

Э.В. Ануфриев, В.П. Бирюлин, А.К. Коваль, В.Д. Миронов, Ю.Г. Путилов, С.И. Цыбенко

**НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ АММИАКА В ВОЗДУХЕ  
НА ХИМИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ С ПОМОЩЬЮ ТРАССОВОГО  
ЛАЗЕРНОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА «ТРАССА»**

В работе дано схематическое решение трассового лазерного газоанализатора дифференциального поглощения «Трасса». Прибор предназначен для использования в службах защиты окружающей среды, имеющихся на химических предприятиях. Систематическая погрешность определения аммиака с помощью газоанализатора не превышает 0,15 мг/м<sup>3</sup> при длине трассы 20 м, а случайная – 0,02 мг/м<sup>3</sup>.

Трассовый лазерный газоанализатор дифференциального поглощения (ЛГА ДП) «Трасса» предназначен для непрерывного определения содержания ряда газов-загрязнителей на промышленных предприятиях и в санитарных зонах.

1. В качестве источника излучения использован СО<sub>2</sub>-лазер с управляемым спектром генерации (ЛУС) с активным элементом ГЛ-502 [1]. Лазер имеет простейший селективный резонатор с автоколлимационной установкой дифракционной решетки и выводом излучения в нулевом порядке. Резонатор такого типа имеет минимальные собственные потери, что позволяет получать мощность генерации 0,9–1 Вт на основной поперечной моде. При работе в ЛГА ДП лазер настраивался на работу в двухволновом переключаемом режиме генерации на соседних линиях, выбранных так, что одна из них – измерительная – имеет резонанс поглощения с анализируемым газом, а другая – сравнительная – обладает меньшим коэффициентом поглощения и служит для учета нерезонансного ослабления света в атмосфере и оптической схеме прибора. Переключение линий осуществляется без перестройки резонатора за счет периодической модуляции длины резонатора с частотой 200 Гц. Использование для управления спектром генерации ЛУС эффектов конкуренции линий [2] и зависимости спектра генерации от длины резонатора [3] усиливает селективные свойства резонатора и позволяет применять дифракционные решетки с низкой дисперсией, что обеспечивает почти полное перекрытие пучков двух длин волн: отношение угла между пучками к полной расходимости пучка при использовании решетки 75 мм<sup>-1</sup> составляет 0,1 для линий R-ветви и 0,17 – P-ветви. Как показала длительная практика, ЛУС надежен в эксплуатации и обеспечивает высокую устойчивость спектрального состава излучения в различных условиях работы.

Сравнение с другими способами организации двухволнового потока излучения в ЛГА ДП (применение лазеров с составными резонаторами [4, 5] или резонаторов Якоби [6], использование схем ЛГА ДП с последовательной перестройкой лазера по линиям [7] или с двумя лазерами [8]) показывает, что ЛУС в двухволновом переключаемом режиме генерации существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию ЛГА.

2. Управление лазером и формирование сигнала дифференциального поглощения осуществляется блоком САУ-АПЧ, структурная схема которого приведена на рис. 1. Функции переключения двух линий и уравнивания их мощностей совмещены в системе, работающей по принципу АПЧ с пробным воздействием [9].

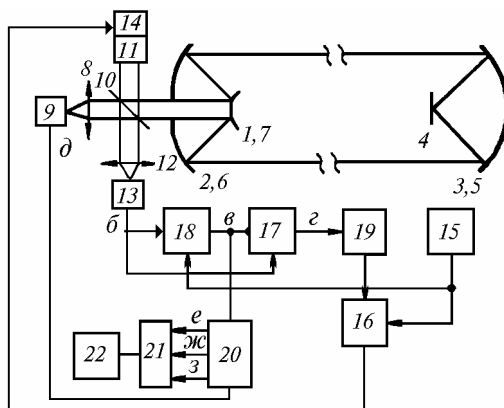


Рис. 1. Блок-схема газоанализатора «Трасса»: 1, 7 – вторичное зеркало ППТ; 2, 6 – главное зеркало ППТ; 3, 5 – главное зеркало РКГ; 4 – вторичное зеркало РКГ; 8, 12 – согласующие линзы; 9 – измерительный фотоприемник (ПМ-4); 13 – опорный фотоприемник (ПМ-4); 10 – делительная пластина; 11 – ЛУС; 14 – пьезокорректор КП-1; 15 – генератор синусоидального напряжения; 16 – высоковольтный усилитель постоянного тока; 17 – синхронный детектор; 18 – формирователь синхросигнала; 19 – интегратор; 20 – блок подготовки сигнала; 21 – измерительный усилитель УПИ-1; 22 – регистрирующий прибор КСП-4

Синусоидальный сигнал пробного воздействия с опорного генератора 15 через высоковольтный усилитель 16 подается на пьезокорректор КП-1 14, модулирующий длину резонатора с амплитудой  $\lambda/8$ . Сигнал с опорного фотоприемника (рис. 2, б), представляющий собой последовательность импульсов двух линий, поступает на синхродетектор 17 и формирователь синхросигнала 18. Последний по точкам переключения линий формирует прямоугольные синхроимпульсы разной полярности (рис. 2, в), которые перемножаются синхронным детектором с сигналом опорного фотоприемника (рис. 2, г) и преобразуются интегратором 19 в постоянный сигнал ошибки. Сигнал ошибки от усилителя постоянного тока 16 поступает на пьезокорректор КП-1 14 и изменяет длину резонатора так, что поддерживается равенство интегралов мощностей двух линий за период модуляции  $T$ .

В процессе эксплуатации из-за термической деформации конструкции лазера, старения активной среды и других причин первоначально установленное равенство мощностей генерации на двух линиях может нарушаться (рис. 2, а), и при выбранном алгоритме обработки сигнала система АПЧ обеспечивает равенство интегральных мощностей при неравных длительностях импульсов двух длин волн  $T_1 \neq T_2 (T_1 + T_2 = T)$ . Для получения адекватной информации о величине дифференциального ослабления излучения на трассе сигнал с измерительного фотоприемника 9 перед подачей на выходной измерительный усилитель УПИ-1 21 преобразовывался блоком подготовки сигнала БПС 20, в котором импульсы двух линий разделяются по каналам и осуществляется подавление каждого второго импульса. С выходов БПС на УПИ-1 поступают последовательности импульсов измерительной и сравнительной линий и синхронизирующего сигнала – меандра, следующие с периодом  $2T$  (рис. 2, е-з). В режиме измерения концентрации УПИ-1 измеряет разность сигналов измерительной и сравнительной линий  $P = P_2 - P_1$ , в режиме контроля уровня мощности – сигнал сравнительной линии  $P_2$ . Регистрация ведется на самописец КСП-4 22.

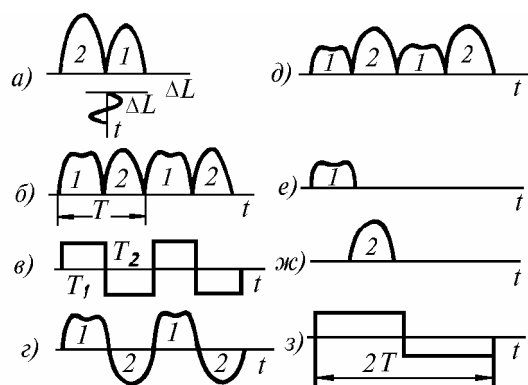


Рис. 2. Эпюры сигналов в блоке САУ-АПЧ в точках, обозначенных соответствующими буквами на рис. 1

Концентрация анализируемого газа рассчитывается по формуле

$$C = \frac{1}{2\kappa L} \ln \frac{P_2}{P_2 - P} \approx \frac{P}{2\kappa L P_2},$$

где  $\kappa = \kappa_1 - \kappa_2$  – дифференциальный коэффициент поглощения;  $L$  – длина измерительной базы.

3. ЛГА ДП «Трасса» построен по бистатической схеме с активным отражателем – ретрорефлектором типа «кошачий глаз» (РКГ) и приемопередающим телескопом (ППТ) системы Кассегрена (рис. 1). Для предотвращения экранирования центральной части пучка вторичными зеркалами и снижения зависимости результата измерения от положения пучка относительно приемных апертур, подверженного влиянию колебаний плотности атмосферного воздуха на трассе, в ППТ и РКГ использовано внеосевое расположение зеркал.

При расчете оптической схемы ЛГА ДП ставятся две задачи: минимизация габаритных размеров оптических элементов и обеспечение эквивалентности условий освещения измерительного фотоприемника (ИФП) при изменении длины измерительной базы без переюстировки оптической схемы.

Последнее важно, т.к. ноль прибора по концентрации проверяется калибровочными измерениями при различных длинах базы. В этом случае при фиксированной настройке ППТ изменяется размер светового пятна на ИФП 9, что при наличии зональной неоднородности чувствительности по площадке приемника может исказить результат калибровки. Для удобства на схеме ЛГА ДП (рис. 1) оптическим элементам при повторном прохождении через них возвращенного света присвоены вторые номера. Лазерный пучок в пространстве перед каждым элементом будем описывать эквивалентным конфокальным параметром  $R$ , размером пучка на элементе  $w$  и положением перетяжки  $z$  относительно переднего фокуса элемента;  $f'$  и  $D$  – фокусное расстояние и диаметр оптического элемента. Расчеты, проведенные при ограничениях на светосилу элемента  $D/f' > 1/4$  и диаметр  $D/2w < 2,2$ , обеспечивающих малость абберрационных искажений, энергетического обрезания на апертуре и отклоне-

ний дифракционной расходимости от расчетной [10], показывают, что при заданной предельной длине базы  $L_{\max}$  и с учетом необходимости уменьшения длины базы при калибровке минимальные габаритные размеры главных зеркал обеспечиваются при такой настройке телескопа, когда перетяжка пучка в пространстве между ППТ и РКГ находится на расстоянии  $L_{\max}$ .

Можно показать, что при изменении длины базы размер пучка на ИФП, установленном в фокусе согласующей линзы  $\delta$ , изменяется: при некоторой длине базы  $L_{\min} \omega_9(L_{\min}) = \omega_9(L_{\max})$ , а при промежуточных значениях  $\omega_9(L) < \omega_9(L_{\max})$ . Величина  $L_{\min}$  устанавливается согласованным выбором расстояния между фокусом вторичного зеркала ППТ и перетяжкой пучка, выходящего из лазера, и настройкой ППТ. Выбор  $L_{\min}$  определяется величиной изменения показаний в единицах оптических потерь ЛГА ДП на калибровочном участке, достаточной для надежного установления линейности показаний от длины. Если принять  $L_{\min} = L_{\max}/2$ , то изменение  $\omega_9$  на калибровочном участке не превысит 12%. Это реализуется при следующих параметрах ППТ: фокусное расстояние вторичного зеркала равно  $f' = -7,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{R_1(M)}$ ;  $z = -1,5R_1$ , интервал между задним фокусом вторичного зеркала и передним фокусом главного равен  $\Delta_1 = 4,18$  мм.

Зависящие от  $L_{\max}$  размеры оптической схемы ЛГА ДП (в метрах) представлены в виде таблицы.

$L_{\max}$	$f'_2$	$D_2$	$f'_3$	$D_3$
50	0,323	0,081	0,255	0,064
100	0,457	0,114	0,361	0,090
200	0,647	0,162	0,511	0,128
400	0,914	0,229	0,720	0,181

При работе ЛГА ДП на базе предельной длины параметры выходящего и возвращенного пучков в точке выхода из лазера практически одинаковы, что приводит к возникновению сильной паразитной обратной связи, влияющей на стабильность излучения лазера. Как показали эксперименты, величина модуляции мощности пропорциональна корню из величины возвращенной мощности, что подтверждает вывод работы [11] о том, что модуляция является следствием интерференции возвращенной и внутривибрационной волн. В качестве поляризационного вентиля, предотвращающего возникновение паразитной обратной связи, мы использовали ромб Френеля. Для спектральной области излучения  $\text{CO}_2$ -лазера наиболее удобным материалом для изготовления является бромистый калий, обеспечивающий преобразование плоской поляризации в практически круговую в достаточно широком диапазоне углов падения. Экспериментально показано, что применение ромба Френеля снижает влияние паразитной обратной связи ниже уровня дрейфа нулевых показаний ЛГА ДП.

Оптическая схема ЛГА ДП устойчива к изменениям положения пучка относительно входных апертур РКГ и ППТ: изменения показаний ЛГА ДП на уровне  $10^{-2}$  в единицах оптических потерь возникают при колебаниях угла падения на РКГ, равных 10 угл. мин, или одностороннем диафрагмировании пучка по любому направлению на 10% его поперечного размера.

4. С целью проверки и отработки схемно-технических решений ЛГА ДП и методики определения аммиака в воздухе в ноябре-декабре 1987 г. были проведены испытания макета ЛГА ДП «Трасса» на химическом предприятии по производству азотных удобрений. Испытания проводились в зале компрессии газообразного аммиака (размер помещения  $30 \times 12$  м). В качестве измерительной и сравнительной линий были выбраны линии  $R(8)$  и  $R(10)$  перехода  $00^\circ 1' - 10^\circ 0'$ . Выбор линий определялся наличием надежных данных по величинам коэффициентов поглощения излучения аммиаком, их зависимости от температуры, что было важно, т.к. испытания проводились при температурах воздуха в помещении  $5 - 9^\circ\text{C}$ , а также по ослаблению излучения основной мешающей компонентой — водяным паром (см. анализ данных в [12]).

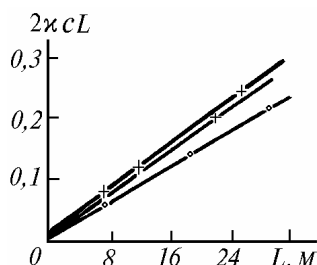


Рис. 3. Калибровка ЛГА ДП при переменной длине базы и при различной концентрации аммиака

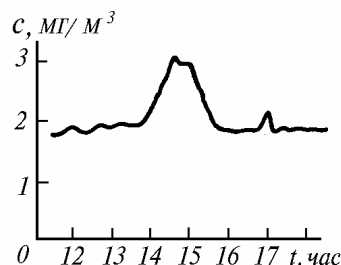


Рис. 4. Временная зависимость содержания аммиака в воздухе

Для проверки собственного нуля ЛГА ДП по измеряемым концентрациям проводились калибровочные измерения на базах переменной длины (рис. 3), которые показали, что систематическая погрешность прибора, определенная как величина  $2\chi cL$ , экстраполированная к  $L = 0$ , не превосходит

$2 \cdot 10^{-2}$ , или  $0,15 \text{ мг/м}^3$  аммиака при длине измерительной базы 20 м. Случайная погрешность определения содержания аммиака в воздухе, равная  $0,02 \text{ мг/м}^3$ , найдена из величины дрейфа нулевого сигнала с ИФП, не превосходящего  $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$  за 6 часов.

В ходе испытания проводился непрерывный контроль содержания аммиака в воздухе рабочего помещения в течение смены. Одна из временных зависимостей представлена на рис. 4.

Проведенные испытания подтвердили правильность основных схмотехнических решений макета ЛГА ДП «Трасса». Рассматриваемая компоновка трассового ЛГА ДП, основанная на использовании лазера, работающего в переключаемом двухволновом режиме, и внешней оптической схемы с согласованными приемопередающим телескопом и ретрорефлектором, обладает следующими преимуществами:

- упрощается конструкция и эксплуатация прибора;
- обеспечивается полный сбор излучения и снижается влияние состояния атмосферы на результат измерения;
- минимизируются габаритные размеры оптических элементов;
- снижается необходимая выходная мощность излучения лазера, энергопотребление прибора и обеспечиваются безопасные условия эксплуатации;
- возможно применение неохлаждаемых фотоприемников.

Приборы такого типа, позволяющие оперативно контролировать состояние воздуха в производственных помещениях и на открытых промышленных площадках, являются перспективными для применения в службах контроля состояния окружающей среды.

1. Коваль А.К., Колобашкин В.М., Миронов В.Д. // В кн.: 2 Всес. конференция «Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации». (Тез. докл.). Л.: Изд. ЛДНТП. 1984. С. 87.
2. Коваль А.К., Миронов В.Д. // В кн.: Лазерные абсорбционные методы анализа микроконцентраций газов. М.: Энергоатомиздат. 1984. С. 39–46.
3. Коваль А.К., Миронов В.Д. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. №11. С. 2324–2331.
4. Kanstad S.O., Wang G. // Appl. Opt. 1978. V. 17, №1. P. 87–90.
5. Березовский В.В., Павлова М.И., Петрищев В.А. и др. // В кн.: Газовые лазеры. М.: Энергоатомиздат. 1983. С. 70–73.
6. Якоби Ю.А. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. №3. С. 555–564.
7. Самохвалов И.В., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С. и др. // ЖПС 1980. Т. 32. №3. С. 525–533.
8. Persson U., Johansson J., Martinsson B. et al. // Appl. Opt. 1982. V. 21. №24. P. 4417–4420.
9. Герасимчук А.Г., Корнилов С.Т., Проценко Е.Д. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. №1. С. 169–171.
10. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение. 1985. 128 с.
11. Годлевский А.П., Иванов А.К., Копытин Ю.Д. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. №10. С. 2007–2012.
12. Вишератин К.Н. Исследование поглощения излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в области окна прозрачности атмосферы 8–13 мкм. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Обнинск: ИЭМ. 1984. 20 с.

Московский инженерно-физический

Поступила в редакцию 1 августа 1988 г.

E.V. Anufriev, V.P. Biryulin, A.K. Koval', V.D. Mironov, Yu.G. Putilov, S.I. Tsybenko. **Continuous Measurements of Atmospheric Ammonia at a Chemical Plant with Long-path Gas Analyser «Trassa».**

Double-beam long-path gas analyzer «Trassa» consists of the LUS type  $\text{CO}_2$ -laser with length-controlled two wave spectrum, the Cassegranian telescope, the cat's-eye retroreflector, data processing and control units. The last is based on the AFC principle and combines functions of switching and power equalization of work and reference lines. The optics arranging and parameters have been chosen to minimize calibration errors. The gas analyzer is intended to use for a chemical plant environmental control service.