

О.К. Войцеховская, А.В. Войцеховский

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ГАЗОВОГО СОСТАВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ПАССИВНЫМ ДИСТАНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Осуществлено моделирование функционирования простого газоанализатора, принцип действия которого основан на регистрации спектральной зависимости излучательных характеристик нагретых газов, являющихся продуктами различных производственных циклов. Излучательная способность газов вычисляется по методологии прямых расчетов с использованием параметров колебательно-вращательных линий излучающих газов, определяемых по методикам, разработанным авторами. Проанализировано влияние различных факторов (спектральный диапазон, температура, фоновое излучение, система регистрации) на величину принимаемого сигнала. Выбраны оптимальные характеристики анализатора на примере регистрации диоксида серы.

### Введение

В настоящее время наиболее развиты активные способы дистанционного зондирования газовых выбросов промышленных предприятий с целью измерения концентрации загрязняющих веществ в них. При этом на газовое облако воздействуют излучением лазера либо какого-то другого излучателя с последующим измерением параметров излучения, связанных с эффектами взаимодействия, например, комбинационного рассеяния или поглощения. Однако необходимость комплектования аппаратуры при таких исследованиях источником излучения с блоком питания и приборным модулем для измерения и контроля за параметрами излучения создают дополнительные трудности как в разработке и реализации элементной базы, так и в извлечении полезной информации из принимаемого сигнала.

Предлагаемый анализатор концентрации вредных газов в промышленных выбросах, основанный на регистрации собственного излучения контролируемого газа, лишен этих недостатков.

### Расчет характеристик анализатора

Предлагаемая схема переносной установки измерения концентрации вредных газов приведена на рис. 1.

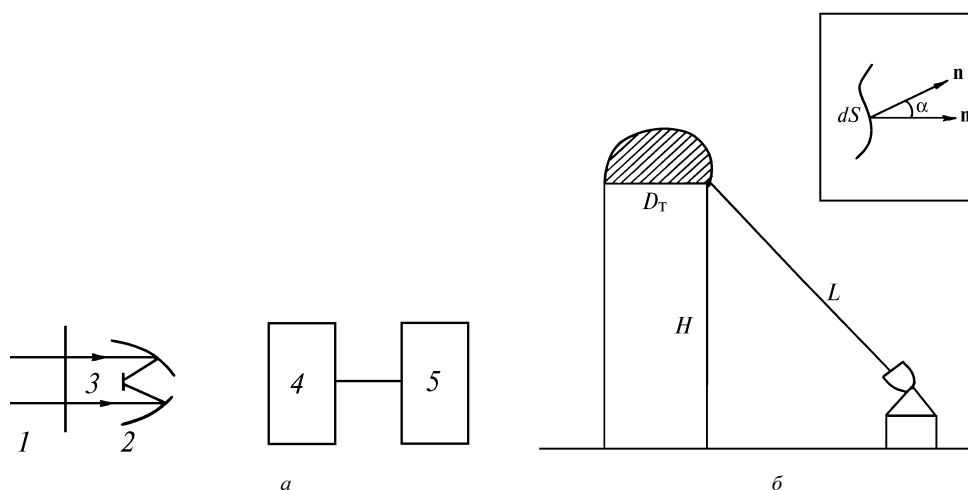


Рис. 1. Блок-схема анализатора излучения (а) и схема регистрации излучения газового облака (б): 1 – светофильтр, 2 – телескопическое приемное зеркало, 3 – фотоприемное устройство, 4 – предусилитель, 5 – блок обработки и записи сигнала,  $H$  – высота трубы,  $D_T$  – ее диаметр,  $L$  – длина трассы (фрагмент – геометрия распространения излучения газового облака)

Источником излучения является выходящее из трубы, нагретое до  $T \cong 1000^\circ\text{K}$  газовое облако. Распространяясь по всем направлениям, излучение газа попадает на регистрирующее устройство, в состав которого входят: комплект светофильтров; приемное зеркало параболического типа с отражателем (зеркало Кассегрена); фотоприемное устройство; электронный блок усиления, записи и обработки результатов измерений.

Мощность приходящего на приемное устройство излучения согласно [1] определяется как

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{ист}} \pi D_3^2 T_{\text{атм}} \eta_{\text{опт}} / 4 L^2, \quad (1)$$

где  $I_{\text{пр}}$  – мощность приходящего на приемник потока излучения;  $I_{\text{ист}}$  – мощность излучения с поверхности газового объема;  $D_3$  – диаметр зеркала приемной системы;  $\eta_{\text{опт}}$  – ослабление оптической системы (светофильтры);  $T_{\text{атм}}$  – атмосферные потери на трассе;  $L$  – длина трассы (расстояние от источника до приемника).

Из (1) следует, что, в первую очередь, необходимо найти мощность излучения газового объема, а затем оценить ослабление его в атмосфере и в оптической системе.

Расчет мощности излучения нагретого газа. При проектировании дистанционного газоанализатора принимаем, что излучающим объектом является поверхность газового облака. Излучение распространяется равномерно по всем направлениям из-за хаотического расположения молекул излучающего газа в пространстве. В направлении  $\mathbf{n}'$  (фрагмент на рис. 1) мощность излучения с площадки  $dS$  составляет

$$dI = I_0 \cos \alpha dS, \quad (2)$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения по нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности  $dS$ ;  $\alpha$  – угол между  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{n}'$ ;  $\mathbf{n}'$  – направление к приемнику излучения.

Мощность излучения с площадки  $S$  в направлении  $\mathbf{n}'$  дается интегралом по  $dS$

$$I = I_0 \int_S \cos \alpha dS = I_0 S_0, \quad (3)$$

где  $S_0$  – проекция  $S$  на плоскость, нормалью к которой является  $\mathbf{n}'$ .

В нашей схеме приемной системой является параболическое зеркало, которое из потока излучения вырезает параксиальный пучок площадью  $S_0 = \pi D_3^2 / 4$ , и очевидно, сечение этого пучка и есть  $S_0$ . Следовательно, предполагаем, что величина приходящего на приемник сигнала не зависит от конфигурации излучающей поверхности. Теперь оценим величину  $I_0$  – мощность излучения с поверхности газового объема. При этом считаем излучение диффузным и принимаем условие термодинамического равновесия (ТР) в излучающем объеме (поскольку проблема отклонения от ТР выходит за рамки данной статьи). Тогда поток, излучаемый в спектральном диапазоне  $[\nu_1, \nu_2]$  в направлении, перпендикулярном поверхности излучающего объема в единице телесного угла, равен

$$I = I_0 \int B(\nu, T) E_\nu(T) d\nu,$$

где  $B(\nu, T)$  – функция Планка [2];  $E_\nu(T)$  – излучательная способность нагретой воздушной смеси.

В приближении ТР излучательная способность газа

$$E_\nu(T) = 1 - \exp(-K_\nu(T) \rho \chi), \quad (4)$$

где  $K_\nu$  – спектральный коэффициент поглощения среды;  $\rho$  – концентрация газа;  $\chi$  – длина излучающего в направлении  $\chi$  объема газа. В наших условиях за  $\chi$  можно принять диаметр трубы, из которой происходит выброс газа.

Коэффициент поглощения должен быть рассчитан при определенной температуре газового облака, значения которой могут определяться:

1) путем измерений полного лучистого потока во всем оптическом диапазоне  $I_{\text{полн}} = \sigma T^4$ , где  $\sigma$  – постоянная Больцмана;

2) непосредственно контактным датчиком температуры;

3) принятием величины  $T$ , соответствующей технологической карте производства.

Наиболее точные значения коэффициентов поглощения достигаются проведением прямых расчетов, базирующихся на численных значениях параметров спектральных линий, соответствующих конкретному значению температуры [3]. Методика расчетов параметров колебательно-вращательных линий нагретых газов в диапазоне 300–2000°K разработана одним из авторов и апробирована на газовых продуктах сгорания [4–7].

### Прохождение излучения газового облака через атмосферу и учет паразитных подсветок

В общем случае необходимо решать полное уравнение переноса [3], однако введение допустимых упрощений (рассмотрение стационарного случая, пренебрежение рассеянным излучением, поскольку излучающий газовый объем можно считать изолированным газовым излучателем) позволяет использовать более простое выражение для интенсивности излучения:

$$I_{\nu}(L) = I_{\nu 0} \exp \left[ - \int_{L_1}^{L_2} K_{\nu}(l) dl \right], \quad (5)$$

где  $L_1, L_2$  – начальная и конечная точки трассы;  $K_{\nu}(l)$  – коэффициент поглощения атмосферой на всей длине трассы от источника до приемника. Наиболее выгодно использовать спектральные диапазоны, называемые <окнами прозрачности>, в которых влиянием атмосферы на коротких трассах можно пренебречь.

К паразитным подсветкам относятся излучение Солнца, неба и Земли [8, 9]. Излучение Солнца эквивалентно распределению излучения черного тела при  $T = 5600^{\circ}\text{K}$ ; излучение неба создается рассеянным излучением Солнца, максимум излучения которого лежит около  $\lambda = 0,5$  мкм. Излучение, обусловленное планетой Земля, дает максимум в районе 9,6 мкм. При выборе рабочего диапазона длин волн измерительной системы влияние подсветок может быть учтено. Учет последних возможен проведением измерений при углах зрения вне источника выброса и последующим вычетом <нулевого> значения энергии излучения при направленных измерениях.

### Выбор оптимальных характеристик анализатора на примере определения концентрации сернистого ангидрида

Основываясь на вышеизложенных соображениях, рассмотрим анализатор, разрабатываемый для регистрации выбросов, содержащих сернистый ангидрид, например для медеплавильных заводов.

Согласно [10] значение предельно допустимой концентрации максимального разового (м. р.) и среднесуточного (с. с.) выбросов равно:

$$\rho \text{SO}_2 \text{ м.р.} = 1,88 \cdot 10^{-7} \text{ атм}; \quad \rho \text{SO}_2 \text{ с.с.} = 1,88 \cdot 10^{-8} \text{ атм.}$$

Предельное значение диаметра трубы  $D_{\tau}$  примем равным 1000 см. Поскольку в выбранном нами спектральном диапазоне  $K_{\nu} \cong 12$  атм·см, то  $\alpha = K_{\nu} \rho \text{SO}_2 D_{\tau} \cong 2 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует толщине оптического излучающего слоя. При такой величине  $\alpha$  можно ограничиться линейным членом в разложении экспоненты в (4) и окончательно записать выражения для излучательной способности:

$$E_{\nu} = K_{\nu} \rho \text{SO}_2 D_{\tau}.$$

Тогда из результатов измерения  $E_{\nu}$  в спектральном интервале можно определить  $\rho \text{SO}_2$  непосредственным образом.

Сравнение нашего расчета с экспериментом по коэффициентам поглощения нагретого  $\text{SO}_2$  при  $T = 500^\circ\text{K}$  показывает хорошее согласие в пределах погрешности эксперимента [11] (рис. 2).

Расчет спектральной зависимости интеграла светимости подтверждает информативность выбранного нами участка спектра с центром 8,9 мкм (рис. 3), поскольку характер этой зависимости полностью обусловлен спектральной зависимостью излучения  $\text{SO}_2$ , а функция Планка слабо меняется в выбранном спектральном интервале (8,6–9,3 мкм). Расчеты зависимостей интеграла светимости от величины диаметра зеркала, углов наблюдения, диапазона температур позволяют находить наиболее оптимальные конструктивные характеристики аппаратуры. Однако с ростом концентрации  $\text{SO}_2$ , когда показатель экспоненты в (4) становится велик, ошибка в определении концентрации  $\text{SO}_2$  также возрастает и существует граничное значение  $K_\nu(T)\rho\chi$ , при котором погрешность  $\Delta\rho$  будет более допустимой. В нашем примере эта величина при принятой погрешности  $\Delta\rho$  в 10% равна  $\approx 2,5 \text{ атм} \cdot \text{см}$ , что соответствует значению, многократно превышающему ПДК.

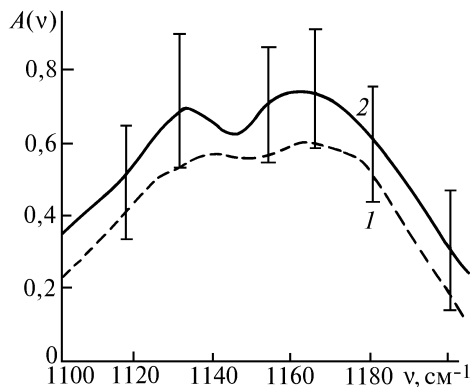


Рис. 2. Сравнение расчетной (1) функции поглощения  $\text{SO}_2$ , нагретого до  $500^\circ\text{K}$  с экспериментом (2) [1, 2]

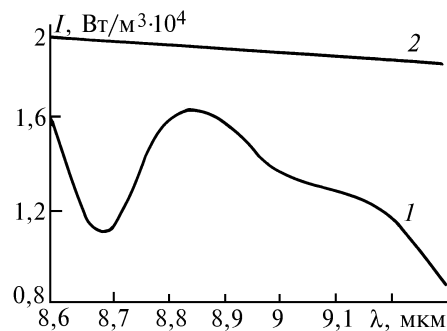


Рис. 3. Спектральная зависимость ( $T = 1000^\circ\text{K}$ ): 1 – интеграла светимости  $\text{SO}_2$ , 2 – функции Планка

### Выбор диапазона пропускания светофильтра

При проектировании прибора следует проанализировать роль аппаратной функции. Очевидно, что должно существовать некое оптимальное значение  $\Delta\nu$ , определяемое индивидуально для каждого спектрального интервала исследуемого газа, которое бы давало максимальное значение интенсивности приходящего на приемник излучения. Этот этап является одним из важнейших, т.к. практически задается диапазон пропускания светофильтра. Выбирается длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной мощности излучения (центру колебательной полосы). Величина интенсивности излучения рассчитывается в зависимости от ширины полосы аппаратной функции. Иллюстрируемый рис. 4 расчет проводится при  $T = 1000^\circ\text{K}$  и значении оптической толщины  $\approx 5 \text{ атм} \cdot \text{см}$ . Максимальное значение  $I_{\text{св}}$  и  $I_{\text{пр}}$  достигается при  $\Delta\nu = 0,025 \text{ мкм}$ . Аппаратная функция выполняет усреднение сигнала, и пока ширина полосы излучения не превышает ширины полосы аппаратной функции, идет увеличение мощности регистрируемого потока.

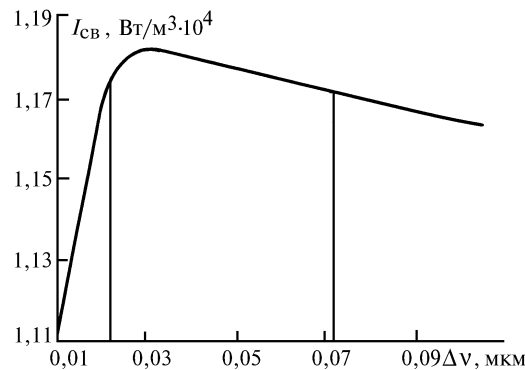


Рис. 4. Зависимость интеграла светимости  $\text{SO}_2$  от полуширины аппаратной функции прибора

Поскольку в качестве рабочего выбран район 8–12 мкм, относящийся к окнам прозрачности атмосферы, на рассматриваемых нами длинах трассы (до 1 км) поглощением атмосферы в данном конкретном расчете можно пренебречь, хотя в общем случае функция пропускания атмосферным слоем должна оцениваться достаточно строго.

### Регистрация излучения

В качестве регистратора излучения следует использовать фотоприемные устройства (ФПУ), тип которых, помимо остальных параметров, определяется чувствительностью, а следовательно, и диаметром приемного зеркала. Так как стоимость изготовления зеркала пропорциональна его диаметру, то целесообразно выбрать наименьший диаметр при чувствительности ФПУ, достаточной для уверенной регистрации сигнала. Наиболее удобны в эксплуатации тепловые приемники, работающие при комнатной температуре, однако их чувствительность невелика, и целесообразно их применять только с целью контроля за превышением максимально допустимой разовой дозы выброса, измерения же концентрации газов меньших ПДК с их помощью малоэффективно. Для этой цели более перспективны фотоэлектрические полупроводниковые детекторы [12].

### Заключение

В данной статье показана принципиальная возможность создания малогабаритных переносных датчиков концентрации вредных газов в нагретых выбросах промышленных объектов на основе пассивных дистанционных методов регистрации излучения. Авторы данной статьи стремились обратить внимание разработчиков аппаратуры на целесообразность создания таких приборов и их перспективность в экологическом и технологическом контроле за выбросами загрязняющих атмосферу веществ.

1. Лазарев Л. П. Оптико-электронные приборы наведения. М.: Машиностроение, 1989. 510 с.
2. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М.: ИЛ, 1963. 493 с.
3. Гуди Р. М. Атмосферная радиация. М.: Мир, 1966. 522 с.
4. Войцеховская О. К., Трифонова Н. Н., Кузьмина Н. В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №5. С. 565–571.
5. Войцеховская О. К., Трифонова Н. Н., Кузьмина Н. В. // Оптика атмосферы и океана. 1990. Т. 3. №5. С. 485–493.
6. Войцеховская О. К. // Оптика атмосферы и океана. 1990. Т. 3. №5. С. 585–592.
7. Войцеховская О. К., Кузнецов С. В., Остапенко С. П., Черкасов М. Р. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №9. С. 962–969.
8. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 263 с.
9. Кондратьев К. Я., Авасте О. А. Поле излучения Земли как планеты. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 314 с.
10. Беспамятнов Г. П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л.: Химия, 1985. 526 с.
11. Osumi M. Report of Sanyo Electric Co. Ltd. Hirakato, Osaka, Japan, 1980. 20 p.
12. Андреев Ю. М., Буткевич В. М., Воеводин В. Г., Войцеховский А. В. и др. Элементная база оптико-электронных систем. Томск: МП <РАСКО>, 1992. 274 с.

Томский государственный  
университет им. В.В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
15 июля 1994 г.

### **O. K. Voitsekhovskaya, A. V. Voitsekhovskii. On Potentials of a Passive Remote Technique to be used for Quantitative Analysis of Industrial Exhausts' Gaseous Content.**

A modeling of a simple gas-analyzer operation is described in the paper based on spectral behaviour record of emissive parameters of heated gases as products of different industrial processes. The emissive characteristics of the gases were studied by direct calculative technique using parameters of vibrational-rotational lines of the gases, which, in turn, were calculated by our own methods. Magnitude of the received signals as a function of such factors as spectral region, temperature, background radiation, and recording system used was analysed. The optimal parameters of the analyzer were chosen when registering SO<sub>2</sub> as an example.