УДК 551.501

Лазерный дистанционный метод обнаружения выбросов монооксида углерода

Белов М.Л.^{1,*}, Драченникова Я.Э.¹,
Городничев В.А.¹

^{*}belov@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведен анализ возможностей дистанционного лазерного абсорбционного метода обнаружения выбросов монооксида углерода в атмосфере. Приведена оценка информационного параметра, измеряемого дистанционным лазерным газоанализатором для полосы поглощения монооксида углерода около 2,3 мкм. Математическое моделирование показывает, что лазерный газоанализатор позволяет с вероятностью правильного обнаружения не менее 0,845 и вероятностью ложных тревог не более 0,234 проводить обнаружение выбросов монооксида углерода при содержании в выбросе CO не менее 0,1 % и размерах облака выбросов более 10 м. При содержании в выбросе CO не менее 1 % и размерах облака выбросов более 5 м лазерный газоанализатор позволяет проводить обнаружение выбросов монооксида углерода с вероятностью правильного обнаружения не менее 0,999 и вероятностью ложных тревог не более 0,001.

Ключевые слова: лазерный дистанционный метод, обнаружение выбросов монооксида углерода

Введение

Мониторинг газовых загрязнений атмосферы является одной из наиболее важных экологических задач, так как от качества атмосферного воздуха зависит здоровье людей.

Для оперативного обнаружения в атмосферном воздухе выбросов ядовитых и вредных газовых загрязнителей требуется создание газоаналитических приборов, способных проводить дистанционный мониторинг содержания этих газов в атмосфере.

Наиболее эффективными для дистанционного оперативного мониторинга загрязнений атмосферы являются лазерные методы (см., например, [1–6]).

Одним из наиболее приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха является монооксид углерода. Монооксид углерода является ядовитым загрязнителем, попав в организм при дыхании он лишает ткани тела необходимого им кислорода. Этот загрязнитель включен в международную программу Глобальной системы мониторинга окружающей среды (см., например, см., например, [7]).

В таблице 1 показаны предельно допустимые концентрации (ПДК) для монооксида углерода.

Таблица 1. ПДК для оксида углерода.

Газ	Класс опасности	Предельно допустимая концентрация, мг/м ³		
		в воздухе рабочей зоны	среднесуточная в атмосфере населенных пунктов	максимальная разовая
СО	4	20,0	3,0	5,0

Фоновая концентрация монооксида углерода в воздухе составляет $\sim 0,05..0,1$ млн⁻¹. К естественным источникам СО относят вулканы, лесные пожары и распад растительности и др..

К антропогенным источникам СО относят прежде всего сжигание ископаемых топлив. Выбросы тракторной и автомобильной техники дают до 80% всего содержания СО в тропосфере [8-11].

В отработавших (выхлопных) газах бензиновых двигателей содержание монооксида углерода может достигать до 12 %, а в отработавших газах дизелей – до 0,8 % и более. При работе автотракторной техники на наиболее энергоемких лесосечных работах концентрация оксида углерода в атмосферном воздухе может достигать 300 – 700 мг/м³. Монооксид углерода лидирует среди вредных веществ в РФ по абсолютным выбросам– 10,3 млн. т. в год.

В Таблице 2 приведены фоновая концентрация монооксида углерода и концентрация монооксида углерода в выбросах бензинового и дизельного двигателей [8-11].

Таблица 2. Фоновая концентрация СО и концентрация СО в выбросах двигателей.

Газ	Фоновая концентрация, %.	Концентрация в выбросах, %	
		Бензиновый двигатель	Дизельный двигатель
СО	0,0001	0,1...12	0,01...0,8 и более

Отметим, что неисправность двигателя может увеличить выброс вредных веществ в два раза и более раз [9].

Из таблицы 2 видно, что концентрация монооксида углерода в выбросах двигателей на несколько порядков выше, чем его фоновая концентрация. Это потенциально позволяет обнаруживать источники выбросов СО в атмосферу.

Статья посвящена анализу возможностей дистанционного лазерного абсорбционного метода обнаружения выбросов монооксида углерода в атмосфере.

1. Анализ возможных длин волн лазерного зондирования

Среди процессов взаимодействия лазерного излучения с атмосферными газами наибольшее сечение имеет эффект поглощения. Обычно в лидарах, предназначенных для

дистанционного газоанализа, используется метод дифференциального поглощения (ДП) (см., например [7]).

В этом методе для контроля содержания в атмосфере одного газа используют две длины волны зондирования. Одна λ_1 выбирается в максимуме линии поглощения газа (для нее за счет поглощения газа на трассе зондирования происходит максимальное ослабление сигнала, регистрируемого приемником лидара), а другая λ_2 – рядом с первой на краю или вне линии поглощения (для нее ослабление сигнала, регистрируемого приемником лидара за счет поглощения газа, практически не происходит). Сравнение лидарных сигналов на двух длин волн зондирования позволяет измерять концентрацию контролируемого газа и обнаруживать его выбросы в атмосферу.

Выбор длин волн зондирования контролируемого газа определяется прежде всего его полосами поглощения.

Основная полоса поглощения молекул $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ в оптическом диапазоне находится около $2143,2 \text{ см}^{-1}$ (4,67 мкм). Значения других центров полос: 4260,0646 (основной обер-тон); 4207,1664; 4154,4056; 4101,7820; 4049,2958; 3996,9466; 6350,4404; 8414,4708 см^{-1} . Соотношение между показателями поглощения полос в спектре СО диапазоне 0,75 – 6 мкм показан на рисунке 1.

Рисунок 1 показывает, что лучшим вариантом спектрального диапазона для мониторинга выбросов монооксида углерода является диапазон 4,5 – 5 мкм.

Масштабированные (с учетом их фонового содержания в стандартной земной атмосфере) интенсивности спектральных линий поглощения монооксида углерода и основных мешающих измерению газов (водяного пара и двуокиси углерода) в диапазоне 1900 см^{-1} – 2500 см^{-1} (4,0 – 5,2 мкм) приведены (в логарифмическом масштабе) на рисунках 2-4 [12,13].

Рис.1. Спектр поглощения монооксида углерода

Рис.2. Интенсивность спектральных линий монооксида углерода в диапазоне 4,0 – 5,2 мкм

Рис. 3. Интенсивность спектральных линий водяного пара в диапазоне 4,0 – 5,2 мкм

Рис. 4. Интенсивность спектральных линий двуоксида углерода в диапазоне 4,0 – 5,2 мкм

Из рисунков 2-4 видно, что ситуация с измерением содержания СО в этом диапазоне очень плохая – здесь находятся сильные полосы поглощения воды и много (хотя и не таких сильных) линий поглощения углекислого газа.

Определить содержание монооксида углерода в этом спектральном диапазоне можно с помощью высокочувствительной аппаратуры с термостабилизацией источника и приемника излучения (см., например, [14-16]). Такая аппаратура на основе перестраиваемого диодного лазера имеет узкую линию излучения, которая позволяет детектировать только одну линию поглощения СО без помех, вызванных влиянием линий поглощения воды и углекислого газа.

Однако, газоанализаторы на основе диодных лазеров имеют ряд особенностей, ограничивающих их применение. Такие газоанализаторы сложны в эксплуатации в полевых условиях (криогенная техника, чувствительность к вибрациям и т.п.) и для их обслуживания необходим специально обученный высококвалифицированный персонал.

Более приемлемым вариантом для дистанционного контроля монооксида углерода был бы газоанализатор на основе перестраиваемого по длине волны импульсного оптического параметрического генератора.

Однако в диапазоне 4,5 – 5 мкм на сегодняшний день нет оптических параметрических генераторов с приемлемыми (для задачи дистанционного контроля выбросов монооксида углерода) спектральными и энергетическими характеристиками.

Другим возможным вариантом является использование для контроля выбросов СО полосы поглощения около 2,3 мкм.

В спектральном диапазоне около 2,3 мкм есть перестраиваемые по длине волны импульсные оптические параметрические генераторы с достаточно большой энергией в импульсе (что нужно для дистанционного зондирования). Например, Opolette HE 532 LD [17] со спектральным диапазоном перестройки 680-2400 нм, спектральной шириной линии $10\text{-}15\text{ см}^{-1}$, пиковой энергией в импульсе 2 мДж (на длине волны 2,3 мкм), длительностью импульса 6 нс, частотой повторения 20 Гц в устойчивом к внешним воздействиям компактном корпусе.

Спектр поглощения СО в спектральном диапазоне около 2,3 мкм (4300 см^{-1}) показан (в логарифмическом масштабе) на рисунке 5.

Основными атмосферными газами, мешающими измерению СО в этом спектральном диапазоне, также являются водяной пар (H_2O) и двуоксид углерода (CO_2). Спектры их поглощения приведены (в логарифмическом масштабе) на рисунках 6 и 7.

Рис. 5. Интенсивность спектральных линий монооксида углерода в диапазоне 2,2-2,5 мкм

Рис. 6. Интенсивность спектральных линий водяного пара в диапазоне 2,2-2,5 мкм

Рис. 7. Интенсивность спектральных линий двуоксида углерода в диапазоне 2,2-2,5 мкм

Видно, что в рассматриваемом спектральном диапазоне ситуация тоже не простая. Двуокись углерода не оказывает мешающего влияния на измерения СО, но водяной пар имеет спектральные линии сравнимые (с даже больше) со спектральными линиями СО (да и линий водяного пара явно больше).

Однако, это сравнение спектров монооксида углерода и водяного пара относится к фоновым условиям атмосферы и можно ожидать, что в условиях антропогенных выброс (когда концентрация СО может быть на пять порядков больше фоновой) использование полосы поглощения около 2,3 мкм даст хорошие результаты.

При выборе длин волн зондирования используем спектр СО и учтем, что спектральная ширина линии источника широкая – 10 см^{-1} . Для работы метода дифференциального поглощения выбираем одну длину волны излучения источника в максимуме поглощения СО – $\lambda_1 = 4295 \text{ см}^{-1}$ (линия излучения - $4290 - 4300 \text{ см}^{-1}$ или $2,33100 - 2,3255814 \text{ мкм}$), а другую длину волны выбираем вне линии поглощения СО - $\lambda_2 = 4370 \text{ см}^{-1}$ (линия излучения - $4365 - 4375 \text{ см}^{-1}$ или $2,290950 - 2,2857142 \text{ мкм}$).

На рисунке 8 показан спектр поглощения монооксида углерода в пределах линии излучения источника $4290 - 4300 \text{ см}^{-1}$ ($2,33100 - 2,3255814 \text{ мкм}$).

Рис. 5 Спектр поглощения монооксида углерода в пределах линии излучения источника $4290 - 4300 \text{ см}^{-1}$

Отметим, что выбранные для лазерного зондирования длины волн находятся в безопасном для глаз спектральном диапазоне [18,19].

2. Обнаружение выбросов монооксида углерода в моностатической схеме зондирования

Считаем, что мониторинг выбросов СО происходит с летательного аппарата (см. рисунок 9).

Рис.9. Схема вертикального однопозиционного зондирования. $2\alpha_{и}$, $2\alpha_{п}$ - углы расходимости лазерного источника и поля зрения приемника; O – облако выброса; S - земная поверхность

При использовании для мониторинга выбросов монооксида углерода метода ДП с рассеянием от земной поверхности (или любого отражателя, например, крыши дома) выражения для мощности сигналов $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$, принимаемых лидаром имеют вид (отражающую поверхность полагаем ламбертовской) [7]:

$$P(\lambda_1); \frac{a_{и}a_{п}T_{п}T_{и}T_aA}{H^2(\alpha_{и}^{-2} + \alpha_{п}^{-2})} \exp\{-2H[\kappa_{cf}^{CO}(\lambda_1, z) + \kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_1, z)] - 2\Delta H\kappa_{cv}^{CO}(\lambda_1, z)\} \quad (1)$$

$$P(\lambda_2); \frac{a_{и}a_{п}T_{п}T_{и}T_aA}{H^2(\alpha_{и}^{-2} + \alpha_{п}^{-2})} \exp\{-2H\kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_2, z)\} \quad (2)$$

где $a_{и} = \frac{P_0}{\pi\alpha_{и}^2}$; $a_{п} = \pi r_{п}^2$; $C_{и,п} = (\alpha_{и,п}H)^{-2}$; H - высота расположения лидара; A - коэф-

фициент отражения поверхности; P_0 - мощность лазерного источника; $T_{п}, T_{и}$ - пропускание приемной и передающей оптики лидара; $\kappa_{cf}^{CO}(\lambda_1, z)$ - средний (в пределах спектральной линии излучения источника с центральной длиной волны λ_1) коэффициент фонового поглощение CO; $\kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_1, z)$ - средний (в пределах спектральной линии излучения источника с центральной длиной волны λ_1) коэффициент фонового поглощение H_2O ; $\kappa_{cv}^{CO}(\lambda_1, z)$ - средний (в пределах спектральной линии излучения источника с центральной длиной волны λ_1) коэффициент поглощение CO в выбросе с (учетом содержания CO в выбросе); $\kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_2, z)$ - средний (в пределах спектральной линии излучения источника с центральной длиной волны λ_2) коэффициент фонового поглощение H_2O ; $r_{п}$ - радиус главного зеркала приемной оптики; T_a - пропускание аэрозольной атмосферы на трассе «лидар – поверхность».

При получении формул (1) и (2) учитывали, что влияние мешающих газовых составляющих атмосферы проявляется только во влиянии водяного пара. Полагали также, что длины волн λ_1 и λ_2 настолько близки, что все характеристики источника, приемника, поверхности и аэрозольной атмосферы практически одинаковы на этих длинах волн. Геометрические параметры показаны на рисунке 9.

Отношение мощностей сигналов $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$ является информационным параметром, который может быть использован для мониторинга выбросов монооксида углерода:

$$R = \frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)} = \frac{\exp\{-2N[\kappa_{cf}^{CO}(\lambda_1, z) + \kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_1, z)] - 2\Delta N \kappa_{cv}^{CO}(\lambda_1, z)\}}{\exp\{-2N \kappa_{cf}^{H_2O}(\lambda_2, z)\}} \quad (3)$$

Ниже в Таблице 3 приведены результаты расчетов информационного параметра R при разных размерах выброса и разном содержании в выбросе монооксида углерода.

Расчеты проводились для высоты H равной 1 км. Фоновое содержание паров воды – 1%, монооксида углерода – 0,0001%. Процентное содержание монооксида углерода в выбросе считалось постоянным. Давления на высотах до 1 км принималось равным приземному, так как давление в атмосфере убывает с высотой довольно медленно – с характерным масштабом ~ 8 км.

Значение информационного параметра $R_{фон}$ в случае отсутствия выбросов равно $R_{фон} = 0,959$.

Таблица 3. Значение параметра R для разных размеров выброса и разном содержании в выбросе монооксида углерода

Толщина слоя вы- броса, м	Содержание СО, %					
	10	5	2	0,5	0,1	0,01
100	< 0,001	< 0,001	0,010	0,100	0,610	0,917
50	< 0,001	< 0,001	0,100	0,310	0,765	0,938
20	< 0,001	0,010	0,388	0,610	0,876	0,950
10	0,010	0,100	0,610	0,765	0,917	0,955
5	0,100	0,310	0,765	0,857	0,938	0,957
2,5	0,309	0,545	0,857	0,906	0,948	0,958
1	0,610	0,765	0,917	0,938	0,955	0,959

Сравнение параметра R в Таблице 3 с фоновым значением параметра $R_{фон}$ показывает возможность мониторинга выбросов монооксида углерода в зависимости от размера выброса в диапазоне типичных значений содержания СО в выбросе.

Для количественной оценки надежности обнаружения выбросов монооксида углерода было проведено математическое моделирование. Проводилось вычисление вероятности правильного обнаружения выброса $R_{по}$ (обнаружение выброса, когда он есть в действительности) и вероятности ложных тревог $R_{лт}$ (обнаружение выброса, когда его в действительности нет). Моделирование было проведено по 10^5 шумовых реализаций. Полага-

лось, что шум измерения распределен по гауссовскому закону со средним значением равным нулю и относительным среднеквадратическим отклонением в диапазоне от 1 до 5 %.

Решение об обнаружении выброса монооксида углерода принималось, когда значение информационного параметра R было больше порогового (пороговое значение принималось равным среднему между значениями $R_{\text{фон}}$ и R).

Результаты математического моделирования вероятностей $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$ приведены в таблице 4 при разных размерах выброса и разном содержании СО в выбросе.

Таблица 4. Значение вероятности $P_{\text{по}}$ для шума измерения 1 %

Толщина слоя вы- броса, м	Содержание СО, %				
	5	3	1	0,1	0,01
100	более 0,999	более 0,999	более 0,999	более 0,999	более 0,999
50	более 0,999	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,933
10	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,999	0,587
5	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,939	0,516

Таблица 5. Значение вероятности $P_{\text{лт}}$ для шума измерения 1 %

Толщина слоя вы- броса, м	Содержание СО, %				
	5	3	1	0,1	0,01
100	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,016
50	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,135
10	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,015	0,424
5	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,144	0,466

Таблица 6. Значение вероятности $P_{\text{по}}$ для разных размеров выброса и разном содержании в выбросе монооксида углерода для шума измерения 3 %

Толщина слоя вы- броса, м	Содержание СО, %				
	5	3	1	0,1	0,01
100	более 0,999	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,854
50	более 0,999	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,69
10	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,845	0,53
5	более 0,999	более 0,999	более 0,999	0,684	0,506

Таблица 7. Значение вероятности $P_{\text{лт}}$ для разных размеров выброса и разном содержании в выбросе монооксида углерода для шума измерения 3 %

Толщина слоя вы- броса, м	Содержание СО, %				
	5	3	1	0,1	0,01
100	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,233
50	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,001	0,355
10	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,234	0,463
5	менее 0,001	менее 0,001	менее 0,001	0,358	0,480

Результаты, приведенные в Таблицах 4-7, показывают, что при содержании в выбросе СО не менее 0,1 % задача обнаружения выбросов монооксида углерода может быть решена с вероятностью правильного обнаружения не менее 0,845 и вероятностью ложных тревог не более 0,234 для размеров облака выбросов более 10 м. При содержании в выбросе СО не менее 1 % и размерах облака выбросов более 5 м выбросы монооксида углерода могут быть уверенно обнаружены с вероятностью правильного обнаружения более 0,999 и вероятностью ложных тревог менее 0,001.

Заключение

Проведен анализ возможностей дистанционного лазерного абсорбционного метода обнаружения выбросов монооксида углерода в атмосфере. Приведена оценка информационного параметра, измеряемого дистанционным лазерным газоанализатором в полосе поглощения монооксида углерода около 2,3 мкм. Показано, что при содержании в выбросе СО не менее 0,1 % задача обнаружения выбросов монооксида углерода может быть решена с вероятностью правильного обнаружения не менее 0,845 и вероятностью ложных тревог не более 0,234 для размеров облака выбросов более 10 м. При содержании в выбросе СО не менее 1 % и размерах облака выбросов более 5 м выбросы монооксида углерода могут быть уверенно обнаружены с вероятностью правильного обнаружения более 0,999 и вероятностью ложных тревог менее 0,001.

Список литературы

1. Demtroeder W. Laser spectroscopy: Basic concepts and instrumentation. 3rd ed. B.; N.Y.: Springer, 2003. 987 p.
2. Avetisov V., Bjoroe O., Junyang Wang, Geiser P., Paulsen K.G. Hydrogen sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 23. Article 5313. DOI: [10.3390/s1923513](https://doi.org/10.3390/s1923513)
3. Liang Mei, Somesfalean G., Svanberg S. Pathlength determination for gas in scattering media absorption spectroscopy // Sensors. 2014. Vol. 14. No. 3. Pp. 3871-3890. DOI: [10.3390/s140303871](https://doi.org/10.3390/s140303871)
4. Persson L., Lewander M., Andersson M., Svanberg K., Svanberg S. Simultaneous detection of molecular oxygen and water vapor in the tissue optical window using tunable diode laser spectroscopy // Applied Optics. 2008. Vol. 47. No. 12. Pp. 2028-2034. DOI: [10.1364/AO.47.002028](https://doi.org/10.1364/AO.47.002028)
5. Haesunk Park, Kwangchil Lee, Gumin Kang, Soonho Song, Youngjean Jung, Kyoungsik Kim, Jinsu Bae, Jonghak Lee, Hyongkuk Park. Reliable optical measurement of water vapor in highly scattering environment // Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2009. Vol. 72. No. 3. Pp. 510-514. DOI: [10.1016/j.saa.2008.10.022](https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.10.022)
6. Berezin A.G., Ershov O.V., Nadezhdinskii A.I. Trace complex-molecule detection using near-IR diode lasers // Applied Physics B. 2002. Vol. 75. No. 2-3. Pp. 203-214. DOI: [10.1007/s00340-002-0968-7](https://doi.org/10.1007/s00340-002-0968-7)

7. Основы количественного лазерного анализа: учеб. пособие / В.И. Козинцев и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 464 с.
8. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие // Вопросы современной науки и практики. 2010. № 10-12(31). С. 54-59.
9. Чернецов Д.А. Загрязнение окружающей среды сельскохозяйственной техникой // Вопросы современной науки и практики. 2011. №1(32). С. 23-27.
10. Альферович В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебно-метод. пособие: В 2-х ч. Ч. 1: Анализ состава отработавших газов. Минск: Изд-во БНТУ, 2016. 54 с.
11. Контроль токсичности отработавших газов дизельного двигателя. Режим доступа: <http://stroy-technics.ru/article/kontrol-toksichnosti-otrabotavshikh-gazov-dizelnogo-dvigatelya> (дата обращения: 02.04.2020).
12. High-resolution spectral modeling. Режим доступа: https://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_intensity.php (дата обращения 02.04.2020).
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J.V. The *HITRAN* 2008 molecular spectroscopic database // J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2009. Vol. 110. No. 9-10. Pp. 533-572.
DOI: [10.1016/j.qsrt.2009.02.013](https://doi.org/10.1016/j.qsrt.2009.02.013)
14. Baldacchini G., D'Armato F., De Rosa M., Nadezhdinskii A.I., Lemekhov N., Sabolev N. Measurement of atmospheric CO concentration with tunable diode laser // Infrared Physics & Technology. 1996. Vol. 37. No. 1. Pp.1-5. DOI: [10.1016/S1350-4495\(97\)80762-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(97)80762-1)
15. Надеждинский А.И. Диодная лазерная спектроскопия: Современные тенденции // Диодная лазерная спектроскопия. М.: ИОФ АН СССР, 1990. С. 7-38.
16. Степанов Е.В. Высокочувствительный газоанализ на основе импульсных диодных лазеров // Диодная лазерная спектроскопия. М.: ИОФ АН СССР, 1990. С. 141-167.
17. Opolette TM 532 / OPOTEK tunable laser systems LLC. Режим доступа: <https://www.opotek.com/wp-content/uploads/2018/08/2002d0118-Opolette-532-data-sheet.pdf> (дата обращения 02.04.2020).
18. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
19. Corbett J., Woods M. UV laser radiation: skin hazards and skin protection controls // Intern. laser safety conf.: ILSC 2013 (Orlando, FLA, USA, March 18-21, 2013): Conf. program & proc. Laser Inst. of America, 2013. Pp. 1-8.

Laser Remote Sensing Method of Carbon Monoxide Emissions Detection

M.L. Belov^{1,*}, Ya.E. Drachennikova¹,
V.A. Gorodnichev¹

^{*}belov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser remote sensing method, detection of carbon monoxide emissions

Monitoring of atmospheric gas pollution is one of the most important environmental target. Laser methods are the most effective for remote operational monitoring of atmospheric pollution.

One of the most important air pollutants is carbon monoxide.

The article analyzes the possibility of laser remote sensing method of carbon monoxide emissions detection in atmosphere.

The information parameter measured by the remote sensing laser gas analyzer was assessed for absorption band of carbon monoxide near 2,3 μm .

The information parameter that can be used for monitoring monoxide emissions is the ratio of the power of laser signals at the wavelengths 4295 cm^{-1} and 4370 cm^{-1} .

Results of calculations of the information parameter for different sizes of emissions (from 1 m to 100 m) and different content of carbon monoxide in the emission (from 0.01 % to 10 %) were showed.

Comparing the information parameter R with its background value shows that carbon monoxide emissions can be monitored.

Mathematical modeling was performed for quantitative estimation the reliability of detecting carbon monoxide emissions.

The probability of correctly emission detecting (emission detecting when there is one) and the probability of false alarms (emission detecting when there is none) were calculated.

Mathematical modelling shows that a laser gas analyzer allows us to detect the carbon monoxide emissions with correct detection probability not less 0,845 and false alarm probability no more 0,243 for carbon monoxide emissions with gas concentration not less 0,1 % and dimension of emissions cloud not less 10 m. For carbon monoxide emissions with gas concentration not less 1 % and dimension of emissions cloud not less 5 m a laser gas analyzer allows us to detect the carbon monoxide emissions with correct detection probability not less 0,999 and false alarm probability no more 0,001.

References

1. Demtroeder W. Laser spectroscopy: Basic concepts and instrumentation. 3rd ed. B.; N.Y.: Springer, 2003. 987 p.
2. Avetisov V., Bjoroey O., Junyang Wang, Geiser P., Paulsen K.G. Hydrogen sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 23, article 5313. DOI: [10.3390/s1923513](https://doi.org/10.3390/s1923513)
3. Liang Mei, Somesfalean G., Svanberg S. Pathlength determination for gas in scattering media absorption spectroscopy. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 3871-3890. DOI: [10.3390/s140303871](https://doi.org/10.3390/s140303871)
4. Persson L., Lewander M., Andersson M., Svanberg K., Svanberg S. Simultaneous detection of molecular oxygen and water vapor in the tissue optical window using tunable diode laser spectroscopy. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 12, pp. 2028-2034. DOI: [10.1364/AO.47.002028](https://doi.org/10.1364/AO.47.002028)
5. Haesunk Park, Kwangchil Lee, Gumin Kang, Soonho Song, Youngjean Jung, Kyoungsik Kim, Jinsu Bae, Jonghak Lee, Hyongkuk Park. Reliable optical measurement of water vapor in highly scattering environment. *Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2009, vol. 72, no. 3, pp. 510-514. DOI: [10.1016/j.saa.2008.10.022](https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.10.022)
6. Berezin A.G., Ershov O.V., Nadezhdinskii A.I. Trace complex-molecule detection using near-IR diode lasers. *Applied Physics B*, 2002, vol. 75, no. 2-3, pp. 203-214. DOI: [10.1007/s00340-002-0968-7](https://doi.org/10.1007/s00340-002-0968-7)
7. *Osnovy kolichestvennogo lazernogo analiza* [Fundamentals of quantitative laser analysis]: a textbook / V.I. Kozintsev a.o. Moscow: BMSTU Publ., 2006. 464 p. (in Russian).
8. Chernetsov D.A. Toxicity of the fulfilled gases of diesel engines and their anthropogenous effect. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki* [Problems of Contemporary Science and Practice], 2010, no. 10-12(31), pp. 54-59 (in Russian).
9. Chernetsov D.A. Environmental pollution from agricultural machinery. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki* [Problems of Contemporary Science and Practice], 2011, no. 1(32), pp. 23-27 (in Russian).
10. Al'ferovich V.V. *Toksichnost' dvigatelej vnutrennego sgoraniia. Chast' 1: Analiz sostava otrabotavshikh gazov* [Toxicity of compression ignition engines: a textbook. In 2 parts. Pt. 1: Analysis of exhaust gas composition]. Minsk: BNTU Publ., 2016. 54 p. (in Russian).
11. *Kontrol' toksichnosti otrabotavshikh gazov dizel'nogo dvigatelya* [Control of toxicity of exhaust gases of diesel engine]. Available at: <http://stroy-technics.ru/article/kontrol-toksichnosti-otrabotavshikh-gazov-dizelnogo-dvigatelya>, accessed 02.04.2020 (in Russian).
12. High-resolution spectral modeling. Available at: https://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_intensity.php, accessed 02.04.2020.
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W.J.,

Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J.V. The *HITRAN* 2008 molecular spectroscopic database. *J. of Quatitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, vol. 110, no. 9-10, pp. 533-572.

DOI: [10.1016/j.qsrt.2009.02.013](https://doi.org/10.1016/j.qsrt.2009.02.013)

14. Baldacchini G., D'Armato F., De Rosa M., Nadezhdinskii A.I., Lemekhov N., Sabolev N. Measurement of atmospheric CO concentration with tunable diode laser. *Infrared Physics & Technology*, 1996, vol. 37, no. 1, pp. 1-5. DOI: [10.1016/S1350-4495\(97\)80762-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(97)80762-1)
15. Nadezhdinskii A.I. Diodnaia lazernaia spektroskopiia: Sovremennye tendentsii [Diode laser spectroscopy. Contemporary trends]. *Diodnaia lazernaia spektroskopiia* [Diode laser spectroscopy]. Moscow, 1990. Pp. 7-38 (in Russian).
16. Stepanov E.V. Vysokochuvstvitel'nyj gazoanaliz na osnove impul'snykh diodnykh lazerov [Highly-sensitive gas analysis on the basis of pulse diode lasers]. *Diodnaia lazernaia spektroskopiia* [Diode laser spectroscopy]. Moscow, 1990. Pp. 141-167 (in Russian).
17. Opolette TM 532 / OPOTEK tunable laser systems LLC. Available at: <https://www.opotek.com/wp-content/uploads/2018/08/2002d0118-Opolette-532-data-sheet.pdf>, accessed 02.04.2020.
18. GOST 31581-2012. Lazernaia bezopasnost'. Obshchie trebovaniia pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelij. Vveden 2015-01-01 [All-Union State Standard 31581-2012. Laser safety. General safety requirements for development and operation of laser products. 2015-01-01]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p. (in Russian).
19. Corbett J., Woods M. UV laser radiation: skin hazards and skin protection controls. *Intern. laser safety conf.: ILSC 2013* (Orlando, FLA, USA, March 18-21, 2013): Conf. program & proc. Laser Inst. of America, 2013. Pp. 1-8.