмещении кюветы с фильтром, имеющим максимум пропускания в области колебательной полосы  $\text{CO}_2$ , сигнал от источника ослаблялся до 80 % в зависимости от концентрации  $\text{CO}_2$  в кювете. Физически наблюдаемые эффекты можно объяснить следующим образом. Столкновение электронов с молекулами углекислого газа не только возбуждает различные (в том числе и колебательные) уровни, но и приводит к диссоциации молекул углекислого газа  $\text{CO}_2$



Молекула  $\text{CO}_2$  диссоциирует на молекулу окиси углерода  $\text{CO}$  и атом кислорода  $\text{O}$ . Молекула  $\text{CO}$  в свою очередь сталкивается с электронами и возбуждается. Так происходит заселение резонансных колебательных уровней  $\text{O}1$  молекулы  $\text{CO}$  и  $\text{OO}1$  молекулы  $\text{CO}_2$  в газовом разряде. Разрушение этих уровней может происходить различными путями, наиболее вероятные из них — спонтанное излучение и дезактивация при столкновении с молекулами газа в нормальном, невозбужденном состоянии. Составим уравнение баланса для уровня  $\text{OO}1$   $\text{CO}_2$ .

Уравнение для уровня  $\text{O}1$   $\text{CO}$  имеет аналогичный вид и в дальнейшем рассматриваться не будет.

Поток возбужденных молекул на уровень  $\text{OO}1$   $\text{CO}_2$  можно записать в дифференциальной форме:

$$[\text{CO}_2] \cdot n_e v_e \sigma, \tag{2}$$

где  $[\text{CO}_2]$  — концентрация углекислого газа в разряде,  $v_e$  — скорость электронов,  $\sigma$  — сечение возбуждения уровня  $\text{OO}1$   $\text{CO}_2$  электронным ударом,  $n_e$  — концентрация электронов.

Процессы разрушения уровня запишутся из второй и третьей строк выражения (1) следующим образом:

$$[\text{CO}_2^*] \cdot A + [\text{CO}_2^*] \cdot [\text{CO}_2] \cdot K, \tag{3}$$

где  $[CO_2^*]$  — концентрация возбужденных молекул  $CO_2$  в состоянии  $OO1$ ,  $A$  — вероятность спонтанного излучения с колебательного уровня,  $K$  — константа скорости дезактивации уровня  $OO1$   $CO_2$  при столкновении с молекулами  $CO_2$ .

Величина  $K$  измерена в работе [5] и при 300 К составляет  $300 \text{ с}^{-1} \text{ гПа}^{-1}$ . Вероятность спонтанного разрушения уровня  $A = 400 \text{ с}^{-1}$ . Видно, что при давлении  $CO_2$  в разряде, равном 1,33 гПа, время разрушения возбужденного колебательного уровня в этих процессах сравнимо.

В общем виде уравнение баланса для молекул  $CO_2^*$  в разряде по (2) и (3) запишется

$$[CO_2] \cdot n_e v_e \sigma = [CO_2^*](A + [CO_2] \cdot K). \quad (4)$$

Интенсивность  $J$  излучения полосы 4,3 мкм с уровня  $OO1$   $CO_2$  запишется непосредственно в виде:

$$J = [CO_2^*] \cdot Ah \nu. \quad (5)$$

Подставив (4) в (5), получим

$$J = \frac{[CO_2] \cdot n_e v_e \sigma}{A + [CO_2] \cdot K} Ah \nu. \quad (6)$$

Рассмотрим предельные случаи больших и малых давлений. При достаточно большом давлении ( $p > 2,67$  гПа) можно считать, что все разрушение уровня  $OO1$   $CO_2$  идет только путем столкновений с частицами. В этом случае (6) преобразуется к виду:

$$J = \frac{n_e v_e \sigma}{K} Ah \nu. \quad (7)$$

В этом выражении с измерением давления в разряде меняются величины  $n_e$  и  $v_e$ , причем  $n_e$  обычно с ростом  $p$  растет, а  $v_e$  — уменьшается, т. е. для давлений  $p > 2,67$  гПа может наблюдаться максимум интенсивности, вызванный конкуренцией этих факторов.

При низких давлениях разрушение уровня происходит преимущественно при спонтанном излучении и тогда (6) запишется

$$J = [CO_2] \cdot n_e v_e \sigma h \nu. \quad (8)$$

Все сказанное относительно (7), справедливо и для (8), но из-за роста  $CO_2$  с увеличением давления наблюдаемый максимум  $J$  будет резче выражен. Эти выводы совпадают с результатами, приведенных в таблице. Интенсивность измеряемого излучения имеет несколько максимумов, причем первый, самый острый, соответствует давлению  $p \approx 0,94$  гПа, а последующие, менее ярко выраженные, — давлениям  $p \approx 4 \div 5$  гПа. Такая зависимость интенсивности полос ИК излучения источника от давления позволяет выбрать для измерений оптимальные условия в разряде и, следовательно, повысить чувствительность абсорбционного ме-

года газового анализа за счет увеличения мощности источника. Следует отметить стабильность оптических характеристик источника и связанную с этим хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Созданная лабораторная модель источника излучения дает достаточно мощное селективное излучение, обладает сравнительно высоким коэффициентом полезного действия и пригодна для целей газового абсорбционного анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишератин К. Н., Королева Е. А., Хворостовская Л. Э. Определение концентрации окиси углерода методом хемиллюминесценции. — Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 53—58.
2. Недисперсионный ИК газоанализатор с флуоресцентным источником. — Патент Великобритании № 1350231, 1974.
3. Хавкин Л. П. Об измерении давлений различных газов термоманометром. Журнал технической физики, т. 25, 1955, с. 726—740.
4. Comrani P., Fang C. S., Pungle H. W. Infrared absorption coefficients for certain pollutance gases. — Appl. Spectr., 1972, vol. 26, N 3, p. 75—78.
5. Lepoutre F., Louis G., Manseam H. Collisional relaxation in CO<sub>2</sub> between 180 K and 400 K measured by the spectrophons method. — Chem. Phys. Lett., 1977, vol. 48, N 3, p. 509—515.

*В. И. Красов, В. Б. Милев, И. С. Яновский*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОИОНИЗАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ АММИАКА

Автоматизированный контроль аммиака необходим в связи с тем, что он входит в перечень приоритетных ингредиентов загрязнения атмосферы и источников промышленных выбросов.

Исходя из того, что предельная санитарная норма концентрации аммиака в производственных помещениях составляет 20 мг/м<sup>3</sup>, максимальная допустимая концентрация аммиака в воздухе при длительном пребывании обслуживающего персонала — 70 мг/м<sup>3</sup>, максимальная допустимая концентрация аммиака при кратковременном пребывании — 200 мг/м<sup>3</sup>, взрывоопасная смесь образуется при концентрации свыше 400 мг/м<sup>3</sup> [1]. Целесообразно исследовать метод, который позволял бы иметь как высокую чувствительность, так и большой динамический диапазон измерений. Нам представляется, что фотоионизационный метод удовлетворяет перечисленным требованиям.

Приборы, выпускаемые в настоящее время (табл. 1), не отвечают требованиям селективного быстрого действия, компактности и не могут быть применены для задач автоматизированного контроля [2].

В 1977 г. ВНИИ утвердил применение в промышленности индикатора высокой чувствительности, который представляет собой полоску бумаги, смоченной в специальном растворе. В атмосфере аммиака полоска бумаги краснеет.

Приборы, выпускаемые зарубежными фирмами, приведены в табл. 2. [3].

Анализ парка приборов показывает, что их характеристики не удовлетворяют постоянно растущим требованиям контроля загрязнения атмосферы и воздуха на промышленных объектах. По

Таблица

Тип прибора	Метод измерения	Минимальный диапазон, мг/м <sup>3</sup>	Быстродействие, с	Потребляемая мощность, В·А	Масса, кг	Примечание
Газоанализатор ФЛ-5501	Фотометрический		150—600	150	70	По чувствительности не аттестован. Градуируется на месте эксплуатации
Газоанализатор универсальный переносный УГ-2	Химический (основан на окрашивании порошка в индикаторной трубке)	0—30	120	—	3,2	Срок годности трубки 1 мес.
Сигнализатор-индикатор аммиака СКА-1	Полупроводниковый (основан на сорбции аммиака на полупроводниковом кристалле)	1500	3	10	—	Срабатывает при превышении порога
Газоанализатор ГИП-7	Спектральный	0—5, 0—25 %	40	90	51	
Сигнализатор СПА-2	Кондуктометрический	400	—	—	—	Срабатывает при превышении порога

чувствительности ни один из них, кроме американского «Биллион-эйр», не может быть использован для контроля ПДК аммиака в атмосфере. Большим недостатком приборов является низкое быстродействие, что исключает применение их в качестве сигнализаторов взрывоопасной концентрации, когда скорость срабатывания является решающим фактором. В этом смысле выгодно отличается от других прибор СКА-1, но он имеет существенный недостаток (так же как приборы СПА-2, УГ-2) — малый срок автономной работы (необходима частая профилактика, замена активных элементов, калибровка). Большие габариты, масса и потребляемая мощность приборов тоже ограничивают широкое их применение.

Фотоионизационный метод, разработанный в ГГО для цели измерения углеводов в атмосфере [4], может быть с успехом применен и для измерения аммиака. Из неорганических соединений, которые подвергаются ионизации и являются интересными при определении углеводов, представляют интерес аммиак, окись азота, сероводород.

В настоящей статье исследуется возможность применения фотоионизационного метода для контроля аммиака на фоне воздушно-углеводородной смеси.

Как указывалось в [4], аммиак обладает относительно низкой фотоионизационной чувствительностью, но вполне достаточной для определения его в воздухе на уровне ПДК.

Таблица 2

Тип прибора	Метод	Диапазон измерений	Фирма
„Кальдос“	Кондуктометрический	0—1 % 0—100 %	Гартман и Браун (ФРГ)
„Гэсаларм“	Термохимический	0—700 мг/м <sup>3</sup>	Зигер (Англия)
„Урас-1“	Инфракрасный	0—0,1 %	
„Лири“	Инфракрасный	0—0,3 %	
„Бекман“	Инфракрасный	0—2 %	
„Ионофлюкс“	Кондуктометрический	0—50 мг/м <sup>3</sup> 0—10 <sup>4</sup> мг/м <sup>3</sup>	Гартман и Браун (ФРГ)
„Дуктолит“	Кондуктометрический	0—50 мг/м <sup>3</sup>	Юнкалотор (ГДР)
„Биллион-эйр“	Ионизационный	0—3,4 · 10 <sup>-2</sup> мг/м <sup>3</sup> 0—34 мг/м <sup>3</sup>	МСА (США)

В данной работе были применены два фотоионизационных детектора с источниками излучения на длине волны 123,6 нм (криптоновые лампы с окнами из MgF), объединенных в двухканальную схему для исключения влияния поглощения кислорода и паров воды, а также собственных шумов детекторов.

Селективное определение аммиака в атмосферном воздухе, содержащего значительные концентрации углеводов и окислов азота, возможно только путем специальной подготовки пробы газа.

Одной из простейших схем является дожигание углеводов при температуре 400—500 °С [5]. Исследования, проведенные с указанным типом конвертора, показали, что при полном дожигании углеводов аммиак не подвергается распаду. Работа с макетом осуществляется по схеме в двух режимах: с дожиганием углеводов и с поглощением аммиака (рис. 1).

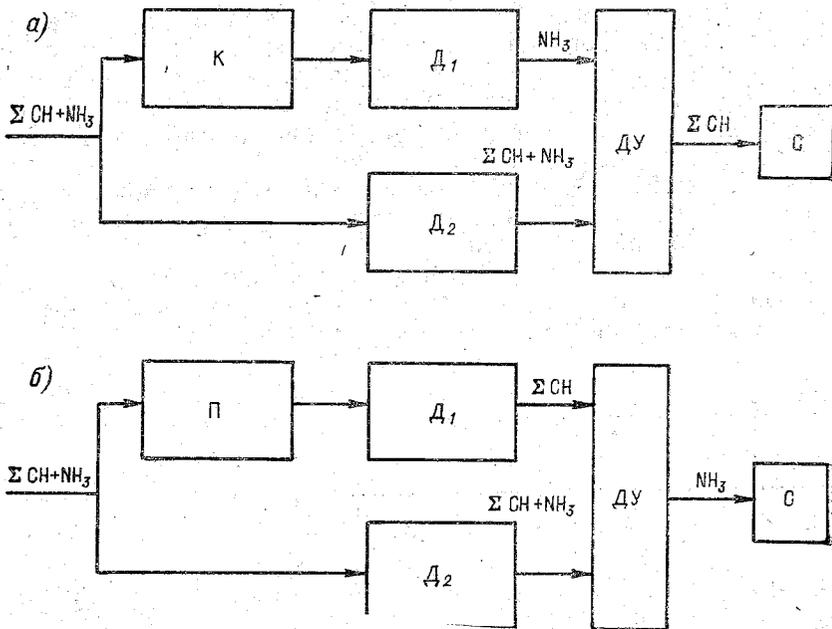


Рис. 1. Схемы газоанализаторов суммы углеводородов (а) и аммиака (б). К — конвертер дожигания углеводородов, П — поглотитель аммиака,  $D_1$  и  $D_2$  — фотоионизационные датчики, ДУ — дифференциальный усилитель, С — самописец.

В первом режиме с дожиганием углеводородов на выходе датчика  $D_1$ , появляется сигнал, пропорциональный концентрации аммиака; на выходе датчика  $D_2$  — сигнал, пропорциональный концентрации смеси, на выходе дифференциального усилителя ДУ — сигнал, пропорциональный сумме углеводородов.

Во второй схеме поглотитель на концентрированной серной кислоте полностью поглощает аммиак. На выходе дифференциального усилителя получается сигнал, пропорциональный концентрации аммиака. По второй схеме исследовались характери-

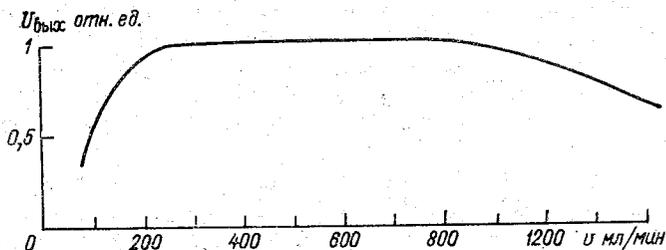


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала ( $U_{\text{вых}}$ ) от скорости прокачки пробы ( $v_{\text{пр}}$ ).

стики макета фотоионизационного газоанализатора: по влиянию влажности, расхода и оценки чувствительности (рис. 2). Было установлено, что изменения влажности на входе в макет от 30 до 90 % не влияют на показания газоанализатора. Чувствительность газоанализатора составила 0,1 мг/м<sup>3</sup>. Градуировочная характеристика представлена на рис. 3. Линейная часть характеристики лежит в диапазоне 0,1—1000 мг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, использование метода фотоионизации для селективного определения аммиака целесообразно для построения автоматических газоанализаторов с основной приведенной погрешностью измерения 10 % и диапазоном измерения 0,5—1000 мг/м<sup>3</sup>.

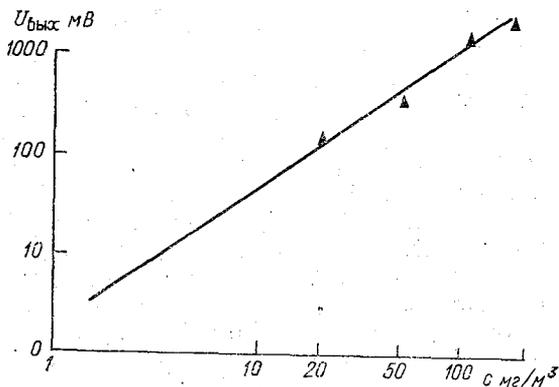


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ( $U_{\text{вых}}$ ) от концентрации аммиака ( $c$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила техники безопасности при эксплуатации аммиачных установок.— М., ОНТИприбор, 1967.
2. Каталог. Приборы для определения взрывоопасных и токсичных газов.— М., ОНТИприбор, 1968.
3. Лебедев В. Ф., Андрущенко Л. И. Методы и приборы для определения концентрации аммиака в воздухе производственных помещений.— Холодильная техника, 1975, № 6, с. 58—60.
4. Миляев В. Б., Красов В. И. Применение фотоионизационного метода для контроля загрязнения атмосферы.— Труды ГГО, 1979, вып. 421, с. 44—52.

## ОСНОВЫ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА СЕРНИСТОГО ГАЗА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

Проблема контроля качества атмосферного воздуха в настоящее время приобретает еще большую актуальность. Количество попадающих в атмосферу вредных примесей непрерывно растет. В первую очередь это относится к веществам, выброс которых в атмосферу носит массовый характер. Одним из них является сернистый газ. Если в 1929 г. выброс сернистого газа составил 25,4 млн. т, то в 1970 г. было выброшено в атмосферу 90—145 млн. т.

Метеорологические факторы могут еще более усугубить вредное воздействие загрязнителя на гигиенические свойства окружающего воздуха. Указанные факторы приводят к необходимости непрерывного автоматического контроля сернистого газа в атмосфере.

В настоящее время для измерения концентрации сернистого газа применяются кулонометрические газоанализаторы ГКП-1. Серьезным недостатком электрохимических газоанализаторов является их низкая избирательность к сернистым соединениям, большая зависимость результатов измерения от температуры, расхода анализируемой газовой смеси, изменения параметров окружающего воздуха. Эти и многие другие факторы приводят к тому, что погрешности измерения ультрамикрконцентраций, в частности, сернистого газа электрохимических газоанализаторов составляют  $\pm 20\%$  и более.

Оптические абсорбционные методы анализа как в инфракрасной (ИК), так и в ультрафиолетовой (УФ) области являются высокоизбирательными. Однако применять эти методы для измерения ультрамикрконцентраций окислов азота, двуокиси серы и др. нецелесообразно, так как габариты и стоимость ИК и УФ газоанализаторов чрезмерно возрастут, стабильность показаний значительно снизится, эксплуатация приборов усложнится.

В 60-х годах сначала в США, а затем в Японии и других странах на смену электрохимическим газоанализаторам, предназначенным для определения концентрации сернистого газа, содержащегося в атмосферном воздухе, пришли пламенно-фотометрические. Эти газоанализаторы обладают очень высокой чувствительностью и позволяют измерять концентрацию двуокиси серы, равную нескольким единицам  $\text{млн}^{-1}$ . В то же время необходимо отметить, что селективность пламенно-фотометрических газоанализаторов к сернистым соединениям очень низка и фактически с помощью этих приборов измеряют концентрацию суммы серы, содержащейся во всех соединениях, присутствующих в анализируемой газовой смеси. Для измерения концентрации только двуокиси серы или сероводорода, или другого соединения серы

необходимо применять катализаторы (сорбенты), с помощью которых из анализируемой газовой смеси удаляются (разлагаются, сорбируются) неанализируемые соединения серы. Кроме того, для измерительного процесса в пламенно-фотометрических газоанализаторах необходим сверхчистый водород, что значительно усложняет эксплуатацию данных приборов.

В начале 70-х годов в США начали выпускать флуоресцентные газоанализаторы, предназначенные для измерения двуокиси серы в атмосфере. В настоящее время флуоресцентные методы и приборы за рубежом применяются для измерения ультрамикрон концентраций сернистого газа [1—3], окислов азота [4—6],

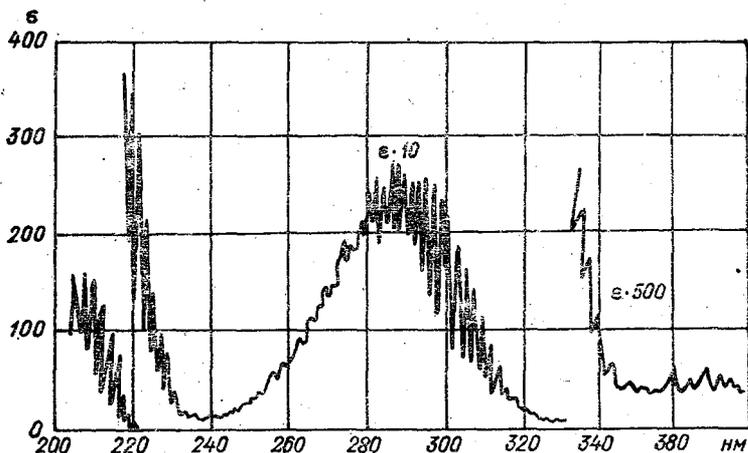


Рис. 1. Спектр поглощения SO<sub>2</sub> [9].

многих органических веществ [7]. Флуоресцентный метод анализа не уступает по чувствительности пламенно-фотометрическому, но в отличие от него является высокоизбирательным. Повышение избирательности достигается применением интерференционных светофильтров или оптических квантовых генераторов.

Рассмотрим основы флуоресцентного метода анализа сернистого газа. Энергетический выход флуоресценции, в частности молекул SO<sub>2</sub>, зависит от спектрального состава поглощающего ими излучения. Спектр поглощения двуокиси серы в ультрафиолетовой области состоит из дискретных узких полос [8, 9] (рис. 1). Наиболее длинноволновая и наименее интенсивная система полос в спектре поглощения двуокиси серы расположена в области 390—340 нм. При исследовании эффекта Зеемана в работе [10] установлено, что полоса поглощения 390—340 нм представляет собой синглетно-триплетный электронный переход. В работе [11] проанализирован этот переход как  ${}^3B_1 \leftarrow {}^3A_1$ . Второй электронный переход (340—260 нм) имеет очень сложную вращательную структуру, и в работе [8] он определен как  ${}^1B_1 \leftarrow {}^1A_1$ .

переход. Третья, наиболее интенсивная полоса поглощения (235—180 нм) вероятнее всего имеет переход  $\pi \rightarrow \pi^*$ . В [12] предсказан еще один переход, который должен находиться между переходами  ${}^1B_1 \leftarrow {}^1A_1$  и  ${}^1B_2 \rightarrow {}^1A_1$ . Из-за слабой абсорбции и сильного тушения флуоресцентного излучения присутствующими в анализируемом воздухе парами воды, окислами азота и другими компонентами первая область (390—340 нм) не удобна для флуоресцентного метода анализа. Молекулы двуокиси серы, возбужденные излучением в диапазоне второй области (340—260 нм), сильно тушатся кислородом и азотом воздуха. В третьей, наиболее интенсивной области поглощения на интенсивность флуоресценции оказывают меньшее влияние кислород, азот, аргон и другие компоненты, находящиеся в атмосферном воздухе. Поэтому наиболее эффективно для возбуждения флуоресценции молекул двуокиси серы можно использовать ультрафиолетовое излучение в спектральной области 210—230 нм.

Оптический квантовый генератор на рабочую длину волны в области 210—230 нм промышленностью серийно не выпускается, поэтому для возбуждения молекул двуокиси серы в настоящее время используют цинковые, кадмиевые и ксеноновые лампы [5, 14, 16, 18]. Наибольшее применение получили импульсные ксеноновые лампы. Ксенон при электрическом разряде имеет континуум излучения от 147 до 220 нм [4].

В интервале длин волн 185—247 нм ксенон не имеет спектральных линий, однако у импульсных ламп в жестких режимах питания наблюдается мощное линейчатое излучение [2, 3]. Источником этого линейчатого излучения являются пары кремния, возникающие в разряде при испарении кварца (материала баллона). Наиболее мощное излучение приходится на длину волны 230 нм.

В основу флуоресцентного газоанализатора положена способность молекул двуокиси серы участвовать в излучательных переходах под воздействием возбуждающего излучения. Молекула двуокиси серы ( $SO_2$ ) переходит в возбужденное состояние ( $SO_2^*$ ) под воздействием кванта ультрафиолетового излучения:



Возвращение  $SO_2^*$  в основное состояние сопровождается флуоресценцией:



где  $k_f$  — постоянная скорости флуоресценции.

Интенсивность флуоресцентного излучения зависит также от количества поглощенного излучения. Интенсивность излучения можно рассчитать с помощью закона Бугера — Ламберта — Бера [18]. Величину прошедшего излучения запишем в виде:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\epsilon lc}, \quad (3)$$

где  $P_0$  — энергия падающего излучения;  $P$  — энергия прошедшего излучения;  $\varepsilon$  — молярный коэффициент поглощения для данного вещества;  $l$  — толщина поглощающего слоя;  $c$  — концентрация поглощающего вещества.

Поглощенное излучение

$$I - \frac{P}{P_0} = I - e^{-\varepsilon lc}. \quad (4)$$

Преобразуя уравнение (4), получим

$$P_0 - P = P_0(I - e^{-\varepsilon lc}), \quad (5)$$

где  $P_0 - P$  — скорость поглощения излучения, выраженная числом квантов света, поглощаемых в единицу времени.

Величины энергии электромагнитного излучения также используются для обозначения скоростей поглощения (квант в единицу времени). При использовании доли прошедшего ( $P/P_0$ ) или поглощенного ( $I - P/P_0$ ) излучения сокращается квант/с [15].

Интенсивность флуоресцентного излучения  $F$  равна скорости поглощения ( $P_0 - P$ ), умноженной на квантовый выход флуоресценции  $\Phi$ :

$$F = (P_0 - P)\Phi = \Phi P_0(I - e^{-\varepsilon lc}), \quad (6)$$

где  $\Phi$  — выражается отношением числа фотонов люминесцентного излучения к числу поглощенных фотонов возбуждающего излучения при неизменной его энергии. Последний член уравнения (6) можно разложить в ряд, который при малых значениях концентрации стремится к величине  $2,3\varepsilon lc$ . Используем полученное значение и введем коэффициент пропорциональности  $k$ , который учитывает, что измеряют только часть равномерно распространяющегося во все стороны флуоресцентного излучения, получим следующее уравнение:

$$F = k\Phi P_0(2,3\varepsilon lc). \quad (7)$$

Поскольку все члены уравнения (7), входящие в правую часть его, кроме  $c$ , в условиях проведения анализа должны оставаться постоянными, то величина  $F$  зависит только от концентрации измеряемого вещества  $c$ :

$$F = k'c, \quad (8)$$

где  $k' = 2,3\varepsilon l\Phi P_0 k$ .

График зависимости  $F$  от  $c$  представляет собой прямую линию и называется градуировочным. Именно эту зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации определяемого компонента используют при разработке флуоресцентных газоанализаторов. С помощью этой зависимости определяется чувствительность метода, которая зависит от чувствительности, связанной с методикой измерения.

Чувствительность люминесцирующего вещества характеризует само анализируемое вещество и не зависит ни от метода, ни

от прибора, с помощью которого измеряют эту люминесценцию.

Для возникновения флуоресценции необходимо перевести молекулы анализируемого вещества из основного состояния в возбужденное, в котором эти молекулы должны пребывать в течение времени, достаточного для излучательного электронного перехода их в основное состояние. Этот процесс реализуется лишь в тех случаях, когда возбужденные молекулы имеют устойчивую конфигурацию электронного облака.

При выбранной длине волны возбуждающего излучения произведение  $\Phi$  из (7) может характеризовать вещество как меру люминесцентной чувствительности его. Для большинства веществ,

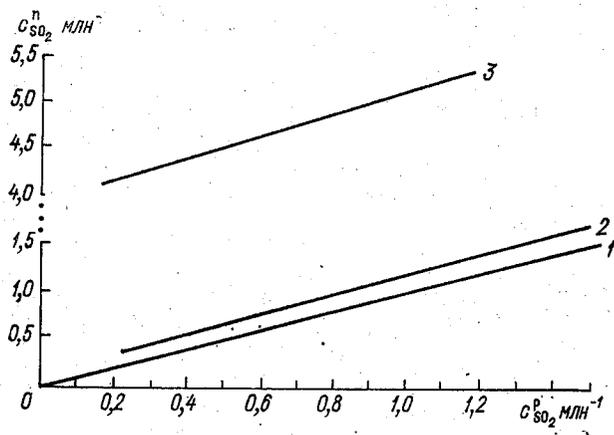


Рис. 2. Зависимость показаний прибора от концентрации  $SO_2$  при содержании кислорода в анализируемой газовой смеси 21% (1), 10,5% (2) и при отсутствии кислорода (3).

Газоанализатор отградуирован по газовой смеси сернистый газ — атмосферный воздух, очищенный от сернистого газа.

в том числе и сернистого газа, величина  $\Phi$  не зависит от длины волны возбуждающего излучения и максимум чувствительности люминесцирующего вещества совпадает с максимумом его наиболее интенсивной спектральной полосы поглощения.

Чувствительность метода зависит от люминесцентной чувствительности анализируемого вещества, суммарного фона люминесценции. В реальных условиях фон зависит от состава анализируемой среды и от характеристики устройств реализации измерения интенсивности флуоресценции. В суммарном фоне может быть люминесценция неанализируемых компонентов среды, люминесценция поверхностей флуоресцентной камеры, рассеянное излучение.

Немаловажное значение имеют процессы тушения флуоресценции и интерференции неанализируемых компонентов газовой

смеси с анализируемым веществом. Компоненты атмосферного воздуха различным образом взаимодействуют с сернистым газом при флуоресцентном методе определения концентрации его, искажая результаты измерения. Существующие данные о тушении флуоресценции  $\text{SO}_2$  неизменяемыми компонентами атмосферного воздуха и интерференции их не дают полного представления о протекающих процессах при флуоресцентном методе измерения концентрации  $\text{SO}_2$ .

С целью изучения данного вопроса нами проведены экспериментальные исследования, позволившие получить представление о влиянии основных мешающих компонентов атмосферного воздуха на флуоресценцию сернистого газа.

Кислород атмосферного воздуха очень сильно тушит флуоресценцию  $\text{SO}_2$ . Как видно из рис. 2, при прохождении газовой

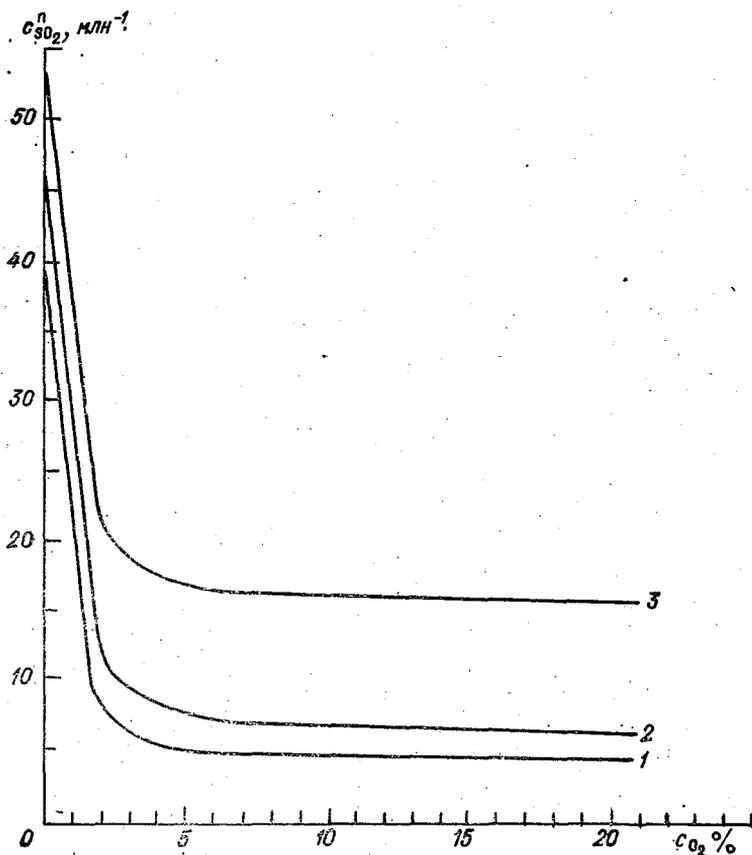


Рис. 3. Зависимость показаний прибора от содержания кислорода в анализируемом воздухе при концентрациях сернистого газа 0,43 млн<sup>-1</sup> (1), 0,60 млн<sup>-1</sup> (2), и 1,50 млн<sup>-1</sup> (3).

смеси  $N_2-SO_2$  (кривая 3) через измерительную камеру флуоресценция  $SO_2$  на 70–75 % выше, чем при прохождении смеси  $N_2-O_2-SO_2$  ( $c_{O_2} = 10,5\%$ , кривая 2), и на 80–90 % выше, чем при прохождении смеси  $SO_2$ –воздух ( $c_{O_2} = 21\%$ , кривая 1).

При изменении содержания кислорода от 0 до 21 % в анализируемой газовой смеси (рис. 3) показания анализатора уменьшаются. При этом наибольшее содержание кислорода (21 %) вызывает уменьшение сигнала на 90 %.

Спектр флуоресценции окиси азота частично перекрывается со спектром флуоресценции сернистого газа, искажая его. Как видно из рис. 4, при прохождении через газоанализатор газовой

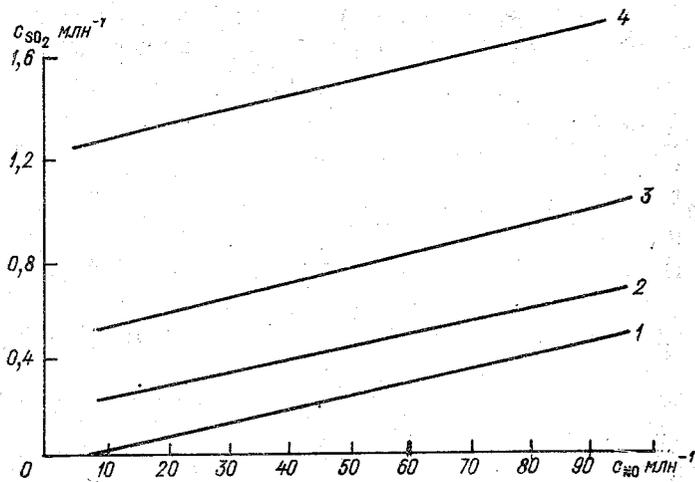
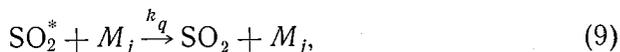


Рис. 4. Зависимость показаний прибора от содержания окиси азота в анализируемом воздухе при отсутствии сернистого газа (1) и при концентрации сернистого газа 0,22 млн<sup>-1</sup> (2), 0,53 (3), 1,25 млн<sup>-1</sup> (4).

смеси чистый воздух — окись азота — сернистый газ показания прибора отличаются на значение флуоресценции  $NO$  при постоянном значении  $SO_2$ . Из рис. 4 видно, что при концентрации  $NO$  до 5,0 млн<sup>-1</sup> (менее значения  $NO$ , содержащегося в атмосферном воздухе) окись азота практически не влияет на результат измерения концентрации сернистого газа. С увеличением концентрации  $NO$  в воздухе искажения результатов измерения содержания сернистого газа возрастают.

Если в атмосферном воздухе содержится  $H_2S$  до 24 мг/м<sup>3</sup> и  $NO_2$  до 200 мг/м<sup>3</sup>, то они не оказывают влияния на результаты измерения концентрации  $SO_2$ . Дальнейшее увеличение концентрации  $H_2S$  и  $NO_2$  не имело смысла, так как выше указанных концентраций  $H_2S$  и  $NO_2$  в атмосферном воздухе не наблюдается.

На основании изложенного следует отметить, что возбужденная молекула двуокиси серы может возвращаться в основное состояние при излучении квантов энергии (флуоресцировании), а также в результате тушения неизмеряемыми компонентами анализируемой среды:



и через диссоциацию:



С учетом изложенного уравнение (7) примет вид

$$F = \frac{2,3kk_f P_0 \epsilon l c}{k_f + k_d + k_q[M]}, \quad (11)$$

где  $k_d$  и  $k_q$  — постоянные скорости процессов тушения и диссоциации,  $M_j$  — характеристика фоновго воздуха.

Уравнение (11) характеризует квантовый выход флуоресценции с учетом различных факторов.

Таким образом, флуоресцентный метод анализа сернистого газа может быть реализован для селективного определения сернистого газа в атмосфере. Применение метода для создания газоаналитических средств локального контроля промышленных выбросов серьезно ограничивается наличием окиси азота в измеряемых смесях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцберг Г. Электронные спектры и строение многоатомных молекул. — М.: Мир, 1969.
2. Дойников А. С. Спектральные характеристики излучения трубчатых ксеноновых и дуговых ламп. — М.: Наука, 1972.
3. Дотя Ф., Щенк Г. Количественный анализ. — М.: Мир, 1978.
4. Зойдель А. Н., Шрейдер Е. А. Спектроскопия вакуумного ультрафиолета. — М.: Наука, 1967.
5. Маршак И. С. и др. Импульсные источники света. — М.: Энергия, 1978.
6. Минеральные ресурсы промышленно развитых капиталистических стран /Под ред. Е. Н. Полуэктова. — М.: Недра, 1972.
7. Biermann H.-W. e. a. Fluoreszenzgerät für den gleichzeitigen Nachweis von Stickstoffmonoxid und Schwefeldioxid. — Patent FRG, GOI N 21/52, N 2639946 9.03.78.
8. Douglas A. E. Radiative lifetimes of molecules. — Can. J. Phys., 1958, vol. 36, N 2, p. 147.
9. Schmarz F. P., Okabe H. Fluorescence detection of sulfur dioxide in air ppb level. — Anal. Chem., 1974, vol. 46, N 8.
10. Gelbwachs J. A., Birnbaum M., Tucker A. W., Fincher C. L. Fluorescence determination of atmospheric NO<sub>2</sub>. — Electr. Res. Lab. Aerospace Corp., Los Angeles, March 1972.
11. Yahuke J. e. a. Quenching effects in SO<sub>2</sub> fluorescence monitoring instruments. — Environ. Sci. Techn., 1976, vol. 10, N 13, p. 1247—1249.
12. Zolner W. J., Cieplinaki E. V. Measurement of ambient air SO<sub>2</sub> concentration using a pulsed fluorescent analyzer. — Thermo Electron Corp.
13. Merer A. L. Discussion. — Faraday Soc., 1963, vol. 35, 127.

14. Okabe H. Sulfur dioxide pollution monitor.— Patent N 3795812, 1974
15. Okabe H., Schwarz F. P. Nitric oxide pollution monitor. Cl. 250:304, GOI j/1/42, N 3906226, 16.9.75.
16. Okabe H., Splitstone P. L., Ball J. J. Ambient and source SO<sub>2</sub> detector based on a fluorescence method.— J. APCA, 1973, vol. 23, N 6 p. 514—515.
17. Walsh A. D. Vibrational energy transfer processes in molecules.— J. Chem. Soc., 1953, vol. 32, N 3, p. 2266.
18. Woodroffe L. A. Fluorescence gas analyzer with calibration system.— Patent, N. 3826920, 1974.

*В. И. Красов, Е. А. Горина*

## **АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА СЕРНИСТЫМ АНГИДРИДОМ И ОКИСЬЮ УГЛЕРОДА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ**

Вопрос оценки характеристик полей загрязнения атмосферы имеет важное значение в связи с созданием автоматизированных систем контроля, обеспечивающих получение оперативной информации о загрязнении воздушного бассейна крупных городов, необходимой для прогнозирования состояния атмосферы. В СССР работы в этой области ведутся с 1973 г. [4, 8]. В [2] на основании данных 10-летних наблюдений ручными методами, проведенных более чем на 1200 постах, изложены основные результаты по изучению полей загрязнения атмосферы, чего, однако, недостаточно в связи с их ограниченными возможностями. Вследствие этого необходимо использовать автоматические газоанализаторы с целью анализа непрерывной информации о состоянии воздушной среды. Известен ряд работ [3, 6—10], посвященных оценке характеристик полей загрязнения сернистым газом и окисью углерода. Настоящая работа является результатом дальнейших разработок в данном направлении.

Аналогичные исследования ведутся и за рубежом. Так, например, в [18] описывается метод краткосрочного прогноза (до нескольких часов) и контроля наблюдений с использованием статистических характеристик поля загрязнения атмосферы (уравнения авторегрессии, многофакторный корреляционный анализ).

Результаты опытной эксплуатации АСКЗВ в Ленинграде показывают, что для получения и анализа оперативной информации о состоянии загрязнения воздушного бассейна необходимы более детальные исследования статистических характеристик поля загрязнения атмосферы.

Этому вопросу и посвящена настоящая статья, содержащая результаты обработки специально проведенного эксперимента по оценке поля загрязнения атмосферы города  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$ . В ходе данного эксперимента были получены концентрации  $\text{SO}_2$  на пяти (I—V) станциях с помощью газоанализаторов ГКП-1 и концентрации  $\text{CO}$  на одной станции (IV). На всех станциях синхронно записывались данные о скорости и направлении ветра и температуры. Данные о загрязнении регистрировались круглосуточно в течение девяти дней и записывались на лентах самописцев. Кроме того, 3 раза в день проводились градиентные измерения скорости и направления ветра, температуры и влажности на высотах 700, 800, ..., 2000 м.

Таким образом, были получены временные ряды по загрязнению  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  и основным метеопараметрам объемом в среднем около 500 измерений.

При анализе эксперимента учитывались особенности рельефа города, который расположен в котловине с типичными приземными инверсиями и слабыми ветрами. Практически на протяжении всего эксперимента были отмечены приземные инверсии. Скорость ветра в большинстве случаев не превосходила 3 м/с. Эксперимент проходил в условиях антициклонической деятельности. Эти обстоятельства, как показано в [2, 13, 17], способствуют повышенному уровню загрязнения атмосферы.

Для определения пространственно-временной структуры поля концентраций основных загрязнителей была произведена обработка данных эксперимента с помощью специально разработанного пакета программ, осуществляющих вычисление статистических характеристик, а также характеристик суточного хода концентраций. Показания приборов осреднялись за каждые 20 мин. Пакет включает программы, написанные на языке PL-1 и ориентированные на ЭВМ ЕС-1030.

При статистической обработке данных для каждой станции были получены следующие результаты.

*Станция I* (рис. 1 а, кривая 1). Суточный ход концентраций  $\text{SO}_2$  — без особых флуктуаций, с двумя максимумами (в 6 и 8 ч). Коэффициент вариации 51 %. Некоторое повышение концентраций наблюдается с 6 до 11 ч. Подобное повышение суточного хода может быть связано с режимом работы расположенных поблизости от станций мелких котельных.

*Станция II* (рис. 1 а, кривая 2). Суточный ход концентраций  $\text{SO}_2$  имеет максимум в 11 ч и несколько повышенные значения с 9 до 13 ч. Ночью значения концентраций почти не изменяются. Коэффициент вариации 107 %. Низкое, несмотря на окружающий район плотной городской застройки, значение средней концентрации объясняется большой изменчивостью направления ветра в районе данной станции. Этим можно объяснить и высокое значение коэффициента вариации.

*Станция III* (рис. 1 а, кривая 3). Суточный ход концентрации  $\text{SO}_2$  имеет два максимума (в 8 и 20—21 ч). Второй максимум

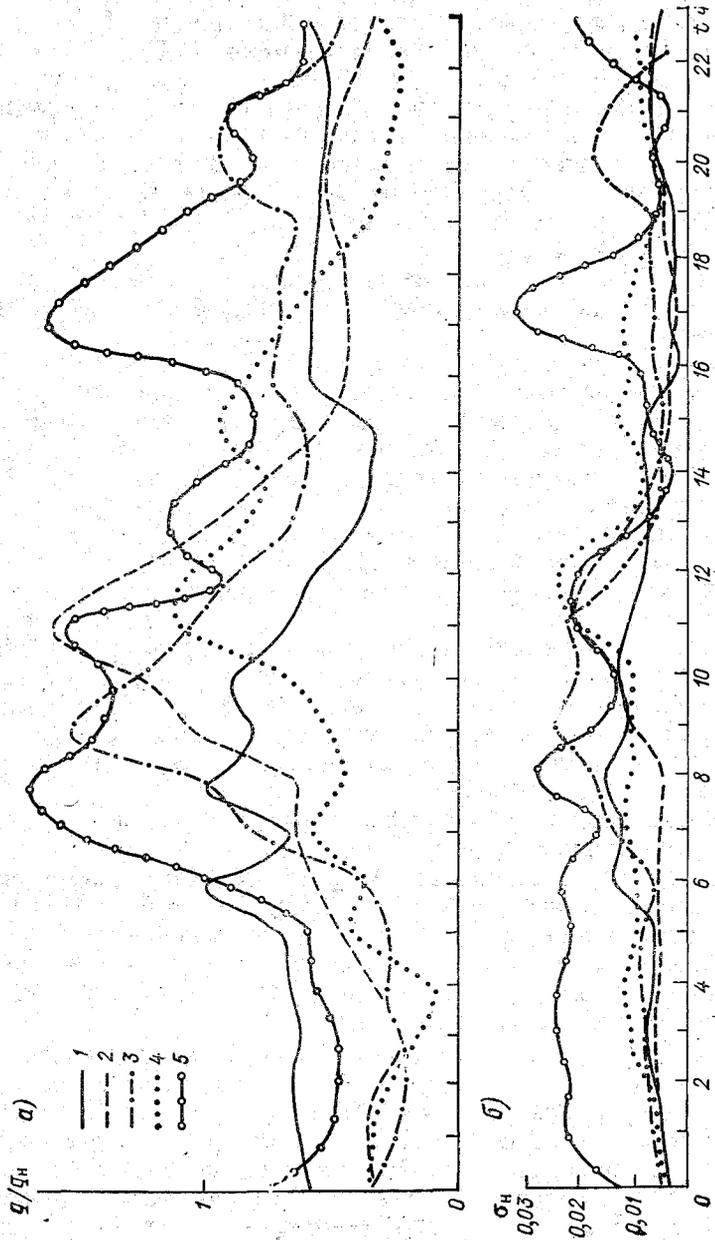


Рис. 1. Суточный ход нормированных на характерную величину концентрации (а) и квадратических отклонений (б).

связан, по-видимому, с районом старой застройки с печным отоплением. Коэффициент вариации 114 %.

Станция IV (рис. 1 а, кривая 4). Суточный ход концентраций  $\text{SO}_2$  имеет два слабовыраженных максимума (в 11 и 16 ч). Коэффициент вариации 51 %.

Станция VI (рис. 1 а, кривая 4). Суточный ход концентраций  $\text{SO}_2$  имеет два максимума (в 8 и 17 ч). Коэффициент вариации 59 %. Несмотря на отсутствие источников вблизи станции, сравнительно высокий уровень загрязнения объясняется размещением ее на склоне горы на высоте 500 м над уровнем города, т. е. на уровне границы типичных приземных инверсий, охватывающих котловину [1].

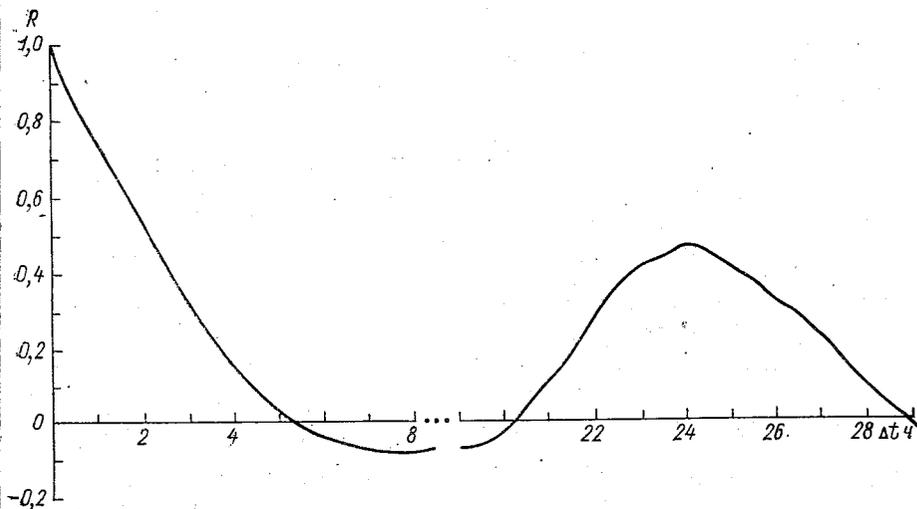


Рис. 2. Автокорреляционная функция концентраций  $\text{SO}_2$ .

На рис. 1 б кривые представляют собой суточный ход квадратического отклонения от среднего значения концентраций на соответствующих станциях.

На основании сказанного следует сделать вывод о существенной неоднородности поля загрязнения атмосферы данного города, которая связана, во-первых, с неоднородностью застройки различных районов города и, во-вторых, с особенностями рельефа местности, в которой он расположен.

Анализ автокорреляционных функций, построенных для рядов концентраций, показал, что на всех станциях ход концентраций сохраняет свою инерционность в течение 2—2,5 ч (дисперсия автокорреляционной функции 0,03—0,06). Кроме того, наблюдается подъем автокорреляционной функции при запаздывании  $\Delta t = 24$  ч (рис. 2). Это указывает на существование выраженного суточного цикла в ходе концентраций  $\text{SO}_2$ . Из анализа характе-

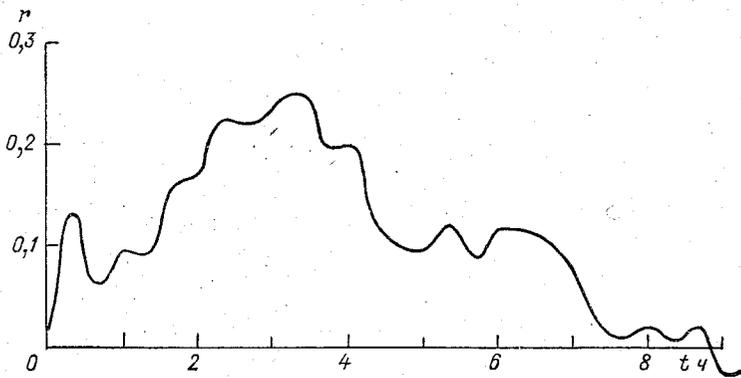


Рис. 3. Взаимокорреляционная функция концентраций  $\text{SO}_2$  по данным станций IV и I.

ра спектральных функций следует, что подъем спектральной плотности для периодов 1—24 ч несколько больший, чем для периодов 20—25 ч.

Анализ взаимно-корреляционных функций (рис. 3), построенных для каждой двух станций, подтвердил рациональное размещение станций в районах, ход концентраций в которых существенно различается. Ко-спектральные плотности так же, как и для каждой отдельной станции, принимают высокие значения для периодов 1—2 ч (рис. 4).

Регистрация содержания CO в атмосфере производилась автоматическими газоанализаторами ГМК-3. Непосредственная запись показаний прибора производилась лишь на станции IV. Анализ полученных данных показал, что 84 % осредненных за

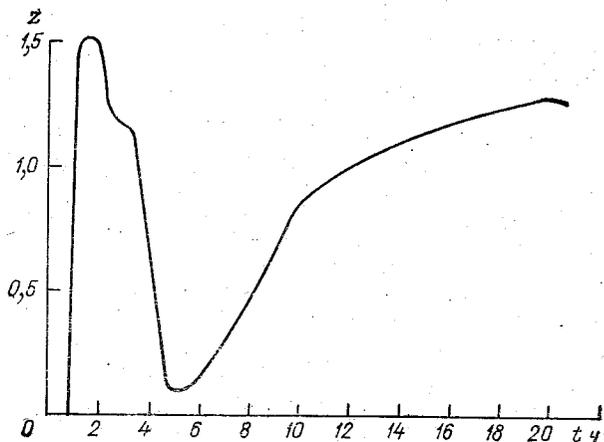


Рис. 4. Ко-спектр по данным станций IV и I.

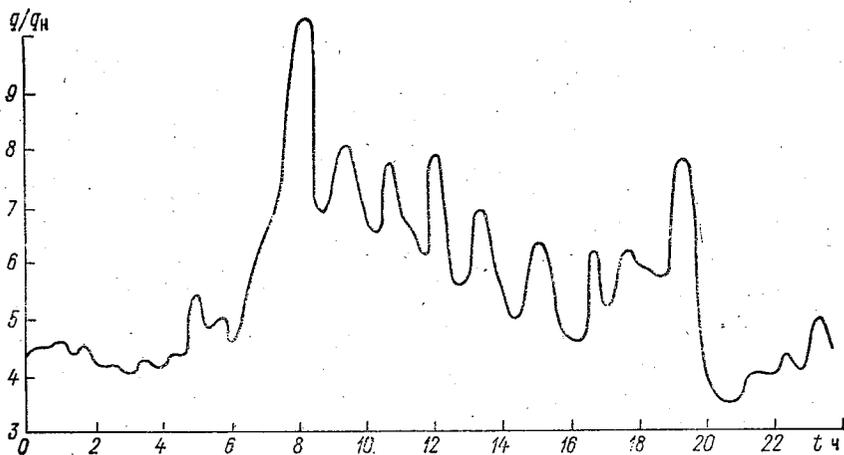


Рис. 5. Суточный ход нормированных концентраций СО.

20 мин концентраций значительно превосходят характерное значение. Несколько повышенные концентрации наблюдались с 4 по 6 октября в период возникновения и развития приземной инверсии над городом. Значения концентраций при образовании двойного слоя инверсии достигали наибольших значений за все время регистраций. Инверсионные слои образовывались обычно в 6—8 ч, а разрушались к 13 ч. Связанное с этим существенное повышение концентраций СО отразилось на характере суточного хода в это время суток (рис. 5).

Коэффициент вариации, равный 85 %, указывает на значительные флуктуации содержания СО в атмосфере. Последнее под-

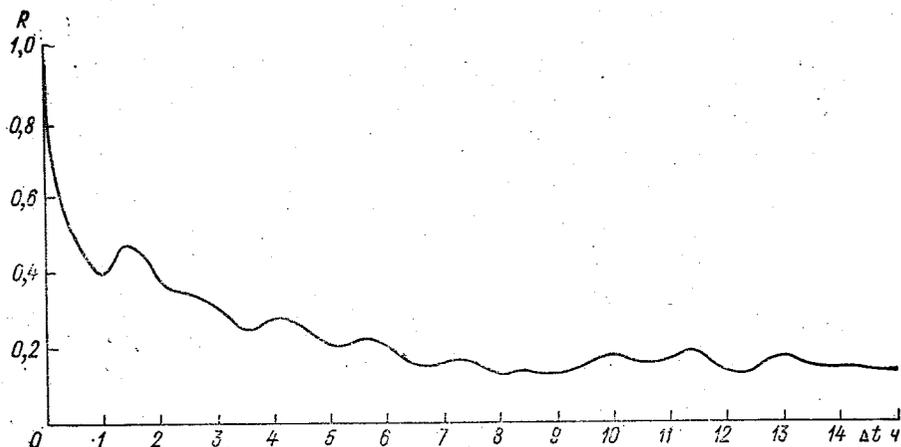


Рис. 6. Автокорреляционная функция концентраций СО по данным станции IV.

тверждает и характер автокорреляционных функций, которые достигают значения 0,5 уже при запаздывании  $\Delta t = 30$  мин (рис. 6). Спектральная плотность имеет подъем для периода 1 ч 30 мин.

Относительно высокие значения концентраций окиси углерода объясняются размещением станции IV вблизи пересечения двух магистралей с интенсивным движением машин (1,5—2 тыс. машин за 1 ч). Данные работы [16] показывают, что оживленным перекресткам следует уделять особое внимание. При проверке предложенной в [16] модели, учитывающей создание заторов перед светофорами, оказалось, что на исследуемом участке автомагистрали вклад 10 перекрестков в общий выброс в 2,5 раза больше, чем вклад 37 линейных участков дороги. Следовательно, можно предполагать, что повышенный уровень концентраций СО на данной станции является результатом непосредственной близости (около 100 м) от мощного источника выброса.

Таким образом, результаты обработки данных эксперимента свидетельствуют о существенной неоднородности поля концентраций сернистого газа, определяемой характером застройки районов города. Наблюдается высокая инерционность хода концентраций  $\text{SO}_2$ , на всех станциях отмечен подъем спектральной плотности на частотах, соответствующих периоду 1—2 ч.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.
2. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.
3. Безуглая Э. Ю. и др. К вопросу о содержании кислородных соединений серы в атмосфере/Э. Ю. Безуглая, Н. С. Вольберг, Л. И. Еликоева, С. А. Коньков, О. П. Шарикова. — Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 44—51.
4. Безуглая Э. Ю., Клиниго В. В. О структуре поля концентрации примеси в городском воздухе. — Труды ГГО, 1973, вып. 293, с. 60—67.
5. Винников К. Я., Гриб Н. К., Поляк И. И. Методика расчета корреляционных функций и спектров временных метеорологических рядов. — Труды ГГО, 1973, вып. 308, с. 27—46.
6. Еликоева Л. И. и др. О временной структуре показателей загрязнения атмосферы/Л. И. Еликоева, Б. Н. Пьянцев, В. Б. Киселев, С. А. Коньков. — Труды ГГО, 1979, вып. 436, с. 68—71.
7. Зайцев А. С., Коньков С. А. Пространственно-временная структура поля концентраций сернистого газа. — Труды ГГО, 1975, вып. 325.
8. Зайцев А. С. Структура поля концентраций окиси углерода в городе. — Труды ГГО, 1973, вып. 293, с. 41—46.
9. Зайцев А. С., Иванова З. И., Коньков С. А. Некоторые результаты наблюдения за изменением концентраций сернистого газа. — Труды ГГО, 1974, вып. 314.
10. Коньков С. А., Соломатина И. И., Еликоева Л. И. Особенности загрязнения городского воздуха сернистым газом по данным газоанализаторов. — Труды ГГО, 1974, вып. 332.
11. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.
12. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971.

13. Сонькин Л. Р. и др. Синоптические условия формирования периодов высокого загрязнения воздуха в различных районах.— Труды ГГО, 1979, вып. 436, с. 49—54.

14. Блъскова Д. и др. Някои резултати от експериментални изследвания на замърсяването на атмосферата в градовете Кърджали, Бургас и София.— Пробл. геогр. (НРБ), 1979, № 22, с. 22—35.

15. Донеv Е., Андреев В., Мицов О. Автоспектрални оценки на замърсяването на въздуха по данни от експеримента «София-76». — Хидрология и метеорология, 1979, № 2, с. 36—44.

16. Luchasz P. C., Rossano A. T. Quering of vehicles as a critical contributor of carbon monoxide from mobile source.— In.: 4th Joint Conf. on Sens. of Environ. Pollutant., New Orleans, 1977, 1978.

17. Moore D. I. Meteorology and air Pollutant.— In.: Weather and Air Pollution 46th Anne Cong.. Nat. Soc. Clean Air. Scarborough 1979, Pt. I, Brighton, 1980, p. 1—10.

18. Okamoto Hiroki. Experimental studies on the prediction of atmospheric environmental pollution.— Techn. Rev. 1976, vol. 16, N 1, p. 20—29.

*В. И. Красов, А. Д. Зив*

## **ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ СЕРНИСТЫМ ГАЗОМ ПО ИНФОРМАЦИИ АСКЗВ**

Комплекс автоматизированной системы контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ) включает блок программного обеспечения, одной из основных задач которого является расчет загрязнения города вредными газообразными примесями и его прогнозирование.

Поскольку при всем многообразии существующих в настоящее время моделей нет таких, которые хорошо описывали бы поля загрязнения в любой ситуации, представляется целесообразным провести экспериментальную проверку функционирования различных моделей в условиях города. При выборе моделей, предназначенных для работы в составе системы АСКЗВ, учитывались вычислительная простота алгоритмов. При этом потери точности расчетов вследствие использования более простых моделей могут быть восполнены реальной информацией, получаемой со станций контроля АСКЗА системы. В [4] был дан обзор основных направлений моделирования атмосферной диффузии и некоторый анализ возможности их использования в АСКЗВ. В данной работе мы анализируем результаты экспериментального сравнения некоторых из них.

В настоящее время считается, что процесс распространения основной примеси удовлетворительно описывается системой нелинейных уравнений диффузии [5]. Однако для этого необходимо большое число исходных данных, достаточно точно характеризующих состояние атмосферного воздуха, которые практически всегда имеются. Кроме того, решение систе-

мы уравнений на ЭВМ требует большого объема памяти и машинного времени.

Вначале ограничимся использованием одного уравнения, тем более, что его исследования весьма обширны и дают удовлетворительные результаты [1, 5]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right) + K_s \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + Q, \quad (1)$$

где  $q$  — концентрация загрязнителя;  $u$  и  $v$  — компоненты скорости ветра;  $K_z$  и  $K_s$  — вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентного обмена;  $Q$  — функция, описывающая эмиссию источника.

Большой выигрыш во времени и объеме памяти ЭВМ обычно дают схемы расчета загрязнения по явным формулам. Для точечных источников это в первую очередь формулы из Указаний по расчету рассеивания примесей [2]. Кроме того, широко используется формула «гауссового факела». Для приземной концентрации имеем

$$q|_{z=0} = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}, \quad (2)$$

где  $H$  — высота источника (эффективная);  $u$  — скорость ветра на высоте источника;  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  — дисперсии распределения примеси по горизонтали и вертикали.

Решение уравнения (1) на ЕС ЭВМ требует 20—30 мин при сетке  $20 \times 20 \times 16$  с 36 шагами по времени. Вычисления по явным формулам на той же сетке и для тех же 36 моментов времени занимает около 5 мин.

Сравним результаты расчетов по выбранным моделям, используя данные специального эксперимента, проведенного на базе опытной системы АСКЗВ. В течение пяти дней весной 1980 г. проводились измерения наземной концентрации сернистого газа на трех станциях контроля загрязнения, входящих в систему. Ежечасно с 8 до 19 ч получали мгновенные значения концентрации. Также были известны результаты инвентаризации шести крупных источников эмиссии сернистого газа, включающие данные о высотах труб, диаметрах их устьев, об объеме эмитируемой в единицу времени газовоздушной смеси и процентном содержании в ней окиси серы. На схеме расположения станций системы АСКЗВ и основных источников эмиссии  $SO_2$ , приведенной в [3], это станции I, III, VI и источники комбината и ТЭС-1.

Мы располагали также результатами ежечасных измерений скорости и направления ветра на высоте флюгера и на высотах 20 и 40 м, а также двухразовыми (в 8 ч 30 мин и 14 ч 30 мин) измерениями ветра и температуры радиозондом, начиная с высоты 100 м над уровнем города и до 2 км.

Как показано в [5], при решении уравнения через 6 ч начальные условия оказываются несущест-

этому в наших расчетах они брались нулевыми. Кроме того, поскольку целесообразно учитывать зависимость параметров уравнения (1) от времени, расчеты проводились для периода 6 ч между радиозондированиями. При этом метеоданные линейно интерполировались.

Расчеты по Указаниям [2] и по формуле (2) делались для того же периода. При этом, поскольку мы не имели данных о дисперсии колебаний направления ветра, вычисления проводи-

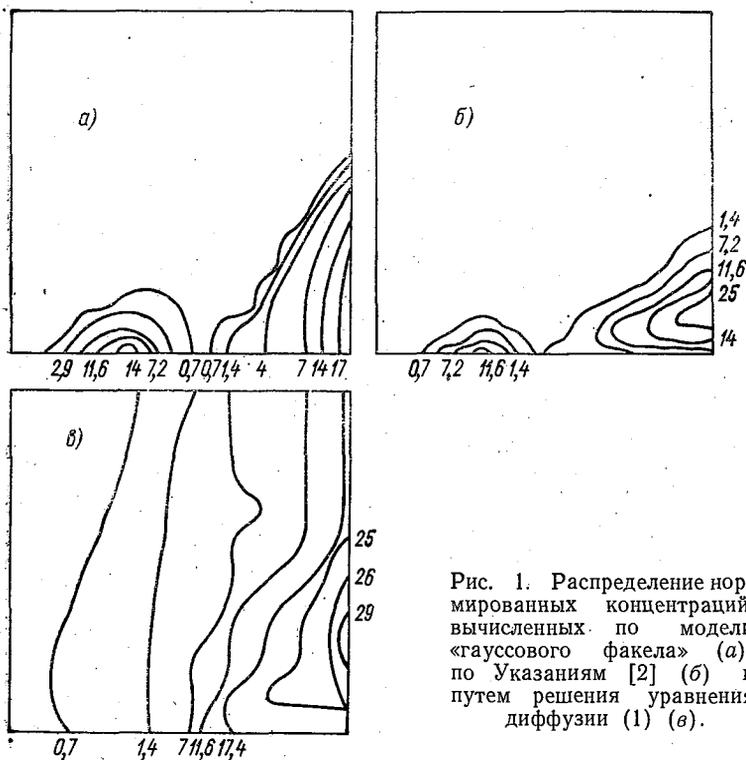


Рис. 1. Распределение нормированных концентраций, вычисленных по модели «гауссового факела» (а), по Указаниям [2] (б) и путем решения уравнения диффузии (1) (в).

лись для четырех значений необходимых метеопараметров, проинтерполированных с равными промежутками по данным радиозондирования. Затем для каждой точки определялась наземная концентрация как среднее значение из четырех расчетов. Значения параметров  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , входящих в (2), вычислялись по известным профилям Пэсквила—Тарнера [6]. Анализ результатов расчетов показал следующее. Факелы, определенные «гауссовой моделью» и Указаниями [2], оказываются, как и следует из теории, достаточно узкими. Причем, когда не учитывался временной ход метеоданных, а проводились расчеты только для средних за 6 ч значений, угол факела оказывался около  $15^\circ$ . При осредне-

нии результатов расчетов он увеличивался в зависимости от метеословий от 20 до 40° при соответствующем уменьшении наземной концентрации.

Результаты вычисления концентрации сернистого газа по моделям гауссового факела и Указаниям [2] различаются в 1,5—2 раза.

Решение уравнения диффузии оказывается существенно более гладким, однако и здесь выделяется факел, направленный по среднему ветру.

Расчитанные значения наземной концентрации окиси серы в районах расположения станций АСКЗВ сравнивались с экспериментальными данными, полученными на этих станциях. Оказалось, что лишь на третий день эксперимента, когда господствовали северные ветры, вычисленные концентрации в районах станций составили в среднем 200 % измеренных.

На рис. 1 представлены изолинии вычисленных концентраций сернистого газа в квадрате 20×20 км тремя описанными методами на день эксперимента (значения концентраций нормированы на среднее по станциям). В остальные дни при западном и юго-западном ветрах расчитанные концентрации были меньше  $10^{-3}$ . Эти результаты противоречат полученным в [3] для того же эксперимента распределениям загрязнения по направлениям ветра. Следовательно, моделирование включало некоторую систематическую ошибку. Такое несоответствие, по-видимому, вызвано не только погрешностями самих моделей, но также и другими причинами.

Во-первых, это недостаточно полная инвентаризация источников эмиссии, так как принимались во внимание лишь высотные трубы комбината и ТЭС и не учитывалось наличие большого числа мелких источников. Вторая причина, на наш взгляд, заключается в том, что нельзя в городе моделировать загрязнение, не учитывая его сложившееся распределение по площади, т. е. городской фоновый уровень, особенности которого определяются климатическими характеристиками городской атмосферы, рельефом, застройкой и т. д.

Проведенные численные эксперименты не позволяют сделать окончательный вывод о целесообразности использования в составе АСКЗВ той или иной из оцениваемых моделей диффузии. Необходимы дополнительные исследования, использующие более полные экспериментальные данные, а также статистическую структуру загрязнения в том числе фонового. Тем не менее можно сделать следующий практический вывод: модель, основанная на уравнении (1), предпочтительней для использования в АСКЗВ, так как дает более реалистичную картину загрязнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.

2. Берлянд М. Е. и др. Указания по расчету рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, СН 369—74. — М.: Стройиздат. 44 с.

3. Зив А. Д. Оценка влияния направления ветра на загрязнение сернистым газом по данным эксплуатации АСКЗВ. — См. наст. сборник.

4. Demerjian K. L. Photochemical diffusion models for air quality simulation: current status.— Transp. Res. Board Spec. Rep. 1976, N 167, p. 21—33.

5. Lin M.-K., Whitney D. C., Roth Ph. M. Effects of atmospheric parameters on the concentration of photochemical air pollutants.— J. Appl. Met., 1976, vol. 15, N 8, 829—835.

6. Turner D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates.— Cincinnati: NAPCA, 1969, p. 84.

*В. И. Козинцев, В. Д. Куксинский, А. Ф. Сильницкий*

## **ПРИМЕНЕНИЕ АБСОРБЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА ДЛЯ ТРАССОВОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ВЫБРОСОВ**

Необходимость разработки новых методов контроля загрязнения воздушного бассейна города продиктована, в частности, недостаточной достоверностью данных о пространственном распределении загрязняющих примесей. Использование локальных газоанализаторов на сети наблюдений не обеспечивает в настоящее время получения оперативной информации для надежного описания поля загрязнения в атмосфере [1]. Одним из решений этой задачи является использование методов дистанционного лазерного контроля.

Лазерные дистанционные методы уже более десяти лет применяются для создания лидаров, измеряющих концентрацию аэрозольных частиц и газов с разрешением по расстоянию. Использование лидаров в метеорологии [2] ограничено областью научных исследований из-за сложности лидарных систем и отсутствия их метрологического обеспечения.

Отметим, что уникальный аэрозольный лидар «Mark-IX» применяется в региональных наблюдениях за загрязнением атмосферы по программе Агентства по охране окружающей среды США [12], а фирма «Рейтеон» (США) приступила к серийному выпуску передвижных лидарных установок для газового анализа промышленных выбросов [5].

Абсорбционный спектральный метод с использованием лазера, впервые предложенный для контроля атмосферы Джекобсоном и Сноуменом в 1967 г. [9], наибольшее развитие получил в последние годы с появления лазеров, перестраиваемых в широком диапазоне длин волн. Использование  $\text{CO}_2$ -лазера, излучающего в диапазоне 9—11 мкм, позволило определить содержание некоторых углеводородов и аммиака в атмосфере [8]. Развитие технологии лазеров на красителях открыло возможности для дистанционного измерения таких распространенных компонентов

загрязнения атмосферы, как двуокись азота и сернистый ангидрид [6, 7, 10, 11].

Лидарный метод измерения концентрации примесей по дифференциальному поглощению излучения основывается на сравнении сигналов обратного рассеяния в линии и вне линии поглощения исследуемого вещества. Сигналы обратного рассеяния получают при отражении лазерного импульса от распределенных в атмосфере аэрозольных частиц. Сигнал обратного рассеяния зависит не только от концентрации поглощающего газа, но и от отражательной способности аэрозольных частиц, от их распределения по размерам, т. е. величин, изменяющихся во времени и пространстве.

Отсутствие априорной информации об этих параметрах аэрозоля обуславливает большую погрешность измерений, достигающую 100 % при максимальной дальности зондирования.

Модификацией лидарного метода дифференциального поглощения является лазерный метод поглощения на длинных трассах, позволяющий измерять интегральную концентрацию газа на всей трассе зондирования без разрешения по расстоянию в соответствии с законом Бугера — Ламберта — Бэра:

$$I/I_0 = \exp\left\{-2 \int_0^R \alpha_\lambda \cdot c(R) dR\right\}, \quad (1)$$

где  $\alpha_\lambda$  — коэффициенты экстинкции в зависимости от длины волны;  $c(R)$  — концентрация газа на длине пути луча (трасса);  $R$  — длина трассы.

Концентрация  $\overline{c(R)}$  определяется при измерении на двух длинах волн ( $\lambda_0$  — в максимуме полосы поглощения и  $\lambda_1$  — в минимуме полосы поглощения) из формулы

$$\overline{c(R)} = \frac{1}{2 \Delta \alpha R} \left[ \ln \frac{P_0(\lambda_0)}{P_R(\lambda_0)} - \ln \frac{P_0(\lambda_1)}{P_R(\lambda_1)} \right], \quad (2)$$

где  $P_0(\lambda)$  — мощность излучения лазера на длине волны  $\lambda_0$  или  $\lambda_1$ ,  $P_2(\lambda)$  — мощность излучения прошедшего через поглощающий объем,  $\Delta \alpha$  — разность коэффициентов экстинкции на длинах волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$ .

Формула (2) — результат решения уравнений, составленных с учетом ослабления излучения на трассе вследствие молекулярного и аэрозольного рассеяния. Длины волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  выбираются таким образом, чтобы указанное ослабление для них было одинаковым.

Для вычисления минимальной средней концентрации на трассе воспользуемся формулой [11]

$$\overline{c}_{\min} = \Delta \ln P / 2 \Delta \alpha, \quad (3)$$

где  $\Delta \ln P$  — минимальное значение разности логарифмов, которое может быть измерено.

Для реальных измерительных устройств  $\Delta \ln P > 0,02$  и  $c_{\min} = 10^{-2} (\Delta \alpha \cdot R)^{-1}$ . Пороговая чувствительность метода определя-

ется величиной  $R_{\max}$ , т. е. максимально достижимой длиной трассы:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_0 A \tau_a \tau_o k}{P_{\text{пор}} \cdot 2 \pi \omega}}, \quad (4)$$

где  $A$  — площадь приемного объектива,  $\omega$  — расходимость лазерного луча,  $\tau_a$  — пропускание атмосферы, с учетом ослабления и поглощения,  $\tau_o$  — пропускание оптики,  $P_{\text{пор}}$  — пороговая чувствительность фотоприемника с учетом фоновой засветки,  $k$  — коэффициент отражения.

Поскольку лазерная система трассового контроля является бистатической, т. е. на конце трассы зондирования устанавливается отражатель с известными отражательной способностью и площадью, то коэффициент отражения  $k$  в формуле (4) учитывает перекрытие сечения луча лазера площадью отражателя.

Расчет чувствительности дистанционного лазерного газоанализатора двуокиси азота показывает, что пороговая концентрация  $\text{NO}_2$  не превышает  $10^{-2}$  млн $^{-1}$  при измерениях на трассе длиной 5 км с использованием зеркального отражателя. Сопоставление этих данных и диапазона измеряемых концентраций рассчитанных графо-аналитическим методом [4] с предельно допустимой концентрацией двуокиси азота и с величиной фона в городах от  $3 \cdot 10^{-2}$  до 2 млн $^{-1}$  подтверждает возможность создания дистанционного газоанализатора с приемлемыми для целей автоматического контроля параметрами.

Разработанный макетный образец аппаратуры, конструкция которого описана в [3], прошел калибровочные испытания в дневных условиях на трассе зондирования 250 м. В лазерном двухволновом излучателе использован раствор кумарина на 120 в эталоне. Лазеры были настроены на длины волн  $\lambda_0 = 439,5$  нм и  $\lambda_1 = 432$  нм, в отличие от длин волн принятых для расчета в [4]. Ширина линий лазерного излучения составляла 1,2 нм, длительность импульса по уровню 0,5 не превышала 200 нс, энергия излучения после выходных телескопов была около 1 мДж. В блоке регистрации использовался интерференционный фильтр с максимумом пропускания 40 % на длине волны 441 нм и полушириной 3 нм.

Для обеспечения работы ФЭУ-79 в линейном режиме рассеяное лазерное излучение ослаблялось (в 50 раз) нейтральным светофильтром НС-9 толщиной 3 мм, который устанавливался перед объективом МТО-1000А. Расстояние до экрана измерялось по времени задержки импульса с ФЭУ относительно импульса с фотозлемента, используемого для контроля выходной мощности лазерного излучения с целью снятия нестабильности энергии лазерного излучения в процессе измерений.

При проведении испытаний мощность фонового излучения, измеренная на месте фотокатода ФЭУ с помощью радиометра-фотометра 550-1, изменилась с  $2,8 \cdot 10^{-10}$  до  $0,8 \cdot 10^{-10}$  Вт.

При выполнении калибровочных испытаний перед приемным объективом дистанционного лазерного газоанализатора (ДЛГ) устанавливалась кварцевая кювета длиной 1 м, в которую подавалась двуокись азота. Параллельно с измерениями концентрации с помощью ДЛГ проводился отбор проб для последующего химического анализа. Результаты этих испытаний приведены на рис. 1, причем значения концентраций двуокиси азота указаны в пересчете на длину трассы зондирования, т. е. соответствуют средней концентрации газа, равномерно распределенного по трассе зондирования.

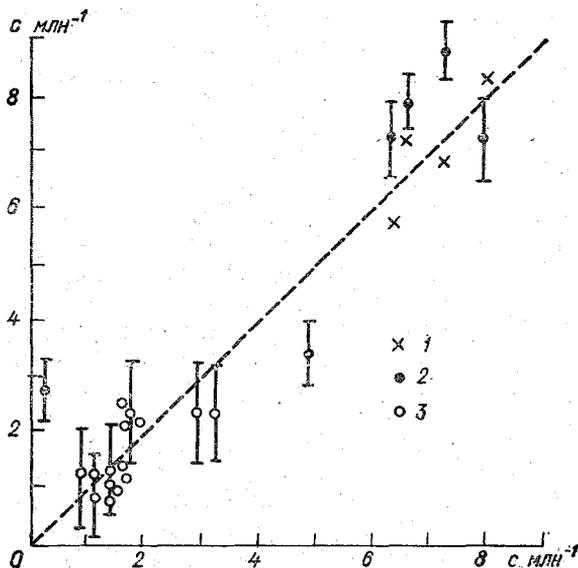


Рис. 1. Сравнение данных измерения концентрации лазерным газоанализатором (1) с данными химического анализа, полученными при последовательном отборе трех проб (2) и при параллельном отборе трех проб (3).

Среднее квадратическое отклонение нулевого отсчета для отдельного измерения с помощью ДЛГ составило 0,1—0,2 млн<sup>-1</sup>. Усреднение данных проводилось по пяти измерениям ДЛГ, а химический анализ проводился по трем пробам стандартным методом (ГОСТ 19502-74). Уровень фоновой концентрации на трассе зондирования не превышал 0,1 млн<sup>-1</sup>.

Предварительные эксперименты на трассе длиной 1 км показали, что при отношении сигнал/шум, равном примерно 10, и мощности фонового излучения, равной  $2,5 \cdot 10^{-10}$  Вт, нестабильность нулевого отсчета ДЛГ по цифровому индикатору составила 0,18 млн<sup>-1</sup> при усреднении десяти измерений.

Уменьшение мощности фонового сигнала увеличивало отношение сигнал/шум примерно до 30 и нестабильность нулевого отсчета становилась менее  $0,08 \text{ млн}^{-1}$ .

Мощность лазерного импульса достаточна для получения сигнала с расстояния до 2,5 км при диффузном отражении с сохранением отношения сигнал/шум, равным примерно 10. При использовании топографических объектов в качестве отражателей появляется возможность определять пространственное распределение максимальных значений концентрации двуокиси азота в приземном слое атмосферы. Двумерное картирование загрязнения в городском районе представляет значительный интерес для решения проблемы репрезентативного размещения постов наблюдений, прогнозирования экстремальных концентраций и их локализации в «застойных» зонах города.

Размещение дистанционного лазерного газоанализатора на транспортных магистралях позволит получить информацию о концентрации двуокиси азота, усредненной по расстоянию  $R$  (от излучателя до отражателя). Эти данные необходимы для оценки вклада линейного источника выбросов (транспортной магистрали) в уровень загрязнения города и для выработки рекомендаций по его регулированию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 184 с.
2. Захаров В. М., Костко О. К. Метеорологическая лазерная локация. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. 234 с.
3. Козинцев В. И. и др. Тезисы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции. — М., 1979, с. 547—548.
4. Козинцев В. И. и др. Методика расчета параметров лидара для контроля газовых загрязнителей атмосферы с использованием метода дифференциального поглощения. Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. — Томск, 1979.
5. Соколов В. И. Охрана среды: организация службы мониторинга, 1980, № 5.
6. Browell E. V. Lidar remote sensing of tropospheric pollutants and trace gases.— In: 4th Joint Conf. on Sensing of Environment Pollutants. New Orleans, 1978, p. 395—402.
7. Fredricksson K. e. a. Lidar system applied in atmospheric pollution monitoring.— Appl. Opt., vol. 18, N 17, p. 2998—3003.
8. Hanst P. L. Infrared spectroscopy and infrared lasers in air pollution research and monitoring.— Appl. Spectr., vol. 24, N 2, p. 161—174.
9. Jacobson L. R., Snawman P. L. IEEEJ QE-3, 1967, p. 603.
10. Rothe K. W. e. a. Appl. Phys., 1974, vol. 3, N 1, p. 115—119.
11. Takeuchi N. e. a. Detectivity estimation of the DAS lidar for  $\text{NO}_2$ .— Appl. Opt., 1979, vol. 17, N 17, p. 2734—2738.
12. Uthe E. E., Wilson W. E. Lidar observations of the density and behavior of the Labadie power plant plume.— Atm. Environ., 1979, vol. 13, p. 1395—1412.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДАТЧИК АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время для измерения атмосферного давления используется широкий класс приборов, в основу которых положена деформация анероидной коробки под воздействием измеряемого давления [3]. Деформация, как правило, преобразуется в линейное перемещение незакрепленного центра анероидной коробки, которое фиксируется тем или иным способом и является мерой давления. Простота изготовления и обслуживания явились теми качествами, которые позволили использовать подобные преобразователи давления на метеостанциях как для визуальных наблюдений, так и для автоматических установок. Однако у этих преобразователей есть серьезные недостатки, ограничивающие их применение, особенно на метеорологических спутниках и ракетах. К таким недостаткам следует отнести большую массу, габариты, а также низкую устойчивость к воздействию механических нагрузок.

Успехи в развитии физики твердого тела, использование новых материалов, достижения современной технологии позволили создать новый класс полупроводниковых преобразователей механических величин [2]. Использование технологии интегральных схем для создания первичных преобразователей ознаменовало собой новую ступень интеграции, характеризующуюся объединением в одном кристалле не только электронных компонентов интегральной схемы, но и конструктивных элементов преобразователей, таких, как упругий чувствительный элемент и вакуумная ячейка. Это позволяет решить проблему разработки и создания дешевых, точных, экономичных и миниатюрных первичных преобразователей.

Широкое применение получили интегральные тензорезистивные преобразователи абсолютного давления. Конструктивно они выполняются в виде вакуумной ячейки, образуемой углублением в одной монокристаллической пластине крепления, которая герметично соединена в вакууме с другой монокристаллической пластиной — основанием. Дном углубления является мембрана, на внешней стороне которой методами планарной технологии сформирована полная мостовая резистивная схема, диффузионные резисторы которой воспринимают деформацию. При большой концентрации носителей легирующего вещества в диффузионных резисторах изменение сопротивления под воздействием деформации можно оценить выражением

$$\Delta R = R_0 G \bar{\epsilon},$$

где  $G$  — коэффициент тензочувствительности;  $R_0$  — сопротивление недеформированного резистора;  $\bar{\epsilon}$  — средняя деформация резистора.

Коэффициент тензочувствительности является функцией концентрации носителей и ориентации в кристаллографических осях. Использование полного активного моста, два противоположных плеча которого подвержены деформации одного знака, а два других — другого, позволяет получить высокую чувствительность преобразователя. Выбирая соответствующее направление резисторов и их размеры, можно получить максимальную чувствительность тензочувствительного моста.

Существенным недостатком полупроводниковых тензорезисторов является зависимость их сопротивления и коэффициента тензочувствительности от температуры. Существует много способов компенсации температурной зависимости выходного сигнала преобразователя давления. К ним можно отнести способ компенсации путем поддержания постоянства температуры кристалла, на котором сформирован интегральный преобразователь давления, за счет протекания через него регулируемого тока [1]. Преимущество этого способа заключается в том, что такой преобразователь без дополнительной схемной компенсации может работать в широком диапазоне температур. К недостаткам такого преобразователя можно отнести дополнительный расход мощности (0,3—0,4 Вт) для термостабилизации кристалла. Достижимая приведенная погрешность измерения давления в диапазоне температур от  $-20$  до  $+40$  °С составляет  $\pm 0,05$  %.

Наиболее распространенным способом компенсации температурной погрешности является последовательное или параллельное подключение к преобразователю двухполюсника, сопротивление или проводимость которого в зависимости от температуры меняется таким образом, что в выходном сигнале преобразователя устраняется температурная составляющая. Как правило, эти двухполюсники реализуются в виде параллельно-последовательного включения резисторов, терморезисторов или диодов. Недостатком этого способа является невозможность компенсации в широком температурном диапазоне и значительная трудоемкость при оценке параметров двухполюсника.

И эти недостатки могут быть устранены в датчике введением схемы обработки, реализующей операцию деления сигналов, поочередно вводимых с двух преобразователей давления. Напряжение на выходе первого преобразователя, воспринимающего измеряемое давление и температуру, равно

$$U_1 = E \cdot G(T) \bar{\varepsilon},$$

где  $E$  — напряжение питания полного тензомоста. В этом выражении коэффициент тензочувствительности является функцией температуры.

Второй компенсационный преобразователь размещается на том же полупроводниковом кристалле, что и первый. Он конструктивно представляет собой ячейку, мембрана которой деформирована и жестко зафиксирована в определенном положении, например, неорганическим наполнителем, температурный коэффициент ли-

нейного расширения которого равен температурному коэффициенту линейного расширения кремния. Деформация мембраны постоянна и не зависит от измеряемого давления. Напряжение на выходе второго преобразователя, изготовленного по схеме полного активного моста и питающегося от того же источника напряжения, что и измерительный преобразователь, равно

$$U_2 = E \cdot G_2(T) \bar{\varepsilon}_0,$$

где  $\varepsilon_0$  — средняя постоянная деформация.

Схема обработки сигналов с активного и компенсационного преобразователей реализована по принципу двухтактного интегрирующего преобразователя [4] (рис. 1), в измерительный канал которого включен преобразователь измеряемого давления, а в опорный канал — компенсационный преобразователь.

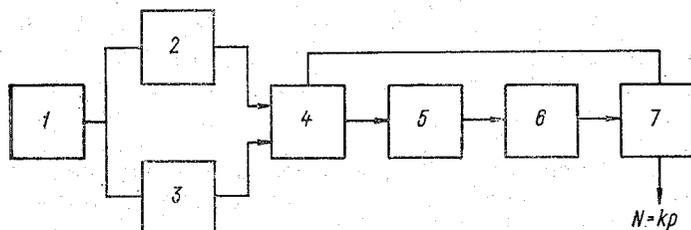


Рис. 1. Блок-схема обработки сигналов полупроводникового датчика давления.

1 — генератор напряжения, 2 — измерительный преобразователь, 3 — компенсационный преобразователь, 4 — переключатель, 5 — интегратор, 6 — компаратор, 7 — схема формирования кода.

В момент времени  $t$  преобразователь подключает выход измерительного преобразователя ко входу интегратора на фиксированный промежуток времени  $t_0$ , в конце которого напряжение на выходе интегратора равно

$$U_n t_0 = \frac{1}{\tau} U_1 t_0 = \frac{1}{\tau} E \cdot G_1(T) \bar{\varepsilon},$$

где  $\tau$  — постоянная времени интегратора.

По истечении времени  $t_0$  в момент  $t_2$  из схемы формирования кода приходит сигнал на переключатель, который производит подключение выхода компенсационного преобразователя ко входу интегратора. Полярность напряжения с выхода компенсационного преобразователя такова, что происходит уменьшение напряжения на выходе интегратора до нуля. Нулевое значение напряжения фиксируется в момент времени  $t_3$  компаратором. Напряжение на выходе интегратора при этом имеет вид

$$U_n = 0 = U_n t_0 - \frac{1}{\tau} \int_{t_2}^{t_3} U_2 dt = U_n t_0 - \frac{1}{\tau} U_2 t_x,$$

где  $t_3 - t_2 = t_x$ .

Промежуток времени  $t_x$  формируется в схеме формирования кода и равен

$$t_x = \frac{\tau U_n t_0}{U_2} = \frac{G_1(T) \bar{\varepsilon}}{G_2(T) \varepsilon_0} t_0.$$

Групповой метод изготовления интегральных преобразователей и высокая воспроизводимость технологических режимов позволяют получить равенство электрофизических параметров диффузионных тензорезисторов измерительного и компенсационного преобразователей, расположенных на одном кристалле, т. е.  $G_1(T) = G_2(T)$ , тогда

$$t_x = \frac{t_0}{\varepsilon_0} \bar{\varepsilon} = \frac{t_0 k}{\varepsilon_0} p,$$

где  $p$  — измеряемое давление;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Сформированный промежуток времени  $t_x$  заполняется импульсами с частотой  $f$ , количество которых  $N_x$  является мерой измеряемого давления:

$$N_x = t_x f = \frac{f k t_0}{\varepsilon_0} p.$$

Таким образом, в выходном сигнале отсутствует температурная составляющая коэффициента тензочувствительности интегрального преобразователя.

Разработанный и изготовленный по этой схеме интегральный преобразователь давления имеет следующие основные характеристики:

- диапазон измеряемого давления от 0 до 1333 гПа;
- диапазон рабочих температур от  $-20$  до  $+40$  °С;
- приведенная погрешность  $\pm 0,2$  %;
- масса преобразователя 5 г.

Малые габариты и масса, низкая стоимость, высокая собственная частота колебаний упругого элемента (около 100 кГц) и достаточная надежность позволяют использовать интегральные преобразователи давления в условиях широкого диапазона температур и больших механических нагрузок.

Выходной сигнал датчика в виде кодовых посылок допускает трансляцию на большие расстояния без потери информации и удобен для связи с ЭВМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 613219 (СССР). Полупроводниковый датчик давления./Красов В. И. и др. — Бюл. изобр., № 24, 1978.
2. Полупроводниковые тензодатчики/Под ред. И. М. Дина.— М.-Л.: Энергия, 1965.

3. Стернзат М. С. Метеорологические приборы и измерения. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. 392 с.

4. Шахов Э. К., Михотин В. Д. Измерения, контроль, автоматика. — Науч.-техн. реф. сб. 1977, вып. 1(9), с. 3—15.

*В. С. Александров, И. В. Арефьева,  
В. П. Котов, В. Б. Милязев, В. Н. Новиков*

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРАХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Измерение концентрации газа с помощью полупроводниковых кондуктометрических детекторов получило широкое распространение в различных областях науки и техники благодаря большим успехам в области теории и технологии полупроводников. Для изготовления полупроводниковых детекторов в основном применяются окиснометаллические поликристаллы. Это обусловлено тем, что в данном случае можно получить полупроводники с большой шириной запрещенной зоны. Так, для  $ZnO$  ширина запрещенной зоны 3,2 эВ, для  $SnO_2$  — 3,8 эВ, в то время как для  $Ge$  и  $Si$  ширина запрещенной зоны около 1,0 эВ.

Согласно электронной теории проводимости [1], изменение электропроводности полупроводников под действием хемосорбции анализируемого газа на поверхности связано с изгибом энергетических уровней в зонной структуре полупроводника. Поэтому чем шире запрещенная зона между валентной зоной и зоной проводимости, тем больше может быть изгиб энергетических уровней, причем максимально возможный изгиб зон равен половине ширины запрещенной зоны. В свою очередь, чем сильнее изогнуты энергетические уровни, тем в большей степени изменяется электропроводность полупроводника, т. е. тем выше чувствительность детектора к концентрации анализируемого газа при одинаковых условиях хемосорбции.

В данной статье рассмотрим полупроводниковый детектор на основе  $SnO_2$ , содержащий присадки: 5—10 % весовых  $ZnO$  и 0,03—0,1 % весовых  $Sb_2O_5$ . Введение  $Sb_2O_5$  создает дополнительные количества избыточных электронов  $n$  полупроводника для снижения электропроводности детектора до желаемого уровня измерений;  $ZnO$  служит для облегчения условий гетерогенного катализа горючих газов. На рис. 1 приведены конструкция (а) и электрическая схема (б) полупроводникового детектора.

Полупроводниковый детектор указанного состава содержит структурные зерна размером  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  см. Изменение электропроводности в таком образце определяется концентрацией электронов в области контактов между зернами. Направленное движение электронов обусловлено преодолением потенциаль-

ных барьеров в контактной области. При нагреве полупроводника электропроводность его увеличивается за счет того, что большее количество носителей заряда сможет преодолеть потенциальные барьеры. Кроме того, о наличии барьерной проводимости говорит тот факт, что электропроводность детектора, измеренная на переменном токе, выше, чем на постоянном, за счет шунтирующего действия барьерных емкостей.

Согласно барьерной модели, проводимость поликристаллических образцов определяется в основном концентрацией носителей заряда в области контактов между зернами, и может быть выражена формулой

$$\sigma = An_0 \exp\left[-\left(\frac{\Delta E}{2} + \varphi q/kT\right)\right], \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $A$  — константа, зависящая от формы барьера;  $n_0$  — концентрация доноров в объеме;  $\Delta E$  — энергия ионизации доноров;  $\varphi$  — высота потенциальных барьеров между зернами [2]

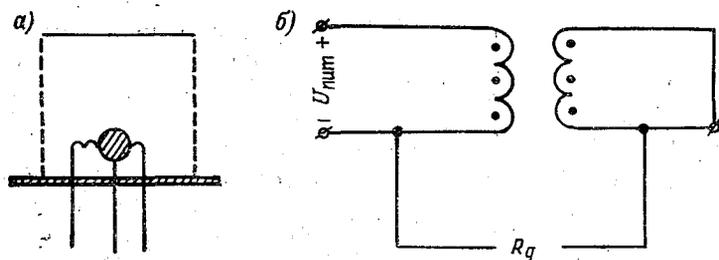


Рис. 1. Конструкция (а) и электрическая схема (б) полупроводникового детектора.

Анализируя выражение (1), видим, что энергия термической активности  $\psi$  состоит из двух частей:

$$\psi = \frac{\Delta E}{2} + \varphi q,$$

и при хемосорбции газа электропроводность может расти не только за счет увеличения концентрации носителей заряда в объеме

$$n_V = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

но и за счет снижения высоты барьеров.

Таким образом, поместив полупроводниковый детектор в вакуум или в среду инертного газа и затем измерив значение термической энергии активации, можно судить о потенциальном барьере, а также о направлении загиба зон, которые обусловлены «биографией» образца.

В воздухе поверхность детектора покрывается хемосорбированными молекулами кислорода, которые приводят к локализации свободных электронов проводимости на адсорбционных центрах, а также к отрицательному заряджению поверхности полупроводника. Заряджение поверхности полупроводника при хемосорбции молекул кислорода приведет к увеличению высоты потенциальных барьеров, если первоначальный изгиб зон, обусловленный технологией изготовления, направлен вверх, и к уменьшению высоты потенциальных барьеров, если первоначальный изгиб зон направлен вниз.

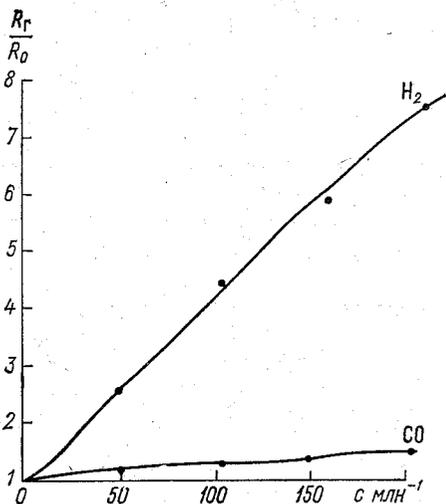
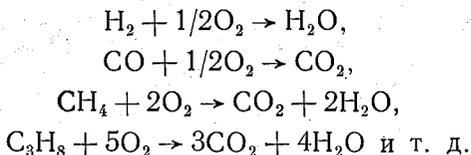


Рис. 2. Зависимость относительного сопротивления полупроводника от концентрации анализируемых газов.

Адсорбция восстановительных газов на поверхности полупроводника, покрытого хемосорбированным кислородом приводит к делокализации электронов проводимости. В результате уменьшается и высота потенциальных барьеров, а электроны проводимости возвращаются в зону проводимости. Увеличение электронов в зоне проводимости полупроводникового детектора приводит к резкому изменению электропроводности образца. Линейная зависимость изменения электропроводности от концентрации газа возможна только в случае адсорбции протекающей по закону Генри [3], т. е. при мономолекулярном заполнении поверхности анализируемым газом, когда его концентрация на два и больше порядков ниже концентрации кислорода в среде.

Рассмотрим стехиометрические уравнения окисления горючих газов:



Анализируя приведенные уравнения, видим, что две молекулы  $H_2$  и  $CO$  высвобождают электроны проводимости, локализованные одной молекулой кислорода. Одна молекула метана высвобождает электроны проводимости, локализованные двумя молекулами  $O_2$ , а молекула пропана — пятью молекулами  $O_2$ . Поэтому можно

предположить, что хемосорбция  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_3\text{H}_8$  на поверхности детектора вызовет более сильное изменение его электропроводности, чем хемосорбция  $\text{CO}$ . Исключение составляет хемосорбция водорода.

На основании работы [4], а также экспериментальных изменений изменение электропроводности полупроводника при адсорбции молекулярного водорода вызвано, вероятно, диссоциацией его на атомы. Энергия активизации изменения проводимости атомов водорода очень мала ( $2,4 \cdot 10^3$  Дж). Этим вызвана более высокая чувствительность полупроводниковых детекторов к молекулярному водороду по сравнению с окисью углерода (рис. 2).

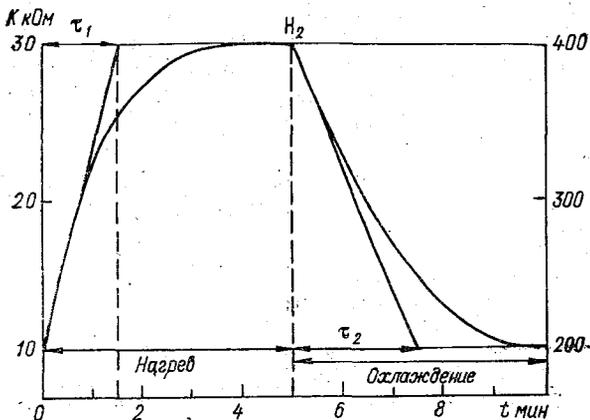


Рис. 3. Кинетика изменения электропроводности полупроводникового детектора.

Увеличить чувствительность детектора к окиси углерода можно введением специальных катализирующих присадок при изготовлении образцов [5], которые уменьшают энергию активации изменения проводимости. На рис. 3 изображена кинетика изменения электропроводности полупроводниковых детекторов с различными присадками в присутствии  $\text{CO}$  и  $\text{C}_3\text{H}_8$ .

Согласно элементарной теории адсорбции Лэнгмюра, адсорбционная способность поверхности при заданных значениях температуры и давления окружающей среды обратно пропорциональна температуре адсорбента. Кроме того, известно, что лимитирующей стадией быстрого действия хемосорбционных процессов является десорбция. Для ее стимуляции необходим разогрев адсорбента.

Для увеличения быстрого действия полупроводниковых детекторов, а также селективного измерения газовых компонентов с различными энергиями активации хемосорбции целесообразно применять полупроводниковые детекторы в двух температурных режимах [6]. Таким образом, можно подобрать температуру  $T_1$ , при которой происходит хемосорбция газа  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ , но не происходит

хемосорбция  $\text{CH}_4$ , о чем можно судить по изменению электропроводности детектора. Разогрев до более высокой температуры  $T_2$  позволит очистить поверхность детектора от продуктов хемосорбции газов (рис. 3).

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В результате проведенных исследований установлено, что полупроводниковые кондуктометрические детекторы концентрации газов могут успешно эксплуатироваться только в кислородсодержащей среде.

2. Линейная зависимость изменения электропроводности полупроводникового детектора от концентрации газа наблюдается при низких концентрациях анализируемого газа.

3. О чувствительности данного детектора к анализируемому газу можно объективно судить по потенциальному барьеру, который легко можно оценить по термической энергии активации.

4. Предложен возможный механизм изменения электропроводности полупроводниковых детекторов при хемосорбции  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_6$ .

5. Определена возможность увеличения быстродействия детекторов и селективного измерения некоторых компонентов анализируемой среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькенштейн Ф. Ф. Электронная теория катализа на полупроводниках. — М.: Физматгиз, 1960, с. 123, 167.
2. Даниэльс Ф., Олберти Р. Физическая химия. — М.: Мир, 1978, 118 с.
3. Мясников И. А. Физическая химия, 1958, т. 32, с. 842.
4. Шуметов В. Г., Басов Л. Л. Фотосорбция кислорода на двуокиси олова. Связь с проводимостью. — Кинетика и катализ, т. IX, вып. 6, 1968, с. 1297.
5. Патент США СО1 27/14 № 3955929, публ. 11.05.76.
6. Патент ФРГ, СО1 27/12 № 2433201, публ. 29.01.76.

*В. С. Чащина*

#### ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА СПЕКТРОГРАММ

При решении задачи контроля загрязнения атмосферы и промышленных выбросов возникает необходимость анализа сложной газовой смеси, а следовательно, и разработки методов и средств автоматической обработки входной информации, которая может быть представлена в виде спектрограмм. По спектрограммам, полученным с помощью спектрального прибора, возможен надежный количественный спектральный анализ, чувствительность которого равна  $10^{-6}$ , что позволяет обнаружить 0,0001 % примеси в веществе от его общего веса [4].

Спектральный анализ имеет преимущество перед другими методами анализа по скорости, превышающей, например, обычные химические методы анализа в сотни и тысячи раз, легкости и удобству его проведения. Однако спектрограммы веществ сложного химического состава имеют сложную структуру, которую необходимо расшифровывать.

Таким образом, возникает задача спектрального анализа вещества сложного состава по его спектру. Для этой цели может быть применен корреляционный анализ исследуемого спектра со спектром известного (эталонного) элемента с помощью ЭВМ, что требует больших затрат машинного времени и необходимости программного обеспечения.

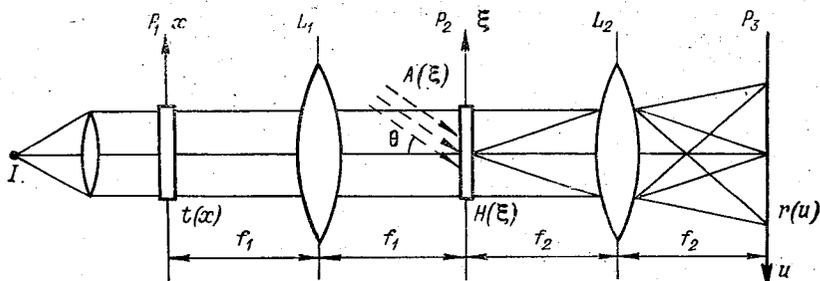


Рис. 1. Схема согласованной пространственной фильтрации.

$I$  — источник монохроматического излучения,  $L_1$  и  $L_2$  — линзы,  $P_1$  — плоскость входного сигнала,  $P_2$  — плоскость фильтрации,  $P_3$  — плоскость выходного сигнала.

Наряду с цифровой обработкой спектрограмм несомненный интерес представляет возможность использования аналогового варианта на основе методов оптической обработки и голографии, которые естественным образом приспособлены к параллельному анализу больших информационных массивов, представленных в виде изображений.

С помощью когерентной оптики и голографии могут быть реализованы корреляционные алгоритмы опознавания образов, на основе которых разработаны различные системы [1]. Следовательно, задача обработки спектральной информации может быть решена с помощью голографических методов опознавания образов путем сравнения анализируемого изображения спектра с эталонным. При решении задачи опознавания оптимальное решающее правило (с учетом некоторых ограничений) может основываться на вычислении взаимной корреляции между сигналом исследуемого спектра и его эталона [1].

В основе оптических методов обработки изображений лежит метод пространственной фильтрации [1—3, 5], который основан на явлении дифракции света и свойстве сферической линзы осуществлять двумерное фурье-преобразование над когерентными оптическими сигналами.

В качестве входного сигнала системы пространственной фильтрации (рис. 1) используется транспарант, помещенный в переднюю фокальную плоскость  $P_1$  и линзы  $L_1$  и представляющий собой фотопластинку, на которой записан анализируемый сигнал (спектр) в виде изменения ее амплитудного пропускания  $t(x)$ . Поскольку амплитудное пропускание меняется только в направлении координаты  $x$ , то будем рассматривать одномерный сигнал.

Сущность пространственной фильтрации состоит в формировании пространственно-частотного спектра  $T(\xi)$  изображения  $t(x)$  с последующей обработкой этого спектра по закону, который определяется характером выполняемой над изображением операции, и преобразованием измененного пространственного спектра в выходное изображение  $r(u)$ , регистрируемого в плоскости  $P_3$ .

Операция разложения изображения транспаранта, освещаемого коллимированным светом лазера, в спектр по пространственным частотам осуществляется с помощью линзы  $L_1$ . Спектр пространственных частот формируется в задней фокальной плоскости  $P_2$  этой линзы и представляет собой фурье-преобразование, записанное на транспаранте изображения:

$$T(\xi) = F[t(x)], \quad (1)$$

где  $F[t(x)]$  — оператор фурье-преобразования.

Пространственное преобразование спектра выполняется с помощью пространственного фильтра, являющегося фурье-образом  $S_0(\xi)$  опознаваемого эталонного сигнала  $S_0(x)$ :

$$S_0(\xi) = F[S_0(x)], \quad (2)$$

помещенного в частотную плоскость  $P_2$ .

Пространственный фильтр можно получить, используя голографический способ изготовления комплексных фильтров, предложенный Вандер Люгтом [6], в котором голографический фильтр изготавливается по схеме, приведенной на рис. 1, с использованием опорного излучения  $A(\xi)$  лазера, которым освещается эталонный транспарант  $S_0(x)$ , помещенный в плоскость  $P_1$ .

В общем случае процесс обработки входного сигнала оптической системой пространственной фильтрации описывается известным интегралом свертки

$$r(u) = t(x) \times h(x) = \int t(x)h(u - x)dx, \quad (3)$$

которому в частотной области соответствует произведение

$$R(\xi) = T(\xi) \cdot H(\xi), \quad (4)$$

где частотная передаточная функция

$$H(\xi) = F[h(x)] \quad (5)$$

(являющаяся фурье-образом импульсной характеристики  $h(x)$ ) в случае использования двухлинзовой оптической системы филь-

рации тождественно равна частотной передаточной функции пространственного фильтра (2):

$$H(\xi) \equiv S_0(\xi). \quad (6)$$

При использовании оптической системы согласованной пространственной фильтрации для обнаружения и идентификации известных сигналов (изображений, соответствующих эталонным спектрам) на сложном шумоподобном фоне осуществляется корреляционный анализ изображений с помощью согласованного пространственного фильтра, у которого импульсный отклик в области корреляции является комплексно-сопряженной величиной известного (эталонного) сигнала

$$h(x) = S_0^*(x). \quad (7)$$

В этом случае частотная передаточная функция согласованного с сигналом фильтра связана с импульсной характеристикой преобразованием Фурье

$$H(\xi) = S_0^*(\xi), \quad (8)$$

где  $S_0^*(\xi)$  — комплексно-сопряженный пространственно-частотный спектр сигнала.

Подставляя значение импульсной характеристики согласованного фильтра (8) в соотношение (3), получим на выходе схемы фильтрации

$$r(u) = \int t(x) S^*(x - u) dx = t(x) \times S^*(x). \quad (9)$$

Таким образом, отклик согласованного пространственного фильтра представляет собой взаимокорреляционную функцию входного изображения и эталонного сигнала, с которым фильтр согласован. В общем случае входное изображение  $t(x)$  содержит интересующий нас объект-сигнал  $S_0(x)$ , а также другие сигналы  $S(x)$  и однородный стационарный шум  $n(x)$  (белый шум), создающие помехи. Поскольку сигнал и шум аддитивны, а схема согласованной пространственной фильтрации является линейной системой, то можно рассматривать прохождение сигнала и шума раздельно.

В результате имеем

$$t(x) = S_0(x) + S(x) + n(x). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$r(x) = S_0(x) \times S_0^*(x) + S(x) \times S_0^*(x) + n(x) \times S_0^*(x). \quad (11)$$

Величина  $r(x)$  складывается из функции автокорреляции эталонного сигнала и функций взаимных корреляций этого сигнала с другими сигналами и шумом. Результат согласованной пространственной фильтрации отображается в выходной плоскости  $P_3$  и представляет собой корреляционное поле, содержащее взаимо-

корреляционные функции сигналов и шума. Отклик схемы фильтрации получается за счет концентрации энергии эталонного сигнала в небольшое по размерам яркое дифракционное пятно, выделяющееся на фоне слабоосвещенного ореола, который образуется за счет усредненной по площади энергии несогласованных сигналов и шума. При этом достигается максимум отношения типового значения сигнала к среднему квадратическому значению шума.

Таким образом, имея набор эталонных фильтров известных сигналов (спектров), записанных на разных несущих пространственных частотах [1], задаваемых углом падения  $\theta$  опорного излучения  $A(\xi)$ , можно провести спектральный анализ спектрограмм, т. е. распознать соответствующий набор неизвестных веществ и получить качественную и количественную информацию об их составе.

Необходимо отметить, что чем сложнее по структуре сигнал, т. е. чем он информативнее, тем эффективнее опознается (идентифицируется) сигнал с помощью голографического согласованного фильтра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов. — М.: Советское радио, 1977. 269 с.
2. Гуревич С. Б. и др. Передача и обработка информации голографическими методами/С. Б. Гуревич, В. Б. Константинов, В. К. Соколов, Д. Ф. Черных. М.: Советское радио, 1978. 300 с.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973. 686 с.
4. Тарасов К. И. Спектральные приборы. — Л.: Машиностроение, 1977. 367 с.
5. Франсон М. Голография. — М.: Мир, 1973. 246 с.
6. Vander Lugt A. V. Signal detection by complex filtering. 1964, vol. IT-10, N 2.

*В. В. Михайлов*

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАЗЕРОВ В ПРИБОРАХ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ**

Рост промышленного загрязнения окружающей среды в настоящее время выдвигает более жесткие требования к аппаратуре контроля загрязнения атмосферы по чувствительности и селективности, а также по оперативности получения и полноте информации о степени загрязнения на возможно больших площадях. Решение задачи получения и обработки информации о степени загрязнения осуществляется как у нас в стране, так и за рубежом путем создания сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (КЗА). Эти станции оснащаются, как правило,

комплексом газоаналитической аппаратуры для проведения локальных измерений, хотя уже сейчас делаются попытки применения на них приборов дистанционного контроля — лидаров, более перспективных с точки зрения полноты получаемой информации. Однако ввиду отсутствия общего алгоритма интерпретации получаемой информации, подобные системы широкого распространения пока не получили, за исключением приборов резонансного поглощения, занимающих обособленное место в ряду приборов дистанционного контроля.

Как показывает анализ общих тенденций развития мирового газоаналитического приборостроения, наиболее перспективным для создания приборов КЗА является применение лазерной спектроскопии, которая благодаря высокой спектральной плотности и монокromaticности лазерного излучения позволяет не только повысить чувствительность и селективность известных оптических газоанализаторов (в частности, оптико-акустических и резонансного поглощения), но и создавать принципиально новые приборы, использующие эффекты резонансного и комбинационного рассеяния. Однако последние, наряду с лидарами, целесообразно исключить из рассмотрения ввиду технических и технологических трудностей, позволяющих создавать в настоящее время лишь уникальные лабораторные установки, обслуживаемые высококвалифицированным персоналом, и ограничить рассмотрение лишь методом резонансного поглощения, как наиболее приемлемым для решения задачи оснащения постов КЗА современной аппаратурой. Рассмотрению возможных технических решений при создании газоаналитической аппаратуры на основе метода резонансного поглощения и посвящена настоящая работа.

Как известно, наиболее перспективны для создания газоаналитической аппаратуры с использованием метода резонансного поглощения являются лазеры, работающие в средней инфракрасной области  $\lambda = 2,5 \div 25$  мкм, где лежат линии поглощения основных загрязнителей, и допускающие подстройку длины волны излучения на линии поглощения интересующих газов.

В настоящее время в распоряжении исследователей имеется в основном несколько типов промышленных лазеров, работающих в инфракрасном диапазоне, таких, как ЛГ-44, ЛГ-75А, ЛГ-126 ( $\lambda = 3,39$  мкм), ЛГ-22 ( $\lambda = 10,6$  мкм), а также различные полупроводниковые лазеры. Хотя полупроводниковые лазеры позволяют путем подбора технологии изготовления получать излучение в любом желаемом диапазоне ИК области (преимущество, реализация которого станет возможна лишь после налаживания промышленного выпуска лазеров непосредственно для нужд газового анализа) и допускают небольшую перестройку магнитным полем, давлением, током или температурой, но требуют при этом охлаждения перехода до температуры порядка 77 К и ниже, а также дополнительной аппаратуры, стабилизирующей факторы перестройки, что затрудняет их использование в автоматических приборах постов КЗА. Применение в этих приборах в качестве источников из-

лучения промышленных молекулярных газовых лазеров требуют модернизации с целью получения более узкой полосы генерации и осуществления перестройки длины волны излучения путем введения в резонатор лазера диспергирующих элементов, что представляется более простым, чем применение для тех же целей полупроводниковых лазеров.

Из сказанного следует, что если исходить из задачи создания приборов КЗА на основе исключительно промышленных лазеров, то наиболее целесообразным представляется использование молекулярных газовых лазеров. Поэтому рассмотрение возможных схем приборов в настоящей статье связано лишь с указанными лазерами.

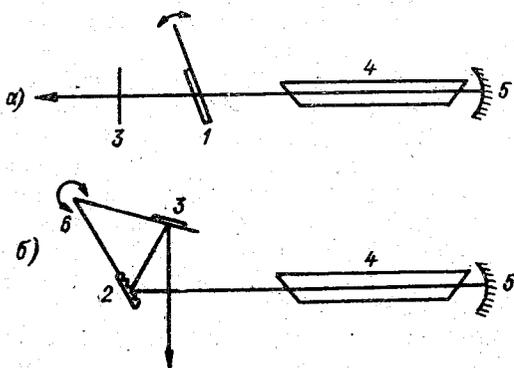


Рис. 1. Схемы лазера с перестройкой интерферометром Фабри-Перо (а) и при помощи дифракционной решетки (б).

1 — интерферометр Фабри-Перо  
2 — дифракционная решетка, 3 — выходное зеркало, 4 — газовая трубка, 5 — зеркало, 6 — поворотная система.

Как уже отмечалось выше, модернизация промышленных молекулярных газовых лазеров связана с введением в оптический резонатор диспергирующих элементов, которое может быть осуществлено различными способами, например введением непосредственно в резонатор лазера интерферометра Фабри—Перо [2] либо заменой выходного зеркала дифракционной решеткой [1] закрепленной в специальной сканирующей системе. Интерферометр Фабри—Перо, примененный авторами работы [2] для осуществления перестройки молекулярного газового лазера, представляет собой, по данным статьи, плоскопараллельную пластину (клиновидность не более  $4''$ ) из полупроводникового материала в частности германия, диаметром 20 мм и толщиной 0,91 мм, закрепленную в резонаторе лазера (рис. 1 а) на сканирующей системе под углом к оптической оси резонатора. Перестройка такого модифицированного лазера осуществляется изменением угла пластины по отношению к оптической оси резонатора и, по данным авторов, дает возможность получить колебания на 20 линиях в диапазоне 10,6 мкм.

Подобная система представляет определенный интерес прежде всего тем, что позволяет, используя пьезокерамику, осуществлять тонкую настройку на линию генерации при помощи мало

инерционной электрической обратной связи (рис. 1 а), чего лишена схема, использованная в работе [1], где перестройка и подстройка линии генерации осуществляется при помощи инерционной электромеханической обратной связи (рис. 1 б). В этой схеме изменение длины волны генерации осуществляется за счет поворота системы решетка—зеркало вокруг оси (рис. 1 б). При этом положение выходного луча в пространстве сохраняется.

Угол между оптической осью лазера и плоскостью дифракционной решетки определяется углом блеска решетки и составляет обычно около  $30^\circ$  (100 штр/мм). Использованная авторами в установке механическая система обеспечивала возможность изменения

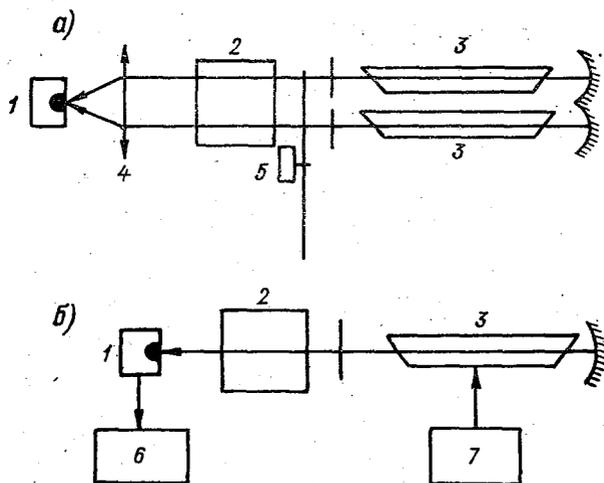


Рис. 2. Схемы дифференциального метода (а) и метода производной (б).

1 — приемники, 2 — кюветы с исследуемым газом, 3 — лазеры, 4 — линза, 5 — модулятор, 6 — электронный блок, 7 — система перестройки длины волны излучения лазера.

угла в пределах  $\pm 4^\circ$  от номинального и возможность юстировки зеркала и дифракционной решетки. Выбор того или иного способа модернизации промышленного лазера применительно к приборам резонансного поглощения принципиального значения не имеет и определяется в большинстве случаев лишь техническими возможностями исследователя.

Как отмечалось, наиболее широкое распространение в практике мирового газоаналитического приборостроения получил метод измерений резонансного поглощения, который может проводиться либо по измерению непосредственно интенсивности луча после прохождения через поглощающий газ, либо по вторичным эффектам, связанным с поглощением излучения (оптико-акустический, оптико-термический и т. д.).

Не останавливаясь на хорошо известных классических схемах приборов резонансного поглощения, представляется целесообразным отметить лишь наиболее удачные их модификации.

Для регистрации прямого поглощения ряд авторов [3, 5] предлагает использовать так называемый дифференциальный метод, заключающийся в измерении поглощения на линии интересующего исследователя газа и вне ее, используя для этой цели два лазера (рис. 2 а) с близкими линиями генерации, одна из которых лежит вне линии поглощения анализируемого газа, а другая совпадает с этой линией. Данная схема позволяет за счет совпадения оптических путей пучков излучения лазеров автоматически учесть посторонние факторы, влияющие на прохождение излучения через анализируемую пробу (наличие пыли, замутнение оптики и т. д.)

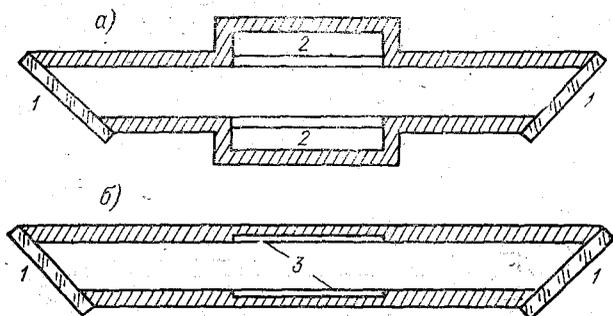


Рис. 3. Детекторы оптико-акустический (а) и оптико-термический (б).

1 — окна, 2 — микрофон, 3 — пьезоэлектрический приемник.

и, следовательно, повысить чувствительность метода, однако при этом остается открытым вопрос взаимной стабилизации мощности и длины волны излучения используемых лазеров, что затрудняет пока практическое использование этой схемы.

Другая модификация метода измерения поглощения — метод производной [7]. Основой этого метода является сканирование перестраиваемых лазером линий поглощения исследуемого газа, при этом регистрируется не абсолютная величина интенсивности прошедшего излучения, а производная от нее. Это позволяет проводить определение интересующего газа на фоне различных мешающих примесей, поглощение которых в данной области не имеет резонансного характера, что особенно ценно при работе непосредственно в атмосфере без предварительной пробоподготовки.

Оптико-акустический метод определения концентраций считается многими авторами [4, 8] наиболее перспективным для целей газового анализа ввиду высокой чувствительности и большого динамического диапазона. Основным препятствием для увеличения его чувствительности является паразитный сигнал от нагрева окон

детектора за счет поглощения ими части излучения лазера. Ряд авторов [4, 8] предлагает снизить влияние этого фактора путем наделения объема детектора свойствами акустического резонатора таким образом, чтобы стоячая акустическая волна имела вблизи поверхности окон узлы (рис. 3 а).

Оптико-акустический метод определения концентраций газа, однако, имеет существенный технический недостаток, затрудняющий создание на его основе, по крайней мере если в детекторе использованы мембранные микрофоны (пьезоэлектрический микрофон не рассматривается ввиду его низкой чувствительности), приборов КЗА. Этот недостаток связан со сложностью введения пробы газа в детектор, определяемой малой механической прочностью чувствительной мембраны микрофона.

В связи с этим заслуживает внимания оптико-термический датчик (рис. 3 б) [9], который хотя и имеет более низкую чувствительность, чем оптико-акустический датчик, но обладает несомненным преимуществом перед ним (простота конструкции, высокая механическая прочность и надежность в эксплуатации). Все это делает оптико-термический датчик весьма перспективным для создания передвижной аппаратуры контроля загрязнения атмосферы.

Любая из приведенных выше схем после решения некоторых, чисто технических вопросов пригодна для решения поставленной задачи — создания приборов контроля загрязнения атмосферы на основе модифицированных промышленных молекулярных газовых лазеров. Выбор конкретной схемы, однако, возможен лишь после проведения дополнительных исследований, связанных с определением технических возможностей модифицированных лазеров и разработки методики исследования различных загрязнителей с их помощью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоменюк А. С., Жаров В. П., Шайдуров В. О. Лазерный оптико-акустический метод измерений относительного содержания изотопов в молекулах. Квантовая электроника, 1976, № 2, с. 369.
2. Громов Ю. Н. и др. Внутренняя селекция частот  $\text{CO}_2$  лазера при помощи интерферометра Фабри — Перо. — ПТЭ, 1971, № 3, с. 183.
3. Byer R. L. J. Opt. Quant. Electron. 1975. N 7. p. 147.
4. Dewey C. F., Kamm R. D., Hacke C. E. Appl. Phys. Letters, 1974, N 23, p. 633.
5. Henningsen T., Garbuny M., Byer R. L. Appl. Phys. Letters, 1974, N 24, p. 242.
6. Hinkley E. D., Ku R. T. Diode laser multi-pollutant ambient air monitoring. — Annual Rep. to the Nat. Sci. Found. (RANN), 1974.
7. Mc. Dowell R. S., e. a. Opt. Commun. 1976, N 17, p. 178.
8. Max E., Rosengren L.-G. Opt. Commun., 1974, N 11, p. 422.
9. Rosengren Z. Infrared Phys. 1973, N 13, p. 109—121.

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ОБРАЗЦОВОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА**

Принимаемые в настоящее время меры по контролю и сокращению загрязнения окружающей среды отходами промышленности, в особенности газообразными, требуют привлечения всевозрастающего числа различной газоаналитической аппаратуры.

Одновременно с увеличением потребности в газоаналитической аппаратуре возросла и потребность в поверочных смесях, используемых для калибровки данной аппаратуры. Однако используемые до настоящего времени химические и физические методы аттестации поверочных смесей оказались мало пригодны при массовом производстве указанных смесей ввиду их низкой производительности. В связи с этим возникла необходимость создания чувствительного и высокопроизводительного средства аттестации поверочных смесей, основанного на методе, допускающем возможность прямой экстраполяции калибровочной кривой из области высоких концентраций анализируемого компонента в область низких концентраций.

Представляется очевидным, что наиболее приемлемым для решения этой задачи является широко известный [1, 2] метод резонансного поглощения, отвечающий всем перечисленным требованиям.

Настоящая работа посвящена вопросу создания образцового газоанализатора углеводородов, основанного на методе резонансного поглощения и оптимизации его параметров с целью уменьшения погрешности измерения.

Выпускаемые в настоящее время поверочные смеси представляют собой смеси типа метан — воздух или пропан — воздух. Следовательно, и задача аттестации этих смесей сводится к определению содержания в них метана или пропана.

Совпадение линии излучения гелий-неонового лазера с линиями поглощения метана, пропана и других углеводородов позволяет создать образцовый прибор для аттестации указанных поверочных смесей. Процессы поглощения излучения в газе связаны с фундаментальными свойствами вещества и обладают высокой специфичностью, поскольку они обусловлены взаимодействием излучения непосредственно с молекулами определяемого вещества. Особенно важным свойством является независимость (с погрешностью не более 0,5 %) коэффициента поглощения анализируемого вещества от концентрации при ее объемной доле менее 0,1—0,03 % и постоянном составе неизмеряемых компонентов. Это позволяет создать образцовый прибор для широкого диапазона концентраций, использовать методы поэлементной поверки и поверки по

квивалентам, проводить градуировку прибора в области микроконцентраций расчетным путем. Погрешность измерителя интенсивности и составляющая за счет зависимости коэффициента поглощения от частоты дают основной вклад в погрешность измерения смеси лазерным абсорбционным методом, поэтому для более полной реализации преимуществ лазерного абсорбционного метода следует рассмотреть выбор оптимальных характеристик лазерного газоанализатора.

Измеритель интенсивности характеризовался только классом точности. Однако при использовании цифрового выходного прибора погрешность измерителя интенсивности может нормироваться двучленной формулой (1)

$$\frac{\delta I}{I} = a + b \left( \frac{I_K}{I} - 1 \right) = \frac{\delta I_K}{I_K} \left[ 1 + p \left( \frac{I_K}{I} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где  $\delta I/I$  — погрешность измерения интенсивности;  $a = \delta I_K/I_K$  — погрешность в конце диапазона;  $b$  — составляющая погрешности;  $p = b/a$  — параметр, изменяющийся от 0 до 1.

Для случая когда интенсивность падающего на кювету с анализируемым веществом излучения близка к верхнему пределу диапазона измерения, можно записать выражение для относительной погрешности измерения концентрации, которая вызвана ошибкой измерителя интенсивности:

$$\begin{aligned} \frac{\delta c}{c} &= \frac{\delta I_0}{I_0} \frac{\sqrt{1 + [1 + p(x-1)]^2}}{\ln x} = \frac{\delta I_0}{I_0} F(x, p) = \\ &= \frac{\delta I_0}{I_0} \frac{\sqrt{1 + [1 + p(e^{kcd} - 1)]^2}}{kcd} = \frac{\delta I_0}{I_0} F(d, p), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta c/c$  — относительная погрешность измерения концентрации;  $\delta I_0/I_0$  — относительная погрешность измерения интенсивности падающего излучения;  $x = I_0/I$  — отношение интенсивностей падающего излучения к прошедшему;  $k$  — коэффициент поглощения;  $c$  — концентрация анализируемого газа;  $d$  — длина кюветы;  $F = \frac{\delta c}{c} / \frac{\delta I_0}{I_0}$  — функция погрешности.

Зависимость функции погрешности от параметра  $p$  и от концентрации показана на рис. 1. Значения положения минимума на кривой погрешности ( $x_{\min}$ ), функции погрешности в минимуме ( $F_{\min}$ ), пропускания кюветы ( $T_{\text{опт}}$ ) и длины кюветы ( $d_{\text{опт}}$ ) для минимума погрешности в зависимости от параметра  $p$  приведены в таблице.

Образцовый прибор предназначен для аттестации газовых смесей в определенном диапазоне концентрации, поэтому целесообразно нормировать относительную погрешность прибора в выбранном диапазоне. Наиболее рациональным распределением погрешности в пределах диапазона будет случай, когда относительные погрешности будут наибольшими и равными друг другу на концах диапазона. При этом нормируется относительная погрешность

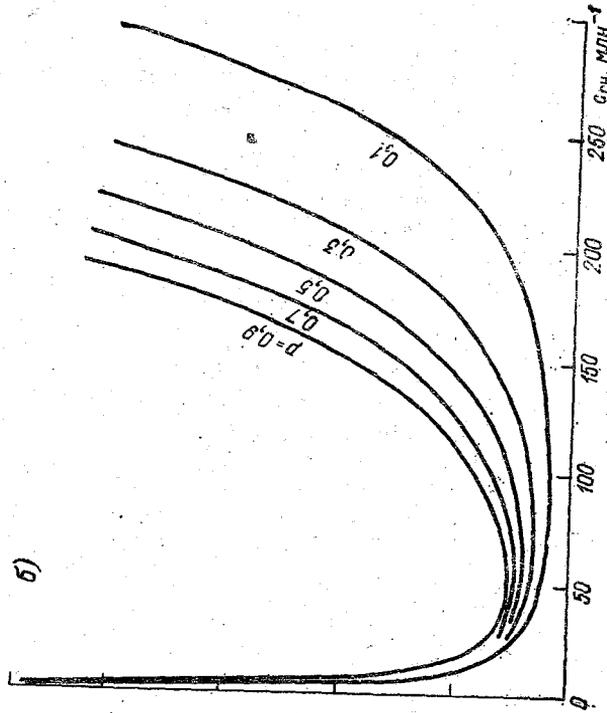
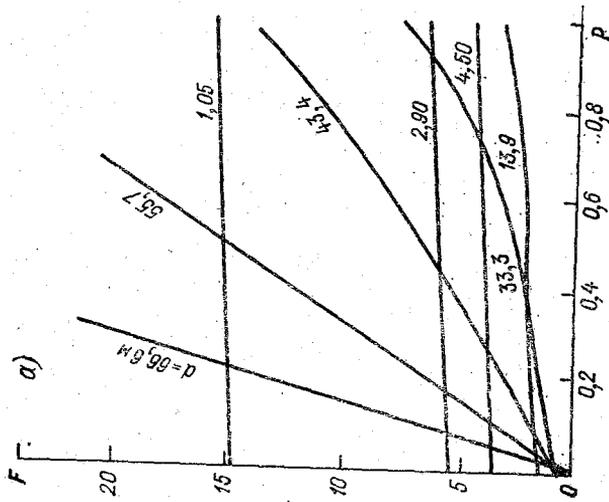


Рис. 1. Зависимость функции погрешности от параметра  $p$  и концентрации.  
 а — для концентрации метана 100 млн<sup>-1</sup>, б — для кюветы длиной 28 м.

в диапазоне концентрации  $c_n - c_k$ . Оптимальная длина кюветы находится по формуле

$$d_{\text{опт}} = \frac{\ln x_k}{kc_k}, \quad (3)$$

где  $x_k$  — отношение интенсивностей падающего и прошедшего излучения для максимальной измеряемой концентрации  $c_k$  определяется из уравнения.

$$\alpha^2 \{1 + [1 + p(x_k^\alpha - 1)]^2\} = 1 + [1 + p(x_k - 1)]^2, \quad (4)$$

в котором  $\alpha = c_n/c_k$  — отношение значений концентраций в начальном и конечном пределах измерения.

**Оптимальные параметры газоанализатора при двучленном нормировании погрешности измерителя интенсивности**

Величина	Параметр $p$									
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$x_{\min}$	3,03	3,17	3,34	3,55	3,81	4,16	4,66	5,43	6,84	10,48
$F_{\min}$	2,87	2,70	2,52	2,34	2,14	1,94	1,73	1,50	1,24	0,93
$T_{\text{опт}} \%$	33,0	31,5	30,0	28,2	26,2	24,0	21,5	18,4	14,6	9,5
$\lg x_{\min}$	1,1	1,15	1,20	1,27	1,34	1,43	1,54	1,69	1,92	2,35

Погрешность измерения определяется подстановкой  $x_k(\alpha, p)$  в формулу (2). Выбор оптимальной длины кюветы с учетом двучленной формулы нормирования погрешности позволяет уменьшить погрешность в 1,5—2 раза по сравнению со случаем, когда принимается во внимание только класс прибора.

Значительный вклад в погрешность абсорбционного лазерного газоанализатора может вносить нестабильность частоты используемого лазера и зависимость коэффициента поглощения от давления и температуры. Исследования гелий-неонового лазера, который используется в образцовом газоанализаторе, показали, что нестабильность частоты определяется в основном нестабильностью оптической длины резонатора лазера. Диапазон перестройки при этом составляет 400—430 МГц, а скорость изменения частоты достигает 80 МГц/мин.

Погрешность за счет нестабильности частоты зависит от давления анализируемой смеси и определяется наличием тонкой структуры в спектре поглощения. Контур одиночной линии поглощения при давлениях более  $0,5 \cdot 10^3$  гПа описывается [2] формулой

$$k(\nu) = \frac{S}{2\pi} \frac{\gamma}{(\nu - \nu_0) + \frac{\gamma^2}{4}}, \quad (5)$$

где  $k(\nu)$  — коэффициент поглощения на частоте  $\nu$ ;  $\nu_0$  — центральная частота линии поглощения;  $S$  — интегральная интенсивность линии;  $\gamma$  — полуширина контура линии.

Определение погрешности измерения проведено для метана с учетом зависимости линии  $P$  (7), имеющей шесть полос с центральными частотами:  $\nu_1=2947,670$  см $^{-1}$ ;  $\nu_2=2947,812$  см $^{-1}$ ;  $\nu_3=2947,914$  см $^{-1}$ ;  $\nu_4=2948,112$  см $^{-1}$ ;  $\nu_5=2848,425$  см $^{-1}$ ;  $\nu_6=2948,475$  см $^{-1}$  [4].

Максимум коэффициента усиления гелий-неонового лазера находится на частоте  $2947,912$  см $^{-1}$ , что почти совпадает с центральной частотой линии метана.

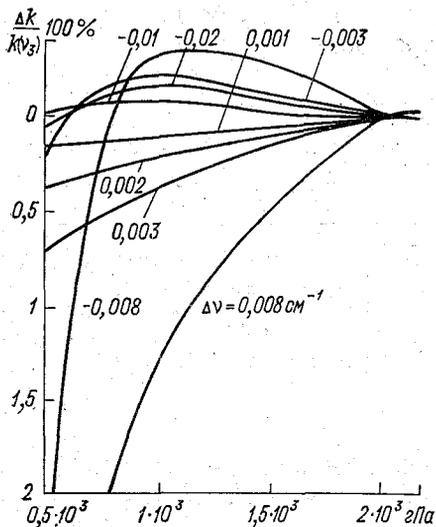


Рис. 2. Относительное изменение коэффициента поглощения от давления на различных частотах генерации лазера.

Расчеты выполнялись в предположении, что контур каждой полосы в линии  $P$  (7) описывается формулой (5). Значения  $S_2, S_3, S_4$  и  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  для нормальных условий приведены в работе [6]. Для остальных полос значения  $S$  и  $\gamma$  совпадают с большой точностью с  $S_3$  и  $\gamma_3$  [4].

В области давлений более  $0,5 \cdot 10^3$  гПа полуширина контура линии определяется ударным уширением и пропорциональна давлению. Результаты вычислений относительного изменения коэффициента поглощения метана на различных частотах генерации лазера показаны на рис. 2. Для того чтобы относительное изменение коэффициента поглощения превышало 0,1% при давлении смеси  $0,5 \times$

$\times 10^3$  гПа частота лазера должна находиться в пределах  $2947,912-2947,914$  см $^{-1}$ , при давлении  $1 \cdot 10^3$  гПа — в пределах  $2947,913-2947,915$  см $^{-1}$ , при давлении  $1,5 \cdot 10^3$  гПа — в пределах  $2947,912-2947,916$  см $^{-1}$ ; при давлении смеси В эта частота лазера может изменяться в пределах всей линии усиления лазера, что исключает необходимость стабилизации частоты излучения лазера.

Описанный подход к выбору оптимальных параметров лазерного образцового газоанализатора: длина кюветы и давления в кювете позволяет обеспечить снижение погрешности и повышение стабильности показаний лазерного газоанализатора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреслер П. И. Оптические абсорбционные газоанализаторы. — Л.: Энергия, 1980. 164 с.
2. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей/Пер. с чешского. — М.: Энергия, 1970. 552 с.
3. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. — М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
4. Varner W. L., Sussind J., Hunt R. H., Plyer E. K. Measurement and analysis of methane. — J. Chem. Phys. 1972, vol. 56, N 10, p. 5160.
5. Hubbert R. G., Group G. T. Singlemode 3,39 mkm laser study of methane. — Phys. Let., 1977, vol. 61, N 1, p. 33.

*Г. А. Морозов, Н. И. Струков, К. В. Иванченко*

### ПОВЫШЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ

В последние годы все большее значение приобретает контроль за загрязнением окружающей среды. В связи с малыми уровнями концентраций загрязняющих газов для его осуществления необходимы высококачественные избирательные газоанализаторы, выполняемые часто на основе оптических методов анализа. Требование получения высокой чувствительности приводит к необходимости большого усиления сигналов с датчиков, что увеличивает вклад шумов в выходной сигнал газоанализатора. Поэтому при контроле микроконцентраций задача повышения отношения сигнал/шум является особенно важной.

При отсутствии требований по быстродействию прибора уменьшение шумов может достигаться за счет применения инерционных узлов в схеме обработки переменного сигнала с датчика.

Задача уменьшения шумов при наличии высоких требований по быстродействию является более сложной и решается как воздействием на источник шумов, так и соответствующей обработкой сигнала с помощью синхронного детектора.

Известны схемы синхронных детекторов, например однополупериодный и двухполупериодный детекторы эффективного значения, пиковый детектор [1].

Эти схемы обеспечивают улучшение отношения сигнал/шум, но обладают малым быстродействием.

Более эффективен синхронный детектор [2], электрическая схема и диаграммы работы которого в однополупериодном варианте приведены на рис. 1 и 2.

Детектор работает следующим образом. При положительной полуволне напряжения на входе детектора ключи *I* и *II* разомкнуты, интегратор *III* интегрирует напряжение входного сигнала. В конце полупериода на выходе интегратора устанавливается мак-



симальное напряжение, пропорциональное эффективному значению детектируемого сигнала за положительный полупериод:

$$U_{ин} = \frac{1}{R_1 C_2} \int R_{вх} dt. \quad (1)$$

В момент начала отрицательного полупериода по команде с формирователя *IV* на время строб-импульса  $\tau$  замыкается ключ *II* и значение проинтегрированного напряжения устанавливается на запоминающем элементе *V*. Формирователь *IV* управляется источником строб-импульсов, синхронизированным с модулятором оптического излучения. По окончании действия строб-импульса ключ *II* размыкается и на оставшуюся часть полупериода замыкается ключ *I*. При этом конденсатор *C2* разряжается, устанавливая начальный уровень интегратора. В следующий период цикл повторяется. При изменении амплитуды входного напряжения  $U_{вх}$ , запоминающий элемент перезаряжается в течение 1—2 периодов, таким образом определяя быстродействие детектора.

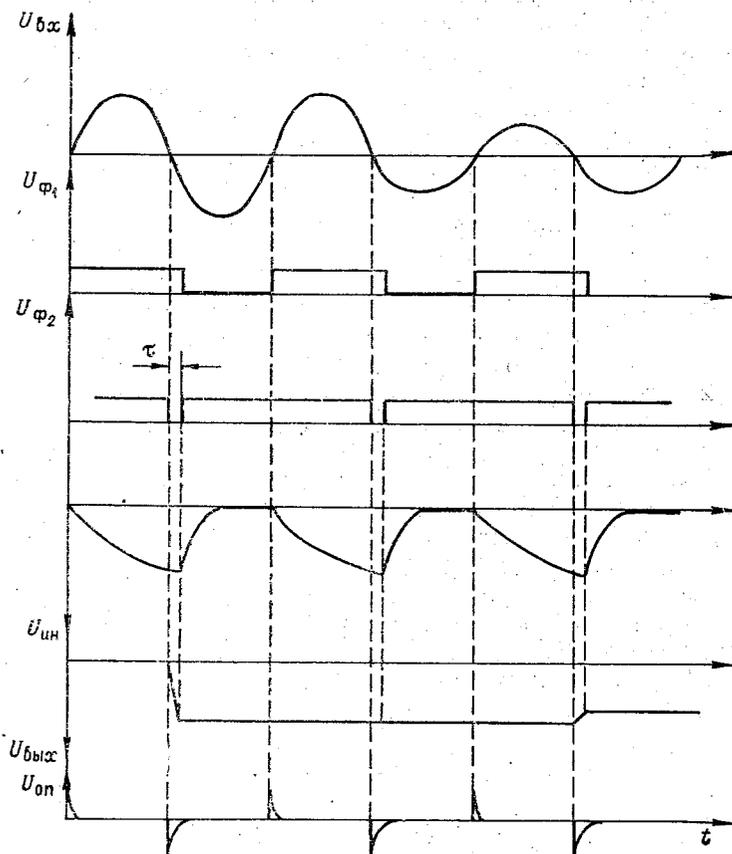


Рис. 2. Эпюры напряжений.

Интегратор выполнен на основе инвертирующего усилителя VI. В качестве ключей используются ключи на МОП-транзисторах, обладающие малыми токами утечки, выполненные в одной микросхеме У2. Запоминающим элементом является C5 (типа К73-9) с малыми токами утечки. Резистор R5 определяет скорость перезаряда C5 и, следовательно, быстродействие схемы. Буферный усилитель выполнен на операционном усилителе У3 с полевыми транзисторами на входе для уменьшения входных токов. Принятые меры по уменьшению токов разряда C5 дают возможность довести изменение напряжения на запоминающем элементе до уровня шумов. Окончательно можно написать выражение для выходного сигнала

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_0}{R_8 + R_9} \frac{1}{R_1 C_2} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (2)$$

Схема формирователя, показанная условно, содержит два импульсных элемента: ждущий мультивибратор ЖМ и триггер Т. Формирователь управляется двухполярными синхрои импульсами, частота которых равна чистоте модуляции потока. Ждущий мультивибратор ЖМ запускается отрицательными импульсами. Триггер Т перекидывается в нулевое состояние положительными синхрои импульсами и возвращается в единичное — задним фронтом импульса ЖМ.

В заключение можно сделать следующие выводы. Использование синхронного детектора с интегрированием сигнала на входе позволяет быстро и точно измерять сигнал в области низких и инфранизких частот на фоне сильных импульсных и регулярных помех аддитивного характера.

Действие импульсной и регулярной помехи как во время интегрирования, так и во время строб-импульса мало изменяет значение выходного напряжения интегратора в конце времени интегрирования. Синхронный детектор эффективного значения имеет высокую точность и помехоустойчивость при быстродействии не хуже  $T/2$  (где  $T$  — период сигнала), что важно при низких и инфранизких частотах сигнала, характерных для оптико-акустических газоанализаторов.

При быстродействии, равном  $T/2$ , можно измерить эффективное значение переменного напряжения с погрешностью не хуже 0,1 % при пульсации выходного напряжения 0,1 %, при этом наблюдается высокая помехозащищенность.

При частоте сигнала 5 Гц и наложении на него шума от шумового генератора в полосе 20 Гц—20 кГц при соотношении сигнал/шум, равном 1/1, на входе синхронного детектора получается соотношение сигнал/шум, равное 200/1, на его выходе при высоком быстродействии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 657581 (СССР). Синхронный детектор /В. А. Трубадунов, В. А. Соколов, В. Н. Будаев. Заявл. 07.07.76, № 2382108/18-09(22). — Булл. изобр., 1979, № 14, с. 241.
2. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы. — М.: Сов. радио, 1979.

## СОДЕРЖАНИЕ

В. И. Красов. Принципы автоматического регулирования качества воздушного бассейна города	3
А. Д. Зив. Оценка влияния направления ветра на загрязнение атмосферы сернистым газом по данным эксплуатации АСКЗВ	9
А. М. Бунакова, В. И. Красов. О возможности использования интегральных актиметрических методов в комплексных исследованиях загрязнения приземных слоев атмосферы	14
А. В. Примак. К оптимизации технико-экономических критериев выбора средств сбора и обработки данных о загрязнении воздуха в автоматизированных системах	20
А. И. Никушкин. Прикладные аспекты метрологии газоаналитических измерений и теория информации	26
В. И. Ануфриев. Временная дискретизация и осреднение параметров загрязнения воздуха в автоматизированных системах контроля	34
В. А. Цветков, В. И. Красов. Информационный анализ абсорбционных газоанализаторов	40
К. В. Иванченко, В. И. Красов, С. Н. Хворостовский, В. А. Цветков. Методы повышения чувствительности и избирательности спектральных абсорбционных газоанализаторов	48
М. С. Алейников, Н. М. Галимулин, В. И. Красов, Е. М. Яковлева. О применении ультразвука для повышения чувствительности спектрофотометрических газоанализаторов	57
Е. А. Королева, Л. Э. Хворостовская, С. Н. Хворостовский, В. А. Цветков. Исследование резонансного излучения колебательных полос молекул СО и СО <sub>2</sub>	62
В. И. Красов, В. Б. Миляев, И. С. Яновский. Использование фотоионизационного метода для контроля аммиака	69
В. В. Стефаняк, И. Л. Михеева, В. Б. Миляев. Основы флуоресцентного метода анализа сернистого газа в атмосферном воздухе	74
В. И. Красов, Е. А. Горина. Анализ пространственно-временных характеристик поля загрязнения атмосферы города сернистым ангидридом и окисью углерода по данным измерений автоматических газоанализаторов	82
В. И. Красов, А. Д. Зив. Оценка моделей загрязнения атмосферы сернистым газом по информации АСКЗВ	89
В. И. Козинцев, В. Д. Куксинский, А. Ф. Сильницкий. Применение абсорбционного лазерного метода для трассового контроля транспортных выбросов	93
М. И. Луиёв. Полупроводниковый датчик атмосферного давления	98
В. С. Александров, И. В. Арефьева, В. П. Котов, В. Б. Миляев, В. Н. Новиков. Поверхностные процессы в полупроводниковых кондуктометрических детекторах горючих газов	102
В. С. Чашин. Голографический метод анализа спектрограмм	106
В. В. Михайлов. Перспективы использования промышленных лазеров в приборах контроля загрязнения атмосферы	110

✓ Е. Г. Тохтуев, В. П. Пашинский, А. И. Разливанов, В. В. Михайлов. Выбор оптимальных параметров лазерного образцового газоанализатора . . . . .	116
✓ Г. А. Морозов, Н. И. Струков, К. В. Иванченко. Повышение отношения сигнал/шум в оптико-акустических газоанализаторах . . . . .	121