



УДК. 535.34

А. С. Антонов, Г. Г. Ишанин

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Экспериментальные исследования оптико-электронного газоанализатора диоксида азота

Представлен новый газоанализатор диоксида азота, основанный на методе оптической абсорбционной спектроскопии, приведена его схема с описанием метода и принципа работы. Выполнены метрологические исследования газоанализатора, описана методика экспериментов. Приведены полученные данные экспериментов.

Диоксид азота, оптическая абсорбционная спектроскопия, газоанализатор диоксида азота

Согласно техническому регламенту о требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ, диоксид азота подлежит обязательному контролю в выбросах автотранспортных средств.

Диоксид азота (NO_2) – газ, красно-бурого цвета, с характерным острым запахом. Присутствие диоксида азота в атмосфере способствует выпадению кислотных дождей и уменьшению озонового слоя.

Диоксид азота высокотоксичен. Даже в небольших концентрациях он раздражает дыхательные пути человека, а в больших – вызывает отек легких. Диоксид азота воздействует в основном на дыхательные пути и легкие, а также вызывает изменения состава крови, в частности, уменьшает содержание в крови гемоглобина.

В связи с вышеизложенным измерение содержания NO_2 имеет важное практическое значение. Основными источниками выброса диоксида азота являются промышленные предприятия и транспорт.

На данный момент перечень используемых в России и в мире методов измерений, реализованных в виде сертифицированных автоматических приборов-газоанализаторов, используемых для измерения диоксида азота в промышленных выбросах и транспортом, обладает рядом недостатков [1], [2].

В настоящей статье описывается разработанный газоанализатор диоксида азота, принцип действия которого основан на методе оптической абсорбционной спектроскопии, обладающий высокой селективностью, чувствительностью, большим ресурсом работы (долговечностью), низким энергопотреблением, конкурентоспособностью и стоимостью, пригодный для сертификации и серийного производства.

Описание газоанализатора. Методом оптической абсорбционной спектроскопии измеряется изменение интенсивности зондирующего излучения, прошедшего через поглощающую газовую среду. Газовая среда выполняет функцию фильтра, поглощающего излучение источника с определенной длиной волны [3], [4].

Метод определения коэффициента пропускания газа основан на законе Бугера – Ламберта – Бера:

$$\tau = \Phi_{\tau} / \Phi_0 = \exp(-\sigma[C] \cdot l),$$

где Φ_0 и Φ_{τ} – поток излучения на входе и выходе оптической кюветы, в которой находится поглощающая среда (NO_2); σ – спектральный показатель поглощения (сечение поглощения) вещества, $\text{см}^2/\text{моль}$; l – длина оптического пути поглощения, см ; $[C]$ – концентрация диоксида азота в газовой смеси, $\text{моль}/\text{см}^3$.

Оптическая схема газоанализатора диоксида азота приведена на рис. 1 [5].

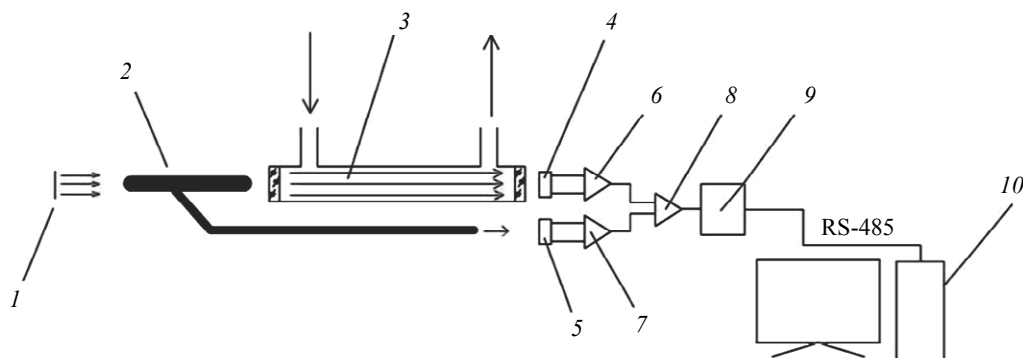


Рис. 1

Газоанализатор функционирует по следующему принципу. Исследуемый газ после прохождения системы пробоподготовки, где происходит удаление влаги и мелкодисперсных частиц, поступает в кювету 3. Излучение от источника 1 проходит через волоконно-оптический разветвитель 2, разделяющий излучение на два потока: первый поток проходит через кювету 3 и попадает на основной приемник оптического излучения 4, второй поток направляется непосредственно на опорный приемник 5. Сигналы основного и опорного приемников поступают на усилители 6 и 7 соответственно, откуда попадают на компаратор сравнения сигналов 8 (AD8476). Далее сигнал передается на контроллер с АЦП 9, связанный с компьютером 10 при помощи интерфейса RS-485.

В качестве источника применяется излучающий диод (L390-5-15), длина волны излучения которого 390 ± 2 нм, максимальный поток излучения 9 мВт.

В качестве основного и опорного приемника оптического излучения выбран фотодиод (PD-440-0/1.4), работающий в диапазоне длин волн 190...570 нм, в диодном режиме, имеющий пороговую чувствительность $\Phi_{\text{п}}^* = 1 \cdot 10^{-12}$ Вт/(Гц^{1/2} · см), с установленным сопротивлением 50 Ом. Опорный приемник оптического излучения необходим для исключения дрейфа излучения источника. Зависимость спектральной чувствительности фотодиода от длины волны показана на рис. 2.

Кювета газоанализатора выполнена из нержавеющей стали и представляет собой трубку диаметром 6.10 мм, длиной 150 мм. Измерительный тракт прибора надежно защищен от посторонних засветок.

Для экспериментальной проверки работоспособности газоанализатора были выполнены измерения NO₂ из баллонов с известной концентрацией, в ходе которых были также проверены погрешности прибора.

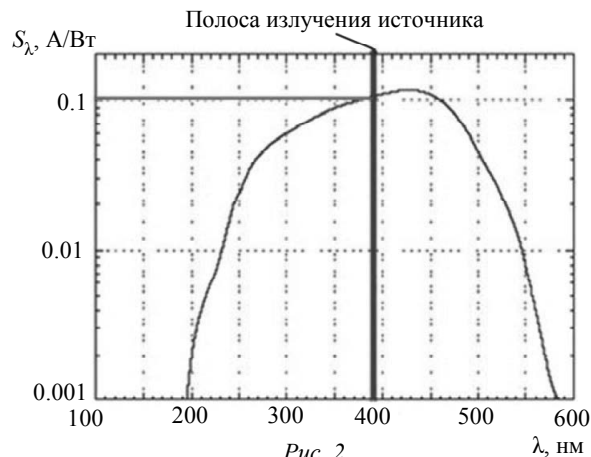


Рис. 2

Методика экспериментов. Для проведения исследований использовались баллоны с известной концентрацией NO₂ и баллон с азотом в качестве «нулевого» газа. Методика экспериментальных исследований выполняется по газовой схеме, изображенной на рис. 3.

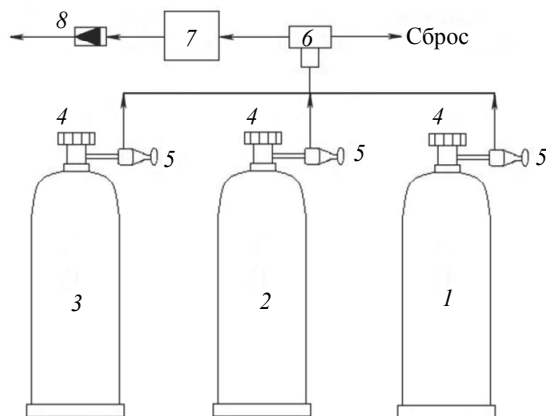


Рис. 3

Газовая смесь по очереди из нужного баллона подается через тройник 6, который служит для сброса избытка подаваемой смеси на вход исследуемого модуля 7. Расход газовой смеси контролируется с помощью ротаметра 8.

Вначале подключается баллон с «нулевым» газом (азот), устанавливается ноль на компьютере (вывод данных с исследуемого модуля выполнен

через интерфейс RS-485), после чего на место «нулевого» баллона устанавливается баллон с анализируемым газом. Результаты измерений записываются в табл. 1. Данная процедура повторяется после каждого измерения и для каждого баллона с NO₂ по очереди не менее 5 раз.

Значение объемной доли NO₂ в баллоне № 1: 51.9 млн⁻¹.

Значение объемной доли NO₂ в баллоне № 2: 104 млн⁻¹.

Значение объемной доли NO₂ в баллоне № 3: 236 млн⁻¹.

Экспериментальные результаты. Результаты измерения приведены в табл. 1 и на рис. 4 (1 – баллон № 1; 2 – баллон № 2; 3 – баллон № 3).

Таблица 1

№ п/п	Баллон № 1	Баллон № 2	Баллон № 3
	NO ₂ , млн ⁻¹		
1	52.8	104.1	236.3
2	52.9	104	236.1
3	52.9	103.8	235.8
4	53.1	103.9	235.8
5	53	104.2	236
6	52.8	104	235.9
7	52.7	103.9	236.2
8	52.9	104.1	236.1
9	53.0	104	236.2
10	53.1	103.8	235.9

Погрешность прибора включает в себя систематическую и случайную составляющие. Систематическая погрешность – составляющая погрешности,

остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях. Случайная погрешность – это составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом (по знаку или значению) при повторных измерениях.

Составляющие систематической погрешности могут быть исключены путем введения поправок или градуировки прибора (например, аддитивная погрешность исключается калибровкой прибора).

Таким образом, на результат измерения будут оказывать влияние только неисключенные систематические и случайные погрешности. Неисключенная систематическая погрешность (НСП) – это погрешность, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок или же систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена.

Если имеется несколько причин возникновения НСП, то отдельно оценивают НСП, обусловленную каждой причиной, а затем их суммируют по следующему правилу:

$$\Theta = \sum_{i=1}^N |\Theta_i|, N \leq 2;$$

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2}, N > 2,$$

где N – число составляющих НСП; k – коэффициент зависимости от выбранной доверительной вероятности P при равномерном распределении, при $P = 0.95$, $k = 1.1$.

Погрешность прибора, включающая в себя НСП и случайные составляющие, определяется из соотношения

$$\delta = \Theta \pm 3 \cdot \sigma.$$

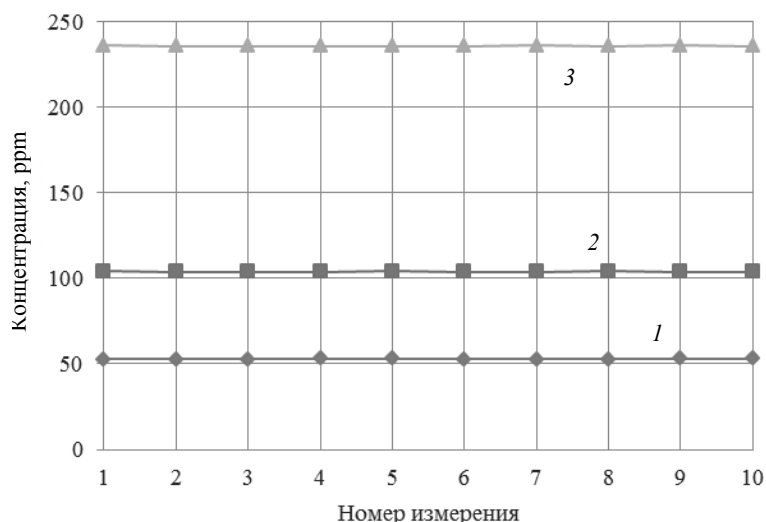


Рис. 4

Поскольку прибор предназначен для решения газоаналитических задач широкого распространения, его можно отнести к приборам средней точности – группа Б. В этом случае среднеквадратическое отклонение (СКО) результата измерения из Государственной поверочной схемы для средств измерения содержания компонентов в газовых средах будет равно: $\Theta_{\Pi} = 0.05$ [6].

Погрешность передачи размера единиц массовой концентрации компонентов газовой среды выбрана из Государственной поверочной схемы для средств измерения содержания компонентов в газовых средах: $\Theta_p = 10^{-3}$.

Погрешность, обусловленная шумами, определяется из соотношения сигнал/шум. Из равенства между отношением дисперсии сигнала к дисперсии шума и отношением соответствующих мощностей, а также учитывая, что мощность пропорциональна квадрату напряжения, можно определить погрешность, обусловленную шумами:

$$S_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{I_{\text{ш}}^2}{I_{\text{с}}^2}} = 0.005,$$

где $I_{\text{ш}}$ – ток шума; $I_{\text{с}}$ – ток сигнала.

Значения основной относительной погрешности [%] рассчитываются для каждой ПГС по формуле

$$\Delta_0 = \frac{C_{\text{изм}} - C_{\text{д}}}{C_{\text{д}}} 100,$$

где $C_{\text{изм}}$ – измеренное значение массовой концентрации определяемого компонента, млн^{-1} [%]; $C_{\text{д}}$ – действительное значение массовой концентрации определяемого компонента в ПГС, млн^{-1} [%].

Среднее арифметическое значение вычисляется по формуле

$$\tilde{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где n – число результатов наблюдений; X_i – i -й результат наблюдения.

Оценка СКО результата наблюдений определяется формулой

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}.$$

Оценка СКО результата измерения определяется формулой

$$S(\tilde{X}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Отсюда можно вычислить погрешности прибора. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Погрешность	Баллон № 1 (51.9 млн^{-1})	Баллон № 2 (104 млн^{-1})	Баллон № 3 (236 млн^{-1})
	$\text{NO}_2, \text{млн}^{-1}$		
Основная относительная, %	–0.19	0.10	0.13
	0.00	0.00	0.04
	0.00	–0.19	–0.08
	0.38	–0.10	–0.08
	0.19	0.19	0.00
	–0.19	0.00	–0.04
	–0.38	–0.10	0.08
	0.00	0.10	0.04
	0.19	0.00	0.08
	0.38	–0.19	–0.04
СКО результата наблюдений	0.131656	0.131656	0.176698
СКО результата измерения	0.041633	0.041633	0.055877

Для полной ясности необходимо еще провести ряд экспериментов для вычисления влияния температуры и давления на показания газоанализатора, исследовать влияние неизмеряемых компонентов. Однако представленные результаты показывают, что данный газоанализатор обладает относительно небольшой погрешностью (не более 4 %) и высокой повторяемостью результатов. Следовательно, можно сделать вывод, что данный газоанализатор пригоден для контроля выбросов автотранспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишанин Г. Г., Антонов А. С. Обзор основных методов определения двуоксида азота в выбросах автотранспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 4 (43). С. 125–129.

2. Ишанин Г. Г., Антонов А. С. Анализ основных методов определения двуоксида азота в выбросах автотранспорта // Вестн. Черкасского гос. технол. ун-та. 2014. № 1. С. 67–73.

3. Агафонов И. Л., Аманназаров А., Бескова Г. С. Методы анализа неорганических газов / под ред. В. М. Немца. СПб.: Химия, 1993. 560 с.

4. Алов Н. В. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. Т. 2 / под ред. А. А. Ищенко. СПб.: Академия, 2010. 416 с.

5. Ишанин Г. Г., Антонов А. С. Оптико-электронный газоанализатор для контроля диоксида азота // Приборостроение. 2014. № 1. С. 61–64.

6. ГОСТ 8.578–2002. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. М.: Изд-во стандартов, 2002.

A. S. Antonov, G. G. Ishanin

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

EXPERIMENTAL STUDIES OF OPTOELECTRONIC NITROGEN DIOXIDE GAS ANALYZER

This article about a new nitrogen dioxide gas analyzer based on the method of optical absorption spectroscopy, it is shown a diagram describing the method and principle of operation. Performed metrological research analyzer is described experimental method. The obtained experimental data are shown.

Nitrogen dioxide, optical absorption spectroscopy, nitrogen dioxide gas analyzer

УДК 621.396.677

А. А. Головков, Е. Н. Теплухин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

М. М. Григоров

ООО «Транстроника»

Электрические характеристики микрополосковой линии, имеющей подложку с пьедесталом

Найдены аппроксимирующие зависимости для волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости микрополосковых линий, имеющих подложку с пьедесталом. Полученные соотношения могут использоваться для создания моделей отрезков подобных линий передачи, используемых в пакетах программ проектирования СВЧ-устройств.

Микрополосковая линия, подложка с пьедесталом, электрические параметры

В диапазоне частот 0.4...4 ГГц при мелкосерийном производстве СВЧ-печатных плат на основе органических диэлектриков широко используются фрезерно-сверлильные станки, например «Promat».

При формировании топологии проводников СВЧ-схем кроме фольги фрезой частично снимается диэлектрик подложки. В результате микрополосковые линии (МПЛ) имеют подложку с пьедесталом, на котором располагается проводник микрополосковой линии (см. рис. 1). Аналогичная ситуация возникает при формировании топологии проводников на тонких керамических подложках лазерными маркерами. В этом случае ис-

пользуется толсто пленочная технология нанесения металла на стороны подложки с дальнейшим формированием топологии схемы лазерным лучом, при котором происходит плавление и удаление металла вне проводников схемы. При этом, как правило, материал подложки, имеющий меньшую теплопроводность, испаряется даже интенсивнее, чем материал проводника.

Изменение конфигурации поперечного сечения МПЛ приводит к изменению основных электрических характеристик: увеличению волнового сопротивления на величину Δr и уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости на величину $\Delta \epsilon_{эф}$ по сравнению с классической