

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

## Оптимизация оптических параметров ИК-газоанализатора окиси углерода на основе интерферометра Фабри–Перо

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 31.07.2006 г.

Рассмотрена конструкция стационарного абсорбционного газоанализатора на основе широкополосного источника ИК-излучения, интерференционного светофильтра и интерферометра Фабри–Перо, предназначенного для измерения концентраций молекул СО в дымовых газах теплоэлектростанций. Проведены расчеты оптимальных оптических характеристик интерферометра Фабри–Перо и интерференционного светофильтра. Показано, что при оптимальных параметрах интерферометра и светофильтра величина сигнала дифференциального поглощения увеличивается в 50–100 раз по сравнению со стандартной схемой формирования сигнала дифференциального поглощения без интерферометра Фабри–Перо.

### Введение

В настоящее время обязательному экологическому контролю в дымовых выбросах теплоэлектростанций (ТЭС) подлежат основные техногенные газы: окислы азота, двуокись серы, окись углерода. Их количество и состав в значительной степени зависят от вида топлива и режима его сжигания. Непрерывный контроль за объемами выбросов оксидов и их уменьшение — основные задачи природоохранной деятельности в теплоэнергетике, для решения которых применяются стационарные автоматические газоанализаторы непрерывного действия. В этих условиях несомненный интерес представляет разработка надежных и относительно недорогих автоматических газоанализаторов непрерывного действия для технического оснащения действующих и вновь создаваемых ТЭС.

В лаборатории экологического приборостроения ИМКЭС СО РАН уже разработаны стационарные автоматические газоанализаторы ДОГ-1 и ДОГ-4 [1–3], предназначенные для непрерывного измерения содержания окиси азота и двуокиси серы в дымовых выбросах теплоэлектростанций. Принцип действия этих газоанализаторов — дифференциальное поглощение в ближней УФ-области спектра (~0,23 мкм). Газоанализатор ДОГ-1 внесен в Госреестр средств измерений РФ, и более 70 приборов размещено на всех крупных теплоэлектростанциях Тюменского региона, работающих на природном газе. Газоанализатор ДОГ-4 в 2003–2004 гг. успешно прошел девятимесячные производственные испытания на Томской ГРЭС-2 и подготовлен к сертификации.

В данной статье приводятся результаты проектной разработки стационарного автоматического газоанализатора для непрерывного контроля за содержанием окиси углерода (СО) в дымовых газах теплоэлектростанций.

### Принцип действия

#### ИК-газоанализатора окиси углерода на основе интерферометра Фабри–Перо

Характерной чертой молекулы СО является отсутствие сильных полос поглощения в видимой и ближней УФ-областях спектра. В ИК-диапазоне молекула СО обладает сильным поглощением в области основной колебательно-вращательной полосы ( $\lambda \approx 4,67$  мкм) и значительно более слабым поглощением на обертоновых колебательно-вращательных полосах ( $\lambda \approx 2,35; 1,57$  и  $1,19$  мкм) [4]. Кроме того, молекула СО имеет чисто вращательный спектр поглощения, расположенный в далекой ИК ( $\lambda \approx 2600$  мкм) области спектра, которая обычно не используется для газоанализа.

Спектр поглощения молекулы СО в области его наиболее сильного ИК-поглощения ( $\lambda \approx 4,67$  мкм) состоит из двух систем отдельных вращательных линий ( $P$ - и  $R$ -ветвей основной колебательной полосы), частоты которых (в  $\text{см}^{-1}$ ) задаются выражениями [5]:

$$\omega_P(J) = 2143,272 - 3,862J - 0,0175J(J-2) + 0,0000245J^3, \quad (1)$$

$$\omega_R(J) = 2143,272 + 3,862(J+1) - 0,0175(J+1)(J+3) - 0,0000245(J+1)^3,$$

где  $J$  — вращательное квантовое число, принимающее значения  $J = 1, 2, 3, \dots$  для линий  $P$ -ветви и  $J = 0, 1, 2, \dots$  для линий  $R$ -ветви. Разность частот соседних линий составляет  $\sim 3,9 \text{ см}^{-1}$  и слабо уменьшается в высокочастотную область спектра. Внешний вид спектра поглощения молекулы СО показан на рис. 1.

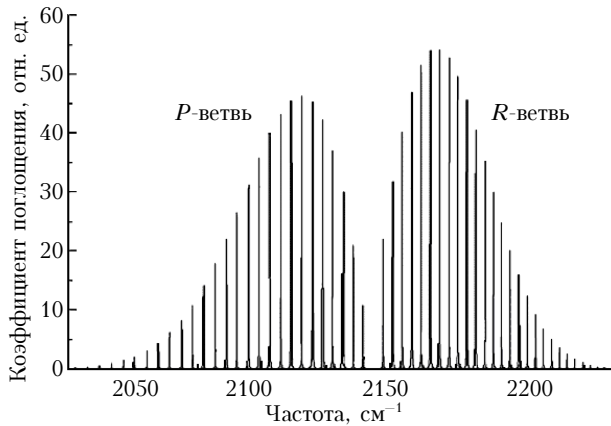


Рис. 1. Спектр поглощения молекулы СО в области основной колебательно-вращательной полосы ( $\lambda \approx 4,67$  мкм) при температуре 300 К и давлении 1 атм

Хорошо видно, что ИК-спектр поглощения представляет собой систему практически равноотстоящих (по частоте) спектральных линий, причем полуширины спектральных линий ( $\sim 0,1$  см<sup>-1</sup> при атмосферном давлении) значительно меньше разности частот соседних линий.

По этой причине использованный в газоанализаторах ДОГ-1 и ДОГ-4 вариант метода дифференциального поглощения оказывается неэффективным, поскольку сигнал дифференциального поглощения

$$S = (I_1 - I_2) / I_1, \quad (2)$$

где  $I_2$  – интенсивность светового потока, прошедшего через газовую среду в области полосы поглощения исследуемого газа,  $I_1$  – интенсивность светового потока вне области этой полосы, слабо зависит от концентрации поглощающих молекул. Это связано с тем, что подавляющая часть ИК-излучения в области полосы поглощения ( $I_2$ ) будет проходить через дымовой газ, независимо от содержания в нем молекул СО.

В этой ситуации для создания ИК-газоанализатора окиси углерода целесообразно создать специализированный источник излучения, ориентированный на вид спектра молекулы СО. Такой специализированный источник излучения включает в себя источник ИК-излучения со сплошным спектром, интерференционный светофильтр (ИСФ) и интерферометр Фабри–Перо (ИФП). В данной конструкции ИСФ и ИФП образуют многополосный ИК-светофильтр с перестраиваемыми по частоте полосами пропускания, в котором ИСФ выделяет из сплошного спектра источника излучение в области полосы поглощения СО, а ИФП оставляет из него только набор узких равноотстоящих (по частоте) участков спектра. Путем подбора базы ИФП можно добиться, чтобы эти выделенные спектральные участки совпадали по частоте с линиями поглощения окиси углерода (рис. 2, а).

В данном случае будет происходить поглощение излучения молекулами СО (сигнал  $I_2$ ). При небольшом повороте интерферометра его полосы пропускания сместятся относительно линий поглощения

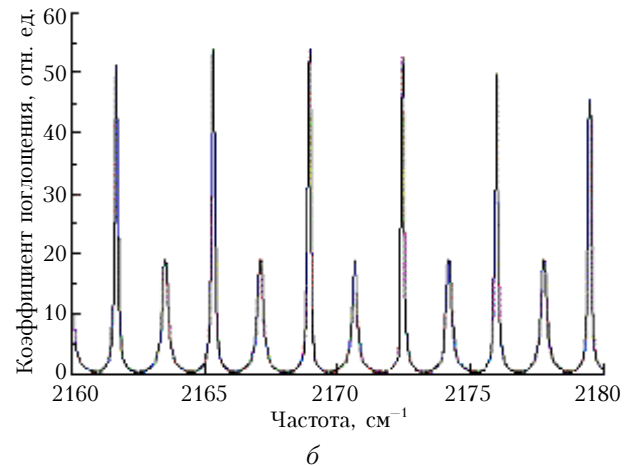
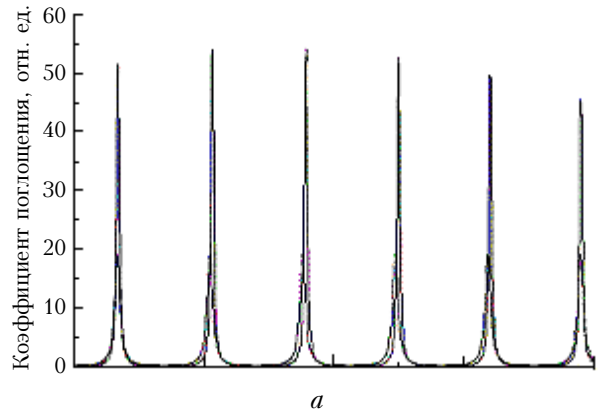


Рис. 2. Фрагмент спектра поглощения молекул СО в области R-ветви его основной колебательно-вращательной полосы: а – в случае совпадения максимумов пропускания ИФП с линиями поглощения СО; б – в случае смещения максимумов пропускания ИФП относительно линий поглощения СО

(рис. 2, б) и поглощения излучения молекулами СО не будет (сигнал  $I_1$ ). С помощью такого специализированного источника излучения удастся исключить неинформативные участки спектра и сформировать дифференциальное поглощение одновременно на некотором числе линий поглощения СО. Последнее связано с тем, что линии в спектре поглощения СО не являются точно эквидистантными из-за наличия нелинейных членов в соотношениях (1), а спектр пропускания ИФП – эквидистантный.

### Оптимизация оптических параметров газоанализатора СО

Структурная схема макета газоанализатора СО на основе многополосного ИК-светофильтра приведена на рис. 3. Сигнал фотоприемника может быть представлен в виде

$$I(\omega_0, \Delta\omega, R, d, T, P, l, \theta) = C \int_{\text{ИСФ}} (\omega_0, \Delta\omega, \omega) f_{\text{ИФП}}(R, d, \omega, \theta) \times \exp[-k(T, P, \omega)Pl] d\omega, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  – положение максимума и полуширина пропускания ИСФ;  $d$  и  $R$  – база ИФП и коэффициент отражения его зеркал;  $\theta$  – угол наклона ИФП;  $T$  и  $P$  – температура и давление газа;  $l$  – длина кюветы;  $f_{\text{ИСФ}}(\omega_0, \Delta\omega, \omega)$  – спектральная плотность пропускания ИСФ;  $f_{\text{ИФП}}(R, d, \omega, \theta)$  – спектральная плотность пропускания ИФП;  $k(T, P, \omega)$  – спектральная плотность коэффициента поглощения молекул СО при температуре  $T$  и давлении  $P$  газа.

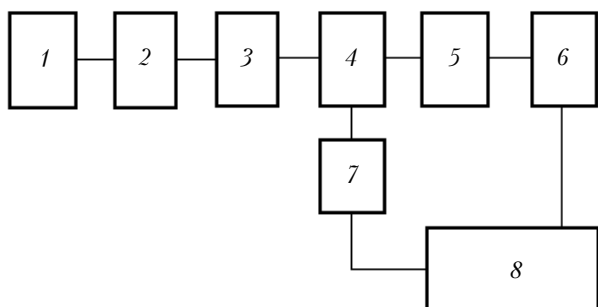


Рис. 3. Структурная схема макета газоанализатора СО: 1 – источник ИК-излучения (нагреваемая вольфрамовая нить в инертной среде) с модулятором; 2 – зеркальная оптическая система; 3 – интерференционный светофильтр; 4 – интерферометр Фабри–Перо; 5 – кювета (с патрубками для ввода и вывода дымового газа); 6 – фотоприемник; 7 – устройство поворота интерферометра Фабри–Перо; 8 – блок управления

Спектральная мощность излучения источника и спектральная чувствительность фотоприемника в пределах полосы поглощения СО приняты постоянными и введены в коэффициент  $S$ , описывающий недисперсионную часть функции пропускания газоанализатора.

С учетом выражения (3) сигнал дифференциального поглощения (2) в таком газоанализаторе может быть записан как

$$S(\omega_0, \Delta\omega, R, d, T, P, l, \theta) = \frac{I_1(\omega_0, \Delta\omega, R, d, T, P, l, \theta_1) - I_2(\omega_0, \Delta\omega, R, d, T, P, l, \theta_2)}{I_1(\omega_0, \Delta\omega, R, d, T, P, l, \theta_1)}, \quad (4)$$

где  $\theta_2$  – угол наклона ИФП, при котором его полосы пропускания совпадают по частоте с линиями поглощения окиси углерода (см. рис. 2, а), а  $\theta_1$  – угол поворота ИФП, при котором его полосы пропускания находятся между линиями поглощения окиси углерода (см. рис. 2, б).

Максимальная чувствительность газоанализатора на основе многополосного фильтра может быть достигнута только при оптимальных параметрах ИСФ и ИФП, где под оптимальными параметрами следует понимать такие параметры, при которых сигнал дифференциального поглощения достигает максимальной величины. В ИФП подлежат оптимизации следующие параметры: база ИФП  $d$  и коэффициенты отражения его зеркал  $R$ . На рис. 4 приведена зависимость величины сигнала фотоприемника [см. выражение (3)] от базы ИФП в области максимальной модуляции его сигнала.

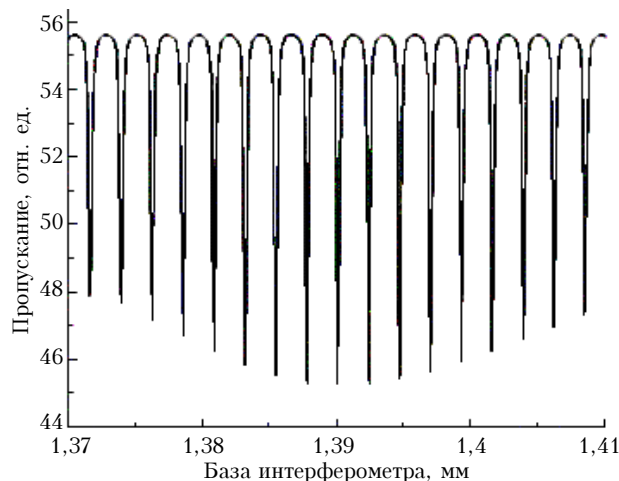


Рис. 4. Зависимость сигнала фотоприемника от базы ИФП при  $\omega_0 = 2170 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Delta\omega = 15 \text{ см}^{-1}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ;  $l = 1 \text{ см}$ ;  $\theta = 0^\circ$  при  $R = 0,8$  и концентрации молекул СО  $N = 10000 \text{ ppm}$

При расчетах спектральная плотность пропускания ИФП была представлена функцией Эри [6]:

$$f_{\text{ИФП}}(R, d, \omega, \theta) = \frac{(1 - R - \varepsilon)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(2\pi d \omega \cos \theta)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения зеркал (здесь и далее принято  $\varepsilon = 0,02$ ), а спектральная плотность пропускания ИСФ

$$f_{\text{ИСФ}}(\omega_0, \Delta\omega, \omega) = \left[ \frac{(1,15\Delta\omega)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (1,15\Delta\omega)^2} \right]^4. \quad (6)$$

Расчет спектральной плотности коэффициента поглощения молекул СО  $k(T, P, \omega)$  был проведен по стандартной методике, изложенной в [7]. Резкие минимумы сигнала (порядки интерференции) на рис. 4 соответствуют ситуации, когда спектр поглощения СО совпадает со спектром пропускания ИФП. Хорошо видно, что максимальная модуляция сигнала и, следовательно, максимальный сигнал дифференциального поглощения достигаются при базе ИФП  $d \approx 1,39 \text{ мм}$ , которая соответствует расстояниям между линиями в окрестности максимума поглощения  $R$ -ветви СО. Зависимость величины сигнала дифференциального поглощения от концентрации молекул СО приведена на рис. 5.

Приведенные зависимости показывают, что при рассмотренных концентрациях молекул СО сигнал дифференциального поглощения растет с увеличением  $R$ . С другой стороны, при увеличении  $R$  пропускание ИФП

$$t = (1 - R - \varepsilon)^2 / (1 - R)^2 \quad (7)$$

снижается, что приводит к нежелательному уменьшению сигналов фотоприемника (рис. 6).

Исходя из вида приведенных на рис. 5 и 6 зависимостей, в качестве оптимального значения коэффициента отражения зеркал ИФП следует принять значение  $R = 0,80 \div 0,85$ . При таких коэффициентах отражения контрастность ИФП

$$\gamma = \frac{f_{\text{ИФП}}^{\text{max}}}{f_{\text{ИФП}}^{\text{min}}} = \left( \frac{1+R}{1-R} \right)^2, \quad (8)$$

где  $f_{\text{ИФП}}^{\text{max}}$  — спектральная плотность в максимуме пропускания ИФП,  $f_{\text{ИФП}}^{\text{min}}$  — спектральная плотность в минимуме пропускания ИФП, еще достаточно высока и составляет  $\gamma \approx 100$ .

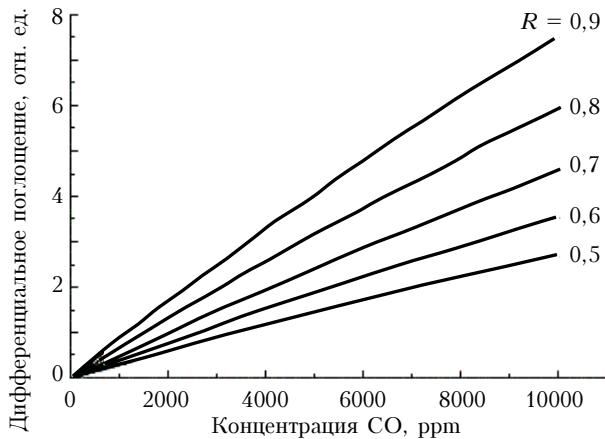


Рис. 5. Зависимость сигнала дифференциального поглощения от концентрации молекул СО при различных коэффициентах отражения зеркал ИФП при  $\omega_0 = 2170 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Delta\omega = 15 \text{ см}^{-1}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ;  $l = 1 \text{ см}$ ;  $d = 1,39 \text{ мм}$

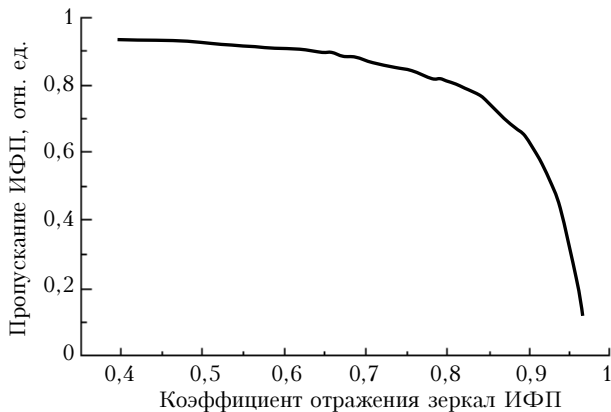


Рис. 6. Пропускание ИФП (в максимуме полос) при различных коэффициентах отражения его зеркал ( $\epsilon = 0,02$ )

Для интерференционного светофильтра необходимо оптимизировать положение максимума пропускания и полуширину полосы пропускания. На рис. 7 приведена зависимость сигнала дифференциального поглощения от положения максимума полосы пропускания ИСФ.

Полученная кривая имеет широкий максимум в окрестности линий  $R$ -ветви СО с максимальным поглощением, что позволяет считать оптимальным значением максимума полосы пропускания ИСФ любое значение в области  $2160\text{--}2180 \text{ см}^{-1}$ . Зависимость сигнала дифференциального поглощения от спектральной полуширины пропускания ИСФ для двух концентраций молекул СО показана на рис. 8.

Хорошо видно, что для обеих концентраций молекул СО сигнал дифференциального поглощения

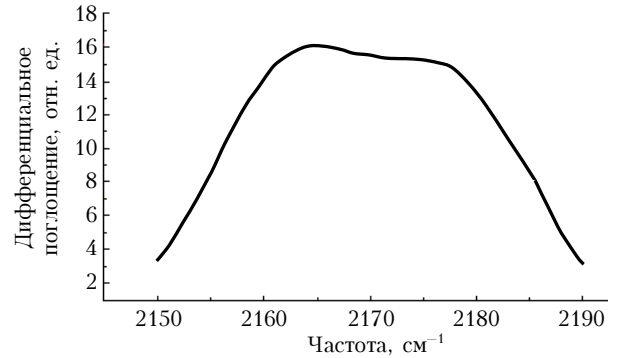


Рис. 7. Зависимость сигнала дифференциального поглощения от положения максимума полосы пропускания ИСФ при  $\Delta\omega = 15 \text{ см}^{-1}$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ;  $l = 1 \text{ см}$ ;  $R = 0,8$ ;  $d = 1,39 \text{ мм}$  и  $N = 100 \text{ ppm}$

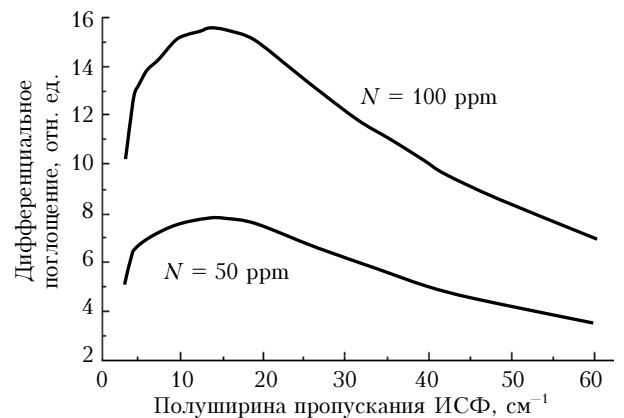


Рис. 8. Зависимость сигнала дифференциального поглощения от спектральной полуширины пропускания ИСФ для двух концентраций молекул СО при  $\omega_0 = 2170 \text{ см}^{-1}$ ;  $d = 1,39 \text{ мм}$ ;  $R = 0,8$ ;  $T = 300 \text{ К}$ ;  $l = 1 \text{ см}$

имеет максимум при  $\Delta\omega = 15 \text{ см}^{-1}$ . Аналогичное поведение сигнала дифференциального поглощения наблюдается и для других концентраций молекул СО. Таким образом, приведенные результаты показывают, что при оптимальных величинах параметров ИФП и ИСФ в дифференциальном поглощении одновременно участвуют только 5–6 наиболее интенсивных линий  $R$ -ветви спектра поглощения СО.

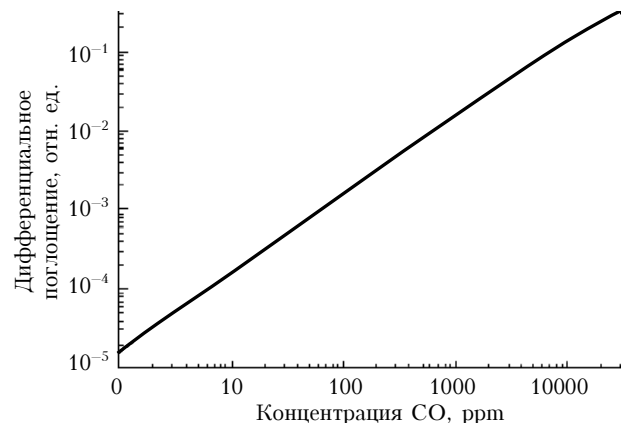


Рис. 9. Зависимость сигнала дифференциального поглощения от концентрации молекул СО при оптимальных параметрах ИФП и ИСФ

Характер зависимости сигнала дифференциального поглощения от концентрации молекул СО приведен на рис. 9.

Видно, что линейная зависимость сигнала дифференциального поглощения от концентраций молекул СО сохраняется до концентрации  $N \approx 10000$  ppm, что значительно превышает содержание молекул СО в дымовых газах теплоэлектростанций.

### Заклучение

Проведенные расчеты оптимальных параметров интерферометра Фабри–Перо и интерференционно-го светофильтра для абсорбционного ИК-газоанализатора СО на основе многополосного светофильтра ИК-диапазона показывают, что величина сигнала дифференциального поглощения при оптимальных параметрах увеличивается в 50–100 раз по сравнению со стандартной схемой формирования сигнала дифференциального поглощения.

Работа выполнялась в рамках Проекта СО РАН 28.2.3 «Разработка новых методов, технологий и приборов на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для контроля природных и тех-

ногенных систем, а также для решения специальных задач».

1. *Патент* 2029288 Российская Федерация, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 21/61. Газоанализатор / М.А. Булдаков, И.И. Ипполитов, Б.В. Королев, В.Е. Лобецкий, И.И. Матросов. БИ. 1995. № 5.
2. *Патент* 2244291 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 21/61. Двухкомпонентный оптический газоанализатор / А.А. Азбукин, М.А. Булдаков, В.В. Занин, Б.В. Королев, В.А. Корольков, И.И. Матросов. БИ. 2005. № 1.
3. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И. Оптические газоанализаторы серии «ДОГ» // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 87–90.
4. Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 403 с.
5. Хьюбер К.-П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. Ч. 2. М.: Мир, 1984. 368 с.
6. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972. 376 с.
7. Пеннер С.С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. 494 с.

*A.A. Azbukin, M.A. Buldakov, B.V. Korolev, V.A. Korolkov, I.I. Matrosov, A.A. Tikhomirov. Optical parameters optimization in the IR gas analyzer of carbon oxide based on the Fourier–Perrot interferometer.*

The construction of absorption gas analyzer using the wideband source of IR radiation, interference light filter and Fourier–Perrot interferometer was considered. The gas analyzer is designed for registrations of CO concentrations in effluent gases of power stations. The optimum optic parameters for interference light filter and Fourier–Perrot interferometer were calculated. It was shown that for optimal parameters of the light filter and the interferometer the signal value of differential absorption is increased by 50–100 times in comparison with the standard scheme of differential absorption signal formation without Fourier–Perrot interferometer.