

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.521

**Л.Э. Хворостовская, И.Ю. Потехин, Ж.В. Погребнякова,
С.Н. Хворостовский, И.П. Макаrenchенко, Е.В. Логинова**

ОПТИКО-АБСОРБЦИОННЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ОКИСИ АЗОТА

Рассмотрены результаты лабораторных и натуральных испытаний экспериментального образца оптико-абсорбционного измерителя окиси азота. Описаны конструктивные особенности прибора с селективным газоразрядным излучателем, входившего в состав аэростатного комплекса. Приведены измерения концентраций антропогенное создававшейся окиси азота в стратосфере.

Концентрации загрязняющих компонентов определяются в атмосфере в присутствии значительного количества других газообразных компонентов, оказывающих маскирующее действие. В связи с этим перспективным является создание оптико-абсорбционного газоанализатора (ГА) с резонансным селективным источником излучения, частотная характеристика которого полностью совпадает с частотной характеристикой полосы поглощения исследуемого вещества. В этом случае вероятность совпадения частот отдельных вращательных линий в колебательной полосе излучения и частоты линий тонкой структуры фоновых компонентов не превышает нескольких процентов. Показано [1, 2, 3], что замена в оптико-абсорбционных ГА, работающих в ИК-области спектра, теплового разогреваемого электрическим током излучательного элемента на резонансный селективный газоразрядный излучатель улучшает такие характеристики прибора, как чувствительность и селективность, на два порядка.

Использование газоразрядных резонансных селективных излучателей с полым катодом дает возможность отказаться от сложных диспергирующих оптических систем и систем охлаждения, уменьшает габаритные размеры прибора, упрощает его принципиальную схему и обеспечивает многокомпонентность ГА. В [3, 4] исследованы оптические характеристики импульсного газоразрядного излучателя с полым катодом в колебательной полосе окиси азота с максимумом на длине волны 5,25 мкм и получен оптимальный режим эксплуатации отпаянного источника излучения. Величина интенсивности излучения в исследуемой полосе для отпаянного источника стабильна в пределах точности измерений в течение нескольких месяцев. Наружная поверхность излучателя в процессе работы в оптимальном режиме сохраняет температуру, практически равную температуре окружающей среды.

В данной статье экспериментально исследована возможность применения разрабатываемой модификации газоразрядного излучателя в составе оптико-абсорбционного измерителя концентраций окиси азота в полетных условиях на аэростатной платформе. Представлены результаты предварительных испытаний экспериментального образца измерителя и результаты измерений концентраций антропогенно создаваемой окиси азота в стратосфере.

Влияние изменения температуры окружающей среды на режим работы экспериментального образца измерителя концентрации окиси азота исследовано с помощью термокамеры <Figea> при непрерывном контроле стабильности выходного сигнала и разрядного тока излучателя. Температурный режим испытаний измерителя включал следующие стадии:

- 1) снижение температуры в термокамере от комнатной до минимальной (-60°C) в течение 2,5 ч;
- 2) поддержание минимальной температуры в течение 1 ч;
- 3) повышение температуры до первоначального значения в течение 2,5 ч в открытой термокамере.

В результате эксперимента было установлено, что при понижении температуры в термокамере до -30°C интенсивность излучения в полосе 5,25 мкм, регистрируемая пироприемником, имеет постоянную величину. При охлаждении от -30 до -60°C наблюдались изменения в пределах 10% от исходной интенсивности излучения, вызванные колебаниями разрядного тока, амплитудой 2 мА, что было, вероятно, обусловлено скачкообразным характером изменения температуры в термокамере. В

процессе работы при постоянной температуре минус 60°C электрические и оптические параметры излучателя быстро стабилизировались.

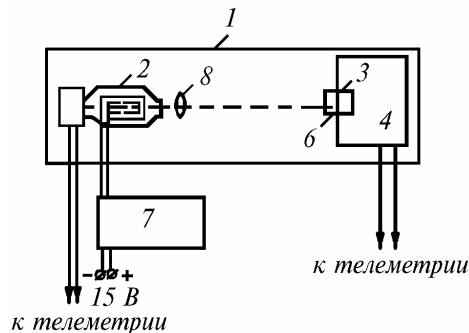


Рис. 1. Блок-схема экспериментального образца газоанализатора: 1 – корпус измерителя; 2 – излучатель; 3 – пироприемник; 4 – усилитель; 5 – блок контроля нулевого уровня сигнала; 6 – интерференционный фильтр; 7 – источник питания излучателя; 8 – линза

Схема измерителя (рис. 1) представляет собой оптическую систему с аксиальной геометрией, размещенную в цилиндрическом дюралевом корпусе длиной 70 см и диаметром 10 см с продольной перфорацией. Газоразрядный излучатель представлял собой разрядную трубку с коаксиальными электродами и симметрично расположенными оптическими окнами. Напряжение питания поступало на излучатель с генератора прямоугольных импульсов типа меандр с частотой 100 Гц и амплитудой 800 В. В процессе испытаний питание генератора осуществлялось от бортового источника напряжения 15 В. Генератор размещался в герметичном отсеке аэростатной платформы. Рабочий ток излучателя составлял 10 мА. Поток ИК-излучения, имитируемый газоразрядным излучателем, проходил через столб анализируемого газа, поступавшего путем свободной циркуляции окружающего атмосферного воздуха, и регистрировался пироприемником МГ-30. Длина оптического пути составляла 40 см. Фокусирующие линзы и оптические окна излучателя выполнены из флюорита. Диспергирующим элементом служит интерференционный фильтр полушириной 0,05 мкм и максимумом пропускания 45% на длине волны 5,25 мкм. Сигнал с выхода пироприемника поступал на широкополосный усилитель, собранный на одной половине двоящего малошумящего усилителя К548УН1. На другой половине микросхемы собран полосовый усилитель с максимумом усиления на частоте 100 Гц, соответствующей частоте импульсов питания газоразрядного излучателя. Полосовой усилитель был собран по схеме с цепочкой Вина в цепи отрицательной обратной связи. Питание К548УН1 осуществлялось от бортового источника напряжения 15 В. С усилителя сигнал поступал на синхронный детектор, собранный на микросхеме К561КП1. Опорный сигнал, поступавший со схемы питания излучателя, подавался на преобразователь уровня опорного сигнала, который увеличивал амплитуду опорного сигнала до 12 В. Суммарный коэффициент усиления схемы регистрации составлял $2,5 \cdot 10^4$. При концентрации окиси азота в атмосфере на уровне фоновой исходный сигнал на выходе телеметрической системы регистрации составлял 4 мВ. Амплитуда шумов не превышала уровня $\pm 0,5$ мВ. Постоянная времени системы регистрации составляла 30 с. Контроль стабильности работы излучателя осуществлялся путем измерения интенсивности в полосе 5,25 мкм непосредственно с заднего оптического окна излучателя с помощью интерференционного фильтра, пироприемника МГ-30 и синхронного детектора, герметично соединенных с внешней поверхностью. Выходной сигнал составлял 130 мВ с амплитудой шумов ± 10 мВ. Общая мощность, потребляемая измерителем, не превышала в режиме запуска 10 Вт, в рабочем режиме – 7 Вт. Масса измерителя составляла 6 кг. Габаритные размеры измерителя 70×12×12 см, выносного блока питания – 20×15×10 см.

Прибор был предварительно отградуирован в лаборатории по поглощению излучения в кювете при изменении парциального давления окиси азота в кювете от 0,1 до 100 Торр. Точность измерений была не ниже 10%. Результаты кюветных измерений сравнивались с расчетами функции пропускания R измерителя, проведенными по методу <линия в линию>. Функция пропускания имеет вид [5]

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} I_j}{\sum_{j=1}^{\infty} I_{0j}} = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \nu_{0j}^3 S_j \int_0^{\infty} F(\nu) \exp(-NS_j L e^{-\omega_j^2} d\nu)}{\sum_{j=1}^{\infty} \nu_{0j}^3 S_j}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_j = \int_0^{\infty} I_j(\nu) d\nu \\ I_{0j} = \int_0^{\infty} I_{0j}(\nu) d\nu \end{cases}, \quad \omega = 2\sqrt{\ln 2} (\nu_0 - \nu) / \Delta\nu_d,$$

где I_j и I_{0j} – мощность излучения $\langle j$ -й \rangle вращательной линии из источника излучения до и после поглощения в столбе газа; S_j – интенсивность линии [6]; $F(\nu)$ – функция пропускания интерференционного фильтра; N – концентрация молекул исследуемого газа; L – оптическая длина столба газа; $\Delta\nu_d$ – полуширина доплеровского контура; $\Delta\nu_f$ – полуширина фойгтовского контура; ν – частота излучения; ν_{0j} – центр $\langle j$ -й \rangle линии.

Выражение (1) справедливо для случая, когда вращательные линии испускания и поглощения имеют доплеровский контур (давление газа в кювете достаточно низко). Для случая, когда линии поглощения имеют смешанный контур Фойта (давление в поглощаемом газе достаточно велико), а линии испускания по-прежнему описываются функцией Доплера, функция пропускания представляется выражением

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} I_j \exp\left(-\int_0^{\infty} K_j(\nu) d\nu L\right)}{\sum_{j=1}^{\infty} I_{0j}}, \quad (2)$$

где $K_j(\nu)$ – коэффициент поглощения линии, контур которой описывается функцией Фойта: $K_j(\nu) = K_{0j} x f(a, \omega)$, где K_{0j} – коэффициент поглощения в максимуме линии с доплеровским контуром, $a = \Delta\nu_d / \Delta\nu_f$. Расчеты проводились для давлений NO от 0,1 до 1000 Торр, температур окружающей среды $T = 300$ и 223 К и толщин поглощающего слоя 0,4 и 40 см. Результаты расчетов совпали с результатами эксперимента в пределах погрешности измерений и представлены на рис. 2.

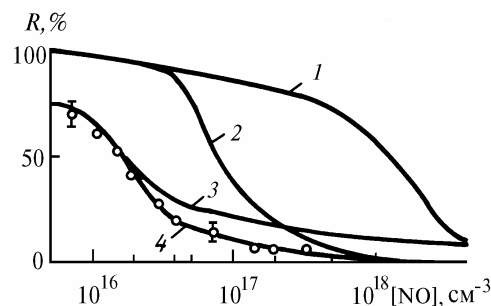


Рис. 2. Зависимость функции пропускания R окиси азота от давления в поглощающем слое; температура окружающей среды $T = 223$ К: кривая 1 – $L = 0,4$ см, доплеровская форма контура; 2 – $L = 0,4$ см, фойгтовская форма контура; 3 – $L = 40$ см, доплеровская форма контура; 4 – $L = 40$ см, фойгтовская форма контура; кружки – эксперимент

Натурные испытания экспериментального образца газоанализатора NO на аэростатной платформе проводились в августе в районе г. Рыльска в ночное время на высотах 15–17 км во время спуска аэростатного комплекса со скоростью 5,5 км/ч при температуре окружающей среды 50°C. В процессе испытаний моделировалось увеличение концентрации NO в окружающем пространстве путем инъекции газообразной окиси азота в заданные моменты времени. Продолжительность каждой инъекции из баллона составляла 5 с. Начальное и конечное давления окиси азота в баллоне фиксировались (таблица). Газ поступал в рабочий объем измерителя через перфорацию в корпусе.

Аэростатная платформа представляла собой открытый металлический каркас, на котором крепились датчики измерительной аппаратуры, в том числе испытываемый газоанализатор. В центре каркаса крепился герметический отсек для размещения источников питания и схем регистрации.

Зафиксированные измерителем средние по оптическому пути количества окиси азота после инъекции представлены в таблице.

№ инъекции	Высота полета, км	Время начала инъекции, с	$P_{\text{нач.}}$ в баллоне, Торр	$P_{\text{кон.}}$ в баллоне, Торр	Сигнал в основном канале (40 см), мВ	Сигнал во 2-м канале (0,4 см), мВ	Средняя концентрация NO по основному каналу $\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$	Средняя концентрация NO по 2-му каналу $\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
0	0,0	00	—	—	4,0	108,0	0,0	0,0
1	16,98	6880	1000	536	0,4	94,0	7,4	5,2
2	16,75	7220	536	423	1,6	100,0	2,2	2,5
3	16,21	7560	423	255	1,8	101,0	1,9	2,2
4	15,20	8220	255	220	3,0	105,0	0,5	0,65

Поскольку постоянная времени системы регистрации (30 с) превышала время инъекции (5 с), то эти цифры должны быть меньше пиковых значений концентраций в момент выпуска газа, так как газ быстро диффундировал в воздухе. Для оценки максимальной концентрации NO, которая могла быть зафиксирована измерителем после инъекции, положим, что p_1 – разница между давлением газа в баллоне объемом $V_1 = 2 \text{ дм}^3$ до начала и после прекращения инъекции NO, p_2 – атмосферное давление на текущей высоте полета. Тогда инжектированный газ, адиабатически расширяясь, займет объем $V_2 = V_1(p_1/p_2)^{1/\gamma}$, где γ – адиабатический коэффициент.

Оценки показывают, что по окончании напуска инжектированный газ будет представлять собой шарообразное облако объемом $V_2 = 20\text{--}200 \text{ дм}^3$ в зависимости от высоты полета и номера инъекции. Этим объемам соответствует концентрация NO порядка 10^{18} см^{-3} , которая с момента инъекции уменьшается по закону диффузии. Телеметрическая система регистрировала максимальные значения концентраций через 15 с после начала инъекции. За это время вследствие диффузии происходит уменьшение концентрации NO в облаке в 10–15 раз, т.е. до величины порядка $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с результатами измерений (таблица).

Второй канал измерителя предполагалось использовать для проверки стабильности работы излучателя в процессе полета, однако четкая релаксация системы к исходному уровню сигнала между инъекциями NO практически исключила необходимость дополнительного контроля стабильности работы газоразрядного излучателя. В процессе испытаний произошел отрыв системы регистрации второго канала от контрольного оптического окна излучателя. Конструктивно смещение этой системы было возможно только вдоль оптической оси. Указанное смещение от оптического окна составило 0,4 см. Окружающий воздух свободно попадал в зазор, и второй канал стал выполнять ту же роль, что и основной измерительный, но с другой длиной оптического пути. Вследствие увеличения расстояния между излучателем и пироприемником уровень исходного сигнала уменьшился до 108 мВ. Экспериментальная градуировка для этого случая не проводилась, теоретические расчеты пропускания приведены на рис. 1. Результаты измерений концентраций (см. таблицу) близки к результатам измерений в основном канале в пределах точности измерений. Максимальная ошибка измерений концентраций составила в основном канале – 50, во втором – 25%.

Таким образом, полетные испытания экспериментального образца измерителя окиси азота на аэростатной платформе показали, что и научная, и конструктивная основы измерителя NO перспективны для дальнейших исследований и разработок, которые должны вестись в направлении увеличения точности измерений за счет улучшения элементарной базы измерителя и снижения инерционности регистрирующей системы. Испытания также показали, что большой оптический путь, обуславливающий габаритные размеры прибора, не является необходимым условием для измерений концентраций антропогенно создаваемой окиси азота.

1. Дубашинская И.В., Хворостовская Л.Э., Хворостовский С.Н. // ПТЭ. 1984. Т. 3. С. 174.

2. Хворостовская Л.Э., Цветков В.А., Утяшев А.И. // Труды ГГО. Л.: Гидрометеозидат, 1987. Вып. 492. С. 82.

3. Хворостовская Л.Э., Потехин И.Ю., Хворостовский С.Н. Фотохимические процессы земной атмосферы. М.: Наука, 1990. С. 194.

4. Хворостовская Л. Э., Потехин И. Ю., Погребнякова Ж. В., Хворостовский С. Н. // ЖПС. 1990. Т. 53. С. 711.
5. Потехин И. Ю., Утяшев А. И., Хворостовская Л. Э. ЖПС. 1989. Т. 50. С. 728.
6. Rothman Z. S. et al. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N. 19. P. 4058.

Санкт-Петербургский госуниверситет,
НИИ Физики

Поступила в редакцию
28 мая 1993 г.

L.E. Khvorostovskaya, I.Yu. Potekhin, Zh.V. Pogrebnyakova, S.N. Khvorostovskii,
I.P. Makarchenko, E.V. Loginova. **An Optical Absorption Detector of Nitric Oxide.**

Some results of laboratory and field tests of an experimental sample of optical absorption detector of the nitric oxide are presented. Some features of the instrument with a selectively emitting gas discharge light source are described in relation to its use in a balloonborne measuring complex. Measurement results on the content of nitric oxide of anthropogenic origin in the stratosphere are also presented in the paper.