

А.А. Азбукин, М.А. Булдаков, Б.В. Королев, В.А. Корольков, И.И. Матросов

Оптические газоанализаторы серии «ДОГ»

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 12.11.2001 г.

Разработаны стационарные газоанализаторы для непрерывного измерения содержания окислов азота и серы в дымовых газах теплоэлектростанций, сжигающих природный газ, уголь и мазут. Работа газоанализаторов основана на использовании метода дифференциального поглощения в УФ-области спектра без применения лазерных источников света. Эксплуатация газоанализаторов на российских теплоэлектростанциях показала их высокую чувствительность, надежность и простоту обслуживания при невысокой стоимости по сравнению с зарубежными приборами аналогичного класса.

Возрастающая роль антропогенных факторов в современных глобальных и региональных природноклиматических изменениях в определяющей мере связана с увеличением масштабов загрязнения окружающей среды. К числу основных загрязняющих атмосферу веществ техногенного происхождения относятся оксиды азота и серы, поступающие в атмосферу в результате сжигания органического топлива, причем их количество и состав в значительной степени зависят от вида топлива и режима его сжигания. Так, при сжигании природного газа оксиды серы в дымовых газах практически отсутствуют, зато они появляются в значительных количествах при сжигании таких серосодержащих видов топлива, как уголь и мазут.

В настоящее время наиболее крупные объемы топлива сжигаются на теплоэлектростанциях (ТЭС), которые и являются основными поставщиками оксидов азота и серы в атмосферу. Контроль за объемами выбросов оксидов и их уменьшение – основные задачи природоохранной деятельности в теплоэнергетике, для решения которых применяются как портативные многокомпонентные газоанализаторы, так и стационарные автоматические газоанализаторы непрерывного действия. Первые используются для пусконаладочных работ на ТЭС и экспресс-анализа дымовых газов службами экологического контроля, а вторые – для оптимизации процесса сжигания топлива и организации объективного и непрерывного экологического контроля за реальными объемами выбросов оксидов в атмосферу. Газоанализаторы именно второго типа являются наиболее перспективными для мониторинга загрязняющих выбросов и поэтому представляют особый интерес для технического перевооружения действующих и вновь создаваемых ТЭС.

В лаборатории экологического приборостроения Института оптического мониторинга СО РАН разработан ряд стационарных автоматических газоанализаторов оксидов азота и серы в дымовых газах ТЭС [1, 2]. Газоанализатор «ДОГ-1» предназначен для измерения содержания окиси азота (NO) в дымовых газах ТЭС,

сжигающих природный газ, газоанализатор «ДОГ-2» – для измерения двуокиси серы (SO₂) для ТЭС, сжигающих уголь и мазут, и газоанализатор «ДОГ-3» – для одновременного измерения как окиси азота, так и двуокиси серы для ТЭС, работающих на любом виде органического топлива. Все эти оптические газоанализаторы используют один принцип действия, конструктивно схожи (рис. 1) и различаются только используемыми областями оптического спектра, алгоритмами работы и способами обработки сигналов.

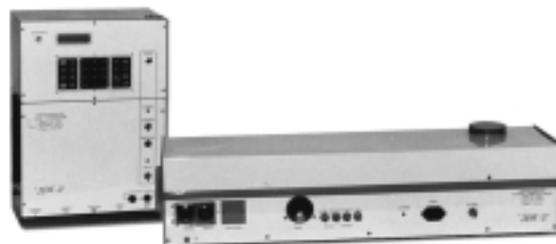


Рис. 1. Внешний вид газоанализаторов «ДОГ»

Работа оптических газоанализаторов «ДОГ» базируется на использовании метода дифференциального поглощения, представляющего собой сравнение оптических потоков, прошедших через кювету с исследуемой газовой средой, в нескольких специально выбранных участках спектра, которые характеризуются существенно различающимися между собой коэффициентами поглощения контролируемых газов. Количество участков спектра, в которых проводится измерение коэффициентов поглощения, определяется числом поглощающих компонентов исследуемой газовой среды и составляет не менее двух для среды с одним поглощающим компонентом и не менее трех для среды с двумя поглощающими компонентами. Технически контроль дифференциального поглощения в газоанализаторах «ДОГ» реализован с помощью источника непрерывного УФ-излучения и интерференционного светофильтра, выделяющего из спектра

излучения источника участки спектра, размер которых задается полушириной полосы пропускания светофильтра. Сдвиг полосы пропускания светофильтра осуществляется путем поворота его шаговым двигателем на заданный угол. Такой способ перестройки позволяет смещать полосу пропускания светофильтра на несколько полуширин в коротковолновую сторону.

В газоанализаторах «ДОГ» для контроля дифференциального поглощения выбран диапазон спектра 219–235 нм. Выбор этого участка спектра обусловлен тем, что из основных компонентов дымового газа здесь располагаются полосы поглощения только молекул NO, NO₂ и SO₂. Поскольку содержание диоксида азота (NO₂) в дымовых газах не превышает 5% от суммы оксидов азота [3], то измерение NO₂ может не проводиться, а его незначительное присутствие в дымовых газах не оказывает существенного влияния на точность определения концентраций окиси азота и двуокиси серы. Коэффициенты поглощения окиси азота и двуокиси серы [4] в спектральном диапазоне 219–235 нм приведены на рис. 2, на котором видно, что в данном диапазоне спектра окись азота имеет хорошо

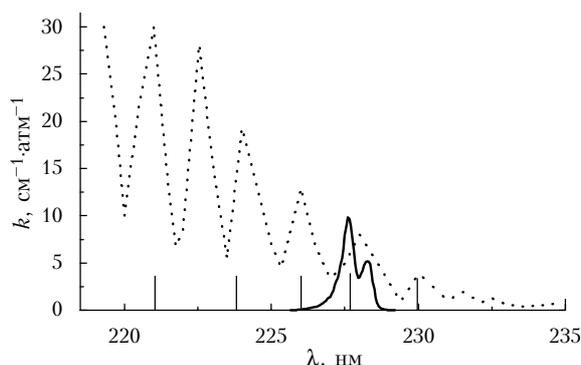


Рис. 2. Коэффициенты поглощения молекул NO и SO₂ в области 219–235 нм: сплошная линия — NO, пунктирная линия — SO₂. Вертикальными линиями показаны выбранные для газоанализа положения максимумов пропускания светофильтра

локализованную полосу поглощения с полушириной ~ 1,5 нм, а полоса поглощения двуокиси серы имеет сложную структуру, перекрывающую весь рабочий диапазон спектра. В этих условиях выбор участков спектра для проведения газоанализа определяется структурой полос поглощения NO и SO₂, а также диапазоном перестройки светофильтра. Так, для контроля дифференциального поглощения в газоанализаторе «ДОГ-1» использованы участки спектра с центрами 227,6 и 230 нм, в газоанализаторе «ДОГ-2» — 221 и 223,5 нм, а в газоанализаторе «ДОГ-3» — 226, 227,6 и 230 нм (см. рис. 2).

Конструктивно газоанализаторы «ДОГ» состоят из двух блоков: измерительной головки и блока управления. Измерительная головка включает газоразрядную дейтериевую лампу ЛД2(Д), термостатированную кювету с патрубками для ввода и вывода дымового газа, интерференционный светофильтр (полуширина полосы пропускания ~ 1,5 нм и пропускание

в максимуме порядка 15%) и фотоэлемент Ф-29. Блок управления представляет собой разработанную нами микропроцессорную систему на основе Z80 («ДОГ-1» и «ДОГ-2») и ATmega103 («ДОГ-3»). Связь оператора с системой осуществляется с помощью встроенного в блок управления клавишного пульта и ЖК-дисплея РС1602. В блоке управления также размещены источники питания лампы, фотоэлемента и шагового двигателя.

Поскольку алгоритмы работы и способы обработки сигналов однокомпонентных газоанализаторов «ДОГ-1» и «ДОГ-2» идентичны, работу этих газоанализаторов проследим на примере газоанализатора «ДОГ-1» [5]. При запуске газоанализатора управляющая программа включает дейтериевую лампу, излучение которой направляется в кювету с дымовым газом, и затем поворотом светофильтра проводит его спектральную привязку. После этого начинает обрабатываться циклический алгоритм управляющей программы. Прежде всего, светофильтр настраивается на пропускание участка спектра с центром на 230 нм и измеряется сигнал фотоэлемента I_1 . Затем светофильтр настраивается на пропускание участка спектра с центром на 227,6 нм и регистрируется сигнал фотоэлемента I_2 . На основании полученных значений I_1 и I_2 процессор выполняет расчет концентрации молекул NO в дымовом газе по формуле

$$N_{\text{NO}} = a_1 + a_2(I_2/I_1) + a_3(I_2/I_1)^2 + a_4(I_2/I_1)^3, \quad (1)$$

где коэффициенты a_i находятся при калибровке газоанализатора, которая заключается в измерении значений I_1 и I_2 при различных эталонных концентрациях окиси азота в кювете и последующем определении коэффициентов a_i методом наименьших квадратов. Полученные значения концентрации окиси азота выводятся на экран дисплея, расположенный на лицевой панели блока управления, и подаются в виде стандартных токовых сигналов 0–5 мА на внешний самописец. В штатном режиме работы газоанализатор производит измерения концентрации окиси азота автоматически с интервалом 5 с.

Работа газоанализатора «ДОГ-3» отличается тем, что циклический алгоритм управляющей программы включает в себя измерения трех сигналов фотоэлемента I_1 , I_2 и I_3 в спектральных диапазонах с центрами соответственно 230, 227,6 и 226 нм [6]. Расчет концентраций молекул окиси азота N_{NO} и двуокиси серы N_{SO_2} в данном случае производится путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} I_2/I_1 &= b_1 + b_2 N_{\text{NO}} + b_3 N_{\text{SO}_2} + b_4 N_{\text{NO}}^2 + \\ &+ b_5 N_{\text{SO}_2}^2 + b_6 N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2}, \\ I_3/I_1 &= c_1 + c_2 N_{\text{NO}} + c_3 N_{\text{SO}_2} + c_4 N_{\text{NO}}^2 + \\ &+ c_5 N_{\text{SO}_2}^2 + c_6 N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где численные значения коэффициентов b_i и c_i также находятся при калибровке газоанализатора. Решение

приведенной системы уравнений производится итерационным способом, в качестве «нулевого» приближения в котором используются значения N_{NO}^0 и $N_{\text{SO}_2}^0$, являющиеся решением упрощенной системы уравнений:

$$I_2/I_1 = a_1 + a_2 N_{\text{NO}}^0 + a_3 N_{\text{SO}_2}^0,$$

$$I_3/I_1 = b_1 + b_2 N_{\text{NO}}^0 + b_3 N_{\text{SO}_2}^0. \quad (3)$$

Этот итерационный алгоритм обеспечивает однозначный расчет концентраций окиси азота N_{NO} и двуокиси серы N_{SO_2} с точностью до 1 мг/м^3 уже после двух итераций.

Технические характеристики разработанных газоанализаторов приведены в таблице. По своим техническим характеристикам газоанализаторы «ДОГ» не уступают зарубежным приборам аналогичного класса, но при этом их стоимость значительно ниже.

Основные технические характеристики газоанализаторов «ДОГ»

Техническая характеристика	«ДОГ-1»	«ДОГ-2»	«ДОГ-3»
Измеряемый компонент	NO	SO ₂	NO, SO ₂
Диапазон измеряемых концентраций молекул NO, мг/м ³	0–1000	–	0–1000
Максимальная погрешность измерения NO, %	10	–	10
Диапазон измеряемых концентраций молекул SO ₂ , мг/м ³	–	0–2500	0–2500
Максимальная погрешность измерения SO ₂ , %	–	10	10
Время одного измерения, с	5	5	10
Напряжение питания, В/Гц	220/50	220/50	220/50
Потребляемая мощность, Вт	150	150	150
Габаритные размеры, мм			
измерительная головка	870×140×200	670×140×200	870×140×200
блок управления	280×280×380	280×280×380	280×280×380
Масса, кг			
измерительная головка	15	12	15
блок управления	10	10	10
Время непрерывной работы (до замены лампы), ч	9000	9000	9000

В настоящее время до промышленной эксплуатации доведен только газоанализатор «ДОГ-1». Этот газоанализатор прошел двухлетние производственные испытания на Тюменской ТЭЦ-1 в условиях круглосуточной эксплуатации и был рекомендован к серийному производству. Газоанализатор «ДОГ-1» прошел

также государственные приемочные испытания, внесен под № 18915-99 в Госреестр средств измерений и допущен к применению в Российской Федерации [7]. Мелкосерийное производство данных газоанализаторов налажено в ИОМ СО РАН и ПК «НПП «Электрооптика» (г. Томск). В настоящему времени выпущено около 70 газоанализаторов, которые размещены на всех крупных ТЭС Тюменского региона в качестве штатного средства контроля выбросов оксидов азота в атмосферу. Газоанализаторы «ДОГ-2» и «ДОГ-3», предназначенные для котлов, работающих на серосодержащих видах топлива, пока находятся в стадии производственных испытаний.

В ходе производственных испытаний газоанализатора «ДОГ-1» на Тюменской ТЭЦ-1 были проведены измерения содержания окиси азота в дымовых газах при различных режимах сжигания природного газа [5]. На рис. 3 приведены показания газоанализатора при различных режимах сжигания топлива на одном из котлов. На графике хорошо просматриваются пять режимов работы котла, причем разброс показаний в установившихся режимах не превышает 5%. Из приведенных данных видно, что объемы выбросов в атмосферу оксидов азота в значительной степени зависят от режима сжигания топлива.

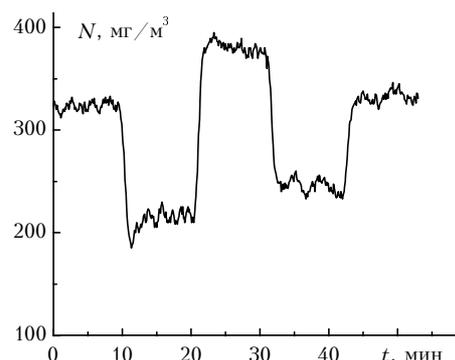


Рис. 3. Концентрация молекул NO в дымовых газах при различных режимах сжигания топлива

Экологическую и экономическую эффективность от использования газоанализаторов «ДОГ-1» можно проследить на примере Тюменской ТЭЦ-1, все котлы которой оснащены этими газоанализаторами. В настоящее время на Тюменской ТЭЦ-1 для каждого котла разработана режимная карта, отражающая показания газоанализатора при оптимальном сжигании газа для различных режимов работы котла. Такие карты позволяют оператору по показаниям газоанализаторов оперативно следить за показателями сжигания топлива и, соответственно, контролировать оптимальный режим сжигания природного газа. Одновременно такой непрерывный контроль за концентрацией окиси азота в дымовых газах обеспечивает круглосуточное наблюдение за экологическими показателями сжигания топлива и позволяет перейти от расчетного метода определения валовых выбросов оксидов азота к их фактическим значениям. Так, наличие оперативного контроля позволило снизить величину валового выброса оксидов

азота для Тюменской ТЭЦ-1 на 1500–1700 т в год (в пересчете на диоксид азота), что составляет около 30% при среднегодовом валовом выбросе ~ 5000 т [8].

Таким образом, на основе метода дифференциального поглощения в УФ-области спектра удалось создать надежные, простые в эксплуатации и относительно недорогие газоанализаторы окислов азота и серы в дымовых газах ТЭС, которые показали перспективность этого метода газоанализа для экологического приборостроения и высокую эффективность использованных конструкторских решений.

1. Пат. 2029288. Россия. МКИЗ, G01N21/61.
2. Свидетельство на полезную модель 19169. Россия. МКИЗ, G01N21/61.
3. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1977. 294 с.

4. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 500 с.
5. Булдаков М.А., Вовк С.М., Ипполитов И.И., Королев Б.В., Лобецкий В.Е., Матросов И.И. Оптические газоанализаторы УФ-диапазона для технологических газов // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 10. С. 1349–1356.
6. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И. Газоанализатор окислов азота и серы в дымовых газах теплоэлектростанций // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 4. С. 613–616.
7. Сертификат Госстандарта России об утверждении типа средств измерений RU.C.31.001.A № 7057.
8. Ипполитов И.И., Булдаков М.А., Жилицкий В.Ф., Каранкевич Е.Н., Королев Б.В., Крайнов В.В., Матросов И.И., Тигеев С.В. Опыт эксплуатации газоанализаторов «Оксид» на Тюменской ТЭЦ-1 // Теплоэнергетика. 1999. № 10. С. 56–58.

A.A. Azbukin, M.A. Buldakov, B.V. Korolev, V.A. Korolkov, I.I. Matrosov. The optical gas-analyzers of «DOG» models».

The gas-analysers for continuous monitoring of sulfur and nitrogen oxides in exhaust gases of power stations, using natural gas, coal, and fuel oil, are worked out. The gas-analyzers' based on the use of laserless UV sources and DIAL technique. The gas-analyzers' operating at the power stations of the Russian Federation have shown their high efficiency, reliability and easiness in operation at the lower cost in comparison with similar foreign devices.