

УДК 543.4

Разработка недисперсионного инфракрасного газоанализатора для измерения динамики концентраций парниковых газов

И. А. Карпов¹, И. Л. Фуфурин¹, И. Б. Винтайкин¹, Д. Р. Анфимов¹, А. П. Костерова¹,
Ю. Д. Караулова², П. П. Дёмкин¹, А. Н. Морозов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия;

² Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия

Контроль концентраций парниковых газов и измерение динамики концентраций является одной из фундаментальных и ключевых задач в области экологического мониторинга. Такие газы, как водяной пар, диоксид углерода, метан и другие, попадают в атмосферу вследствие как естественных природных процессов, так и антропогенной деятельности. Накопление этих газов в атмосфере усиливает парниковый эффект, который в свою очередь негативно влияет на здоровье людей, аграрную деятельность и на всю окружающую среду в целом. Именно поэтому важной задачей является разработка устройств, способных определять концентрации парниковых газов в атмосфере. Оптические методы измерений, в том числе методы недисперсионной инфракрасной спектроскопии (Nondispersive infrared, NDIR), позволяют бесконтактно и в автоматическом режиме измерять концентрации составляющих газовых смесей. Представленный в данной работе NDIR-газоанализатор регистрирует излучение на длине волны 4.26 мкм для определения концентрации диоксида углерода (также предусмотрена возможность регистрации паров воды). Полученный сигнал нормируется с помощью опорного канала, который настроен на длину волны 3.95 мкм. Для обработки экспериментальных данных была разработана математическая модель, позволяющая определять концентрации диоксида углерода в воздухе. Данная модель основывается на методах программы MATLAB и языка программирования Python. Разработанный прибор является газоанализатором открытого типа. Это позволяет использовать его в различных условиях благодаря снижению энергопотреблению. Представленное устройство может использоваться на карбоновых полигонах для контроля качества работы низкоорбитальных спутников, проводящих мониторинг парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова: недисперсионная инфракрасная спектроскопия; парниковые газы; газоанализатор; карбоновые полигоны.

Введение

Экологический мониторинг является одной из основных задач современного человечества. Важными направлениями в области наблюдения за окружающей средой являются измерение и контроль концентраций парниковых газов в атмосфере. Такие газы, как диоксид углерода, водяной пар, метан и другие, оказывают большое влияние на климат планеты. Парниковый эффект негативно сказывается на окружающей среде, а также на здоровье людей и аграрной деятельности [1, 2].

Для проведения мониторинга парниковых газов в атмосфере на территории Российской Федерации обустроена сеть карбоновых полигонов. Особенности экосистемы данных территорий позволяют проводить различные научные исследования и эксперименты, нацеленные на разработку и испытание новейших технологий в области контроля концентраций парниковых газов в атмосфере [3]. По данным

✉ И.А. Карпов: Ivan123121@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.07.2024

После доработки: 23.12.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

Министерства науки и высшего образования РФ, в настоящее время в России действует 19 карбоновых полигонов общей площадью 312939.53 га¹.

Существуют различные методы измерения концентраций парниковых газов в атмосфере. Для мониторинга малых газовых компонентов, таких как: диоксид углерода, метан, угарный газ, закись азота и другие, широко используются инфракрасные (ИК) Фурье-спектрометры. Они находят применение в наземных, самолетных и низкоорбитальных спутниковых системах [4–6]. Также для определения концентраций парниковых газов в атмосферном воздухе применимы методы комбинационного рассеяния света [7]. Помимо прочего, для мониторинга и измерения потоков газов, имеющих высокое поглощение в дальнем и среднем ИК-диапазонах, используется метод турбулентных пульсаций, заключающийся в синхронном измерении показаний анемометров и NDIR-датчиков [8].

Методы NDIR-спектроскопии основываются на законе Бугера–Ламберта–Бера, с помощью которого можно косвенно измерить концентрацию вещества в газе по интенсивности поглощения в заданной полосе ИК-спектра. При прохождении ИК-излучения через исследуемый газ молекулы этого газа поглощают часть энергии данного излучения. Данную зависимость можно представить в виде [9]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-a_\lambda lc), \quad (1)$$

где I – интенсивность излучения, прошедшего через исследуемый газ; I_0 – исходная интенсивность излучения источника; a_λ – коэффициент для длины волны излучения λ ; l – оптический путь; c – концентрация вещества.

Методы NDIR-спектроскопии, основывающиеся на абсорбции ИК-излучения исследуемым веществом, широко применяются в области газоанализа. NDIR-газоанализаторы часто применяются для измерения концентраций CO₂ в помещениях. Повышенное содержание углекислого газа в помещениях влияет на физиологические процессы в организме человека: снижение когнитивных способностей (1000–2500 ppm CO₂), снижение частоты сердечных сокращений (1000–3000 ppm CO₂), затрудненное дыхание (0.3–0.5 % CO₂), потеря сознания (7–10 % CO₂) [10].

Также NDIR-газоанализаторы находят применение в области медицины. Данные устройства применимы при измерении концентраций углекислого газа в выдыхаемом человеком воздухе. Такие измерения позволяют производить непрерывный мониторинг состояния пациентов, находящихся в отделениях интенсивной терапии, а также исследовать скорость их метаболизма [11, 12].

Более того, NDIR-газоанализаторы применяются для контроля аграрных производственных процессов. В работе [13] представлено устройство, нацеленное на контроль выбросов таких парниковых газов, как метан и диоксид углерода на молочных фермах. Посредством использования NDIR-газоанализатора персонал фермы может выявить изъяны в своих методах управления, таких как эффективность использования кормов и органических удобрений.

Помимо прочего, датчики, основанные на методах NDIR-спектроскопии, применяются для детектирования метана. NDIR-сенсоры позволяют достичь высокой чувствительности, селективности и долговременной стабильности при обнаружении CH₄. Данные датчики можно применять в угольных шахтах, водоочистительных станциях и в сельском хозяйстве [14–16]. Для предотвращения взрывов и их последствий необходимо точно определять концентрации метана в замкнутых помещениях, так как метан является взрывоопасным в смеси с воздухом при его концентрации в диапазоне от 5 до 15 % [17].

Целью данной работы является разработка системы измерения концентраций парниковых газов в атмосферном воздухе, основывающаяся на методах NDIR-спектроскопии.

Методы

В рамках данной работы был разработан NDIR-газоанализатор. Источником ИК-излучения прибора является широкополосный излучатель, который расположен в параболическом отражателе диаметром 6 мм. Рабочая температура нагревательного элемента ИК излучателя составляет 610 ± 30 °С. Фотоприемное

¹ Карбоновые полигоны Российской Федерации // Минобрнауки России [Электронный ресурс]. URL: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения: 30. 09.2024).

устройство (ФПУ) представлено в виде пироприемника с четырьмя каналами, с размерами чувствительных фотоэлементов $2.0 \cdot 2.0 \text{ мм}^2$. Каждый из четырех каналов настроен на определенные длины волн с помощью полосовых светофильтров, характеристики которых приведены в табл. 1. Особенностью данного ФПУ является его полярность: отрицательный сигнал при положительном изменении потока ИК-излучения.

Таблица 1. Характеристики светофильтров ФПУ NDIR-газоанализатора

Номер канала	1	2	3	4
Применение канала	Опорный	Диоксид углерода	Вода	Опорный
Центральная длина волны, нм	3950 ± 45	4260 ± 90	5800 ± 50	3950 ± 45

На рис. 1 приведена схема разработанного NDIR-газоанализатора. Излучатель, настроенный на широкую полосу ИК-диапазона, создает дискретный поток излучения с частотой 10 Гц. С помощью оптической системы данное излучение падает на ФПУ через открытый оптический путь длиной 300 мм между блоками излучателя и ФПУ, через который циркулирует атмосферный воздух. Данные с каждого канала считываются, и полученный сигнал нормируется на опорный канал. Для реализации метода турбулентных пульсаций полученные данные соотносят с показаниями анемометра. Для определения параметров окружающей среды, таких как влажность, температура и давление, используется блок датчиков.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Для управления работой блоков излучателя и ФПУ используется модуль ввода / вывода аналоговых и цифровых сигналов L-Card E-502. После обработки сигнала данным модулем обработанные данные передаются в компьютер.

Для определения концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе была разработана модель математической обработки сигнала, получаемого с помощью разработанного прибора. Разработанная математическая модель основывается на методах программ MATLAB, Origin и языка программирования Python.

Работа модуля L-Card E-502 контролируется программным кодом, написанным на языке Python. С помощью канала цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на блок излучателя подается переменное напряжение в виде положительного однополярного меандра с частотой 10 Гц со значениями 0 и 5 В.

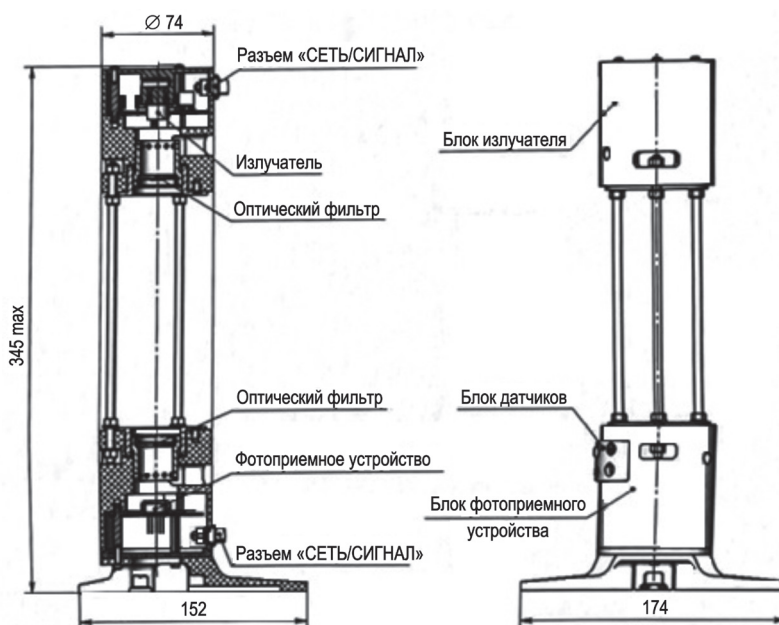


Рис. 1. Схема газоанализатора

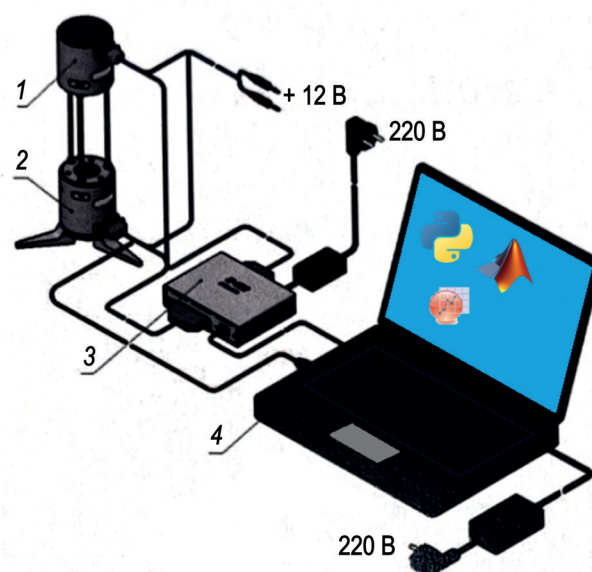


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – блок излучателя, 2 – блок ФПУ, 3 – L-Card E-502, 4 – компьютер

Таким образом создается дискретное ИК излучение частотой 10 Гц (данные показатели частоты являются необходимыми для реализации метода турбулентных пульсаций). Сигнал, получаемый с блока ФПУ попадает на компьютер с помощью каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП). По полученным массивам данных можно косвенно оценить концентрацию CO_2 в окружающем воздухе. Разработанный прибор является газоанализатором открытого типа, способный измерять концентрации газов in-situ. Энергопотребление таких газоанализаторов снижено, благодаря тому что для их работы не требуется насос. Искажение данных такими газоанализаторами мало. В основном оно вызывается вследствие потери данных из-за осадков, осреднения в оптическом тракте и пространственного разделения с анемометром [18].

Теоретически рассчитанное соотношение сигнал/шум (SNR) разработанного NDIR-газоанализатора составляет $10^4 \div 10^5$, соответствующее чувствительности $10 \div 100$ ppb. Проведение эксперимента по подтверждению теоретических значений является задачей для дальнейших исследований.

Проведение экспериментов и результаты

Для определения зависимости между показаниями прибора и концентрацией углекислого газа в окружающем воздухе был проведен эксперимент, в котором разработанный NDIR-газоанализатор был помещен в герметично закрытый бокс. Лабораторная установка представлена на рис. 3.

В ходе данного эксперимента генератор сигналов создавал меандр, подаваемый на излучатель. Lcard E-502 был использован только на считывание данных с помощью каналов АЦП, сигнал с которых представлен на рисунке 4. По полученным блокам данных были рассчитаны значения, пропорциональные оптической плотности, посчитанные как натуральный логарифм со знаком минус от отношения интенсивностей второго и опорного каналов. Было снято два блока данных для двух заведомо известных газовых смесей: 1) продувка бокса азотом – точка с концентрацией CO_2 0 ppm; 2) продувка бокса углекислым газом для установки концентрации углекислого газа 600 ppm. По полученным точкам была построена тарировочная кривая с помощью метода линейной интерполяции программы Origin (рис. 5).

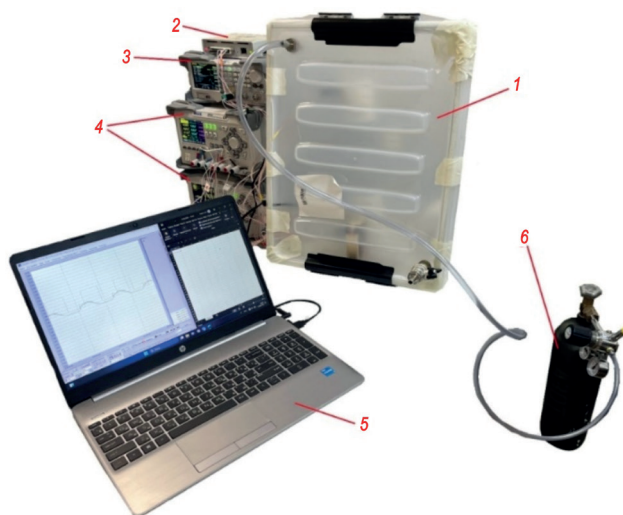


Рис. 3. Лабораторная установка: 1 – бокс, 2 – L-Card E-502, 3 – генератор сигналов, 4 – источники питания, 5 – компьютер, 6 – баллон с азотом

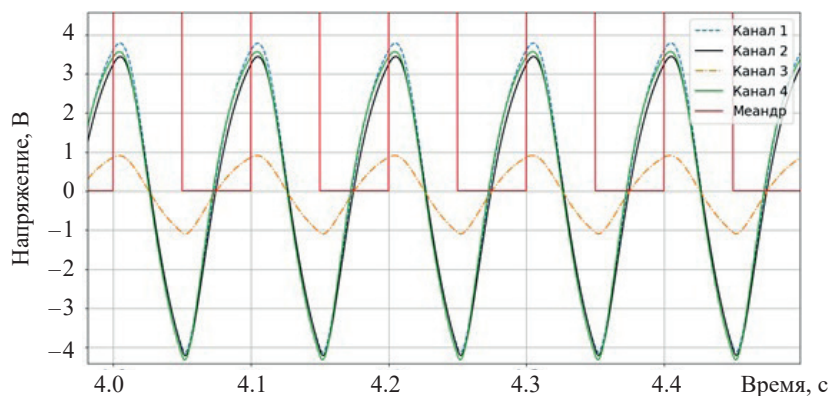


Рис. 4. Вид сигнала, получаемого с АЦП L-Card E-502

Далее приведено уравнение полученной тарировочной кривой (формула 2):

$$c = 5298.36 \cdot D + 8.99, \quad (2)$$

где $D = -\ln(I_2/I_4)$ – показания с NDIR-газоанализатора, c – показания NDIR-газоанализатора переведенные в единицы концентрации CO_2 в ppm.

Опираясь на полученную формулу, можно проводить оценку концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе.

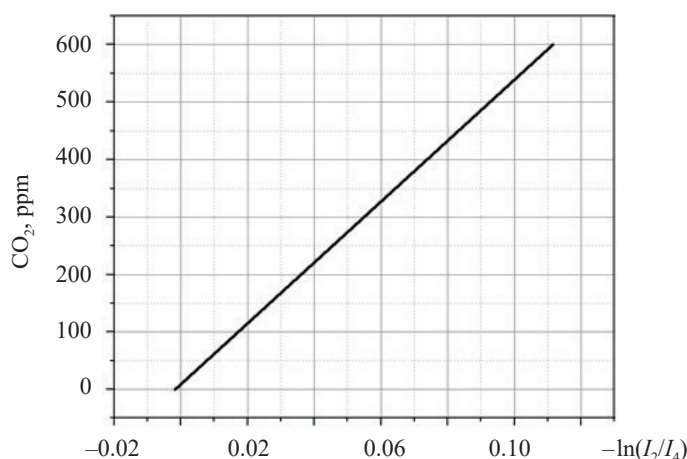


Рис. 5. Тарировочная кривая NDIR газоанализатора. I_2 и I_4 – интенсивности со второго и опорного каналов соответственно

Обсуждение

В настоящей работе был представлен NDIR-газоанализатор открытого типа, источником ИК-излучения которого является широкополосный излучатель. Разработанное устройство имеет четырехканальный пироприемник в качестве ФПУ. Каждый из чувствительных каналов настроен на определенные диапазоны длин волн:

- пары воды – 5800 ± 50 нм;
- углекислый газ – 4260 ± 90 нм;
- опорные – 3950 ± 45 нм.

Для обеспечения работы NDIR газоанализатора была разработана математическая модель, основанная на методах языка программирования Python, а также программ MATLAB и Origin.

Значение SNR, рассчитанное на основе характеристик ФПУ и излучателя, флуктуирует в диапазоне от 10^4 до 10^5 , что соответствует чувствительности от 10 до 100 ppb. Экспериментальное подтверждение данных значений является задачей для будущих исследований.

Был проведен эксперимент по вычислению тарировочной кривой. Используя зависимость, описывающую данную кривую, можно преобразовывать показания с разработанного NDIR-газоанализатора в показания концентрации CO_2 в атмосферном воздухе.

Помимо прочего, предстоящей задачей является проведение экспериментов, основывающихся на методе турбулентных пульсаций, на карбоновом полигоне. Показания, получаемые с разработанного NDIR-газоанализатора, будут сопоставляться с показаниями анемометра для осуществления методов модели eddy covariance.

Финансирование

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г. № 729.

Вклад авторов

Карпов И.А. – выполнение экспериментальных работ, обработка результатов, подготовка текста статьи, подбор литературных источников.

Фуфурин И.Л. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования.

Винтайкин И.Б. – участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Анфимов Д.Р. – участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Костерова А.П. – разработка математической модели, выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, редактирование текста статьи.

Караулова Ю.Д. – разработка макета газоанализатора.

Дёмкин П.П. – постановка эксперимента.

Морозов А.Н. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Список литературы

1. Mikhaylov A., Moiseev N., Aleshin K., Burkhardt T. Global climate change and greenhouse effect. // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 2020. V. 7. № 4. P. 2897–2913. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
2. Забураева Х.Ш., Керимов И.А., Романова О.С., Широкова В.А. Аналитический обзор: причины и последствия глобальных изменений климата. // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*, 2021. № 4. С. 103–111. <http://doi.org/10.33580/2541-9684-2021-87-4-103-111>
3. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики. // *Геология и Геофизика Юга России*, 2023. Т. 13. № 3. С. 49–62. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.42.75.004>
4. Виролайнен Я.А. Методические аспекты определения содержания углекислого газа в атмосфере с помощью ИК-Фурье-спектроскопии. // *Журнал прикладной спектроскопии*, 2018. Т. 85. № 3. С. 453–460.
5. Асташкин А.А., Карелин А.В., Комиссарова И.Н., Кузьмин Ю.А., Шувалов В.А., Яковлев А.А. Обзор орбитальных группировок космических аппаратов оперативного метеонаблюдения // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2021. Т. 181. № 2. С. 24–55.
6. Mayorova V., Morozov, A., Golyak, I., Golyak, I., Lazarev, N., Melnikova, V., Rachkin D., Svirin V., Tenenbaum S., Vintaykin I., Anfimov D., Fufurin I. Determination of greenhouse gas concentrations from the 16U cubesat spacecraft using fourier transform infrared spectroscopy // *Sensors*, 2023. V. 23. № 15. P.6794. <https://doi.org/10.3390/s23156794>
7. Петров Д.В., Матросов И.И., Сединкин Д.О., Заринов А.Р. Определение концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе с помощью спектроскопии кр. // *Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу*, 2017. С. 225–226.
8. Ким Д.В., Зеневич С.Г., Газизов И.Ш., Спиридонов М.В., Родин, А.В. Разработка портативного газоанализатора для проведения измерений потоков CO₂, CH₄ и H₂O методом турбулентных пульсаций. // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы*, 2022. С. В186–В189. <http://doi.org/10.56820/OAOPA.2022.25.48.001>
9. Мальцев А.А. Молекулярная спектроскопия. // М.:Изд-во МГУ, 1980. 272 с.
10. Dinh T.V., Lee J.Y., Ahn J.W., Kim J.C. Development of a wide-range non-dispersive infrared analyzer for the continuous measurement of CO₂ in indoor environments. // *Atmosphere*, 2020. V. 11. № 10. P. 1024. <https://doi.org/10.3390/atmos11101024>
11. Vincent T.A., Gardner J.W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels // *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016. V. 236. P. 954–964. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.04.016>
12. Xu M., Xu Y., Tao J., Li Y., Kang Q., Shu D., Li T., Liu Y. A design of an ultra-compact infrared gas sensor for respiratory quotient (qCO₂) detection // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021. V. 331. P. 112953. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112953>
13. Li Q., He Y., Zhao K., Ji J., Li. H., Bewley J. Development and Testing of NDIR-Based Rapid Greenhouse Gas Detection Device for Dairy Farms. // *Sustainability*, 2024. V. 16. № 5. P. 2131. <https://doi.org/10.3390/su16052131>
14. Fu L., You S., Li G., Fan Z. Enhancing methane sensing with NDIR technology: Current trends and future prospects. // *Reviews in Analytical Chemistry*, 2023. V. 42. № 1. P. 20230062. <https://doi.org/10.1515/revac-2023-0062>
15. Ab Latif F.N.B., Yaacob M. Detection of Methane Gas Using Absorption Spectroscopy Technique in Non-Dispersive Infrared (NDIR) Region. // *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 2022. V. 3. № 2. P. 25–34. <https://doi.org/10.30880/eeee.2022.03.02.004>
16. Karacan C.Ö., Ruiz F.A., Cotè M., Phipps S. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. // *International journal of coal geology*, 2011. V. 86. № 2–3. P. 121–156. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.009>
17. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. // *Краткое практическое руководство. Москва: ИПЭЭ им. А.Н Северцова РАН*, 2016, С. 11–27.

Development of a non-dispersive infrared gas analyzer for measuring the dynamics of greenhouse gases concentrations

I. A. Karpov^{1,✉}, I. L. Fufurin¹, I. B. Vintaykin¹, D. R. Anfimov¹, A. P. Kosterova¹, J. D. Karaulova²,
P. P. Demkin¹, A. N. Morozov¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia;

² Center for Applied Physics Bauman MSTU, Moscow, 105005, Russia.

✉ Ivan123121@mail.ru

Received July 5, 2024; revised December 23, 2024; accepted December 24, 2024

Monitoring of the greenhouse gases concentrations and their dynamics is a fundamental and crucial task in environmental monitoring. Gases such as water vapor, carbon dioxide, methane, and others enter the atmosphere through both natural processes and anthropogenic activities. The accumulation of these gases enhances the greenhouse effect, negatively impacting human health, agriculture, and the environment as a whole. Therefore, the development of devices capable of determining atmospheric greenhouse gas concentrations is vital. Optical measurement methods, including nondispersive infrared (NDIR) spectroscopy, offer non-contact and automated measurement of gaseous mixture components. The NDIR gas analyzer presented in this work registers radiation at a wavelength of 4.26 μm to determine carbon dioxide concentration (with provision for water vapor detection). The resulting signal is normalized using a reference channel tuned to 3.95 μm . The mathematical model, developed using MATLAB and Python programming languages, processes the experimental data to determine atmospheric carbon dioxide concentrations. The developed device is an open-path gas analyzer, enabling its use in diverse environments due to its reduced power consumption. This instrument is applicable for carbon polygon monitoring and for quality control of low-Earth orbit satellites performing atmospheric greenhouse gases monitoring.

Keywords: non-dispersive infrared spectroscopy; greenhouse gases; gas analyzer, carbon polygons.

References

1. Mikhaylov A., Moiseev N., Aleshin K., Burkhardt T. Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 2897–2913. doi: [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
2. Zaburaeva Kh.Sh., Kerimov I.A., Romanova O.S., Shirokova V.A. Analiticheskij obzor: prichiny i posledstviya global'nyh izmenenij klimata [Analytical review: causes and consequences of global climate change]. *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo centra RAN*, 2021, no. 4, pp. 103–111 (in Russian). doi: <http://doi.org/10.33580/2541-9684-2021-87-4-103-111>
3. Kerimov I.A., El'zhaev A.S., Doduev A.A. Geofizicheskie issledovaniya na karbonovom poligone CHechenskoj Respubliki [Geophysical research at the carbon polygon of the Chechen Republic]. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 49–62. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.42.75.004>
4. Virolajnen Ya.A. Metodicheskie aspekty opredeleniya sodержaniya uglekislogo gaza v atmosfere s pomoshch'yu IK-Fur'e-spektroskopii [Methodological aspects of determining the carbon dioxide content in the atmosphere using Fourier transform infrared spectroscopy]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii*, 2018, vol. 85, no. 3, pp. 453–460 (in Russian).
5. Astashkin A.A., Karelin A.V., Komissarova I.N., Kuz'min Yu.A., Shuvalov V.A., Yakovlev A.A. Obzor orbital'nyh gruppirovok kosmicheskikh apparatov operativnogo meteonablyudeniya [Review of orbital constellations of operational weather observation spacecraft]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, 2021, vol. 181, no. 2, pp. 24–55 (in Russian).
6. Mayorova V., Morozov A., Golyak I., Golyak I., Lazarev N., Melnikova V., Rachkin D., Svirin V., Tenenbaum S., Vintaykin I., Anfimov D., Fufurin I. Determination of greenhouse gas concentrations from the 16U cubesat spacecraft using fourier transform infrared spectroscopy. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 15, 6794 p. doi: <https://doi.org/10.3390/s23156794>
7. Petrov D.V., Matrosov I.I., Sedinkin D.O., Zaripov A.R. Opredelenie koncentracii uglekislogo gaza v atmosfernom vozduhe s pomoshch'yu spektroskopii kr [Determination of carbon dioxide concentration in atmospheric air using Raman

- spectroscopy]. Dvenadcatoe Sibirskoe soveshchanie i shkola molodyh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu, 2017, pp. 225–226. (In Russian).
8. Kim D.V., Zenevich S.G., Gazizov I.SH., Spiridonov M.V., Rodin, A.V. Razrabotka portativnogo gazoanalizatora dlya provedeniya izmerenij potokov CO₂, CH₄ i H₂O metodom turbulentnykh pul'sacij [Development of a portable gas analyzer for measuring CO₂, CH₄ and H₂O flows using the turbulent pulsation method]. Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery, 2022, pp. B186-B189. (In Russian). doi: <http://doi.org/10.56820/OAOPA.2022.25.48.001>
9. Mal'cev A.A. Molekulyarnaya spektroskopiya [Molecular spectroscopy]. Moscow, Izd-vo MGU Publ., 1980, 272 p.
10. Dinh T.V., Lee J.Y., Ahn J.W., Kim J.C. Development of a wide-range non-dispersive infrared analyzer for the continuous measurement of CO₂ in indoor environments. Atmosphere, 2020, vol. 11, no. 10, 1024 p. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos11101024>
11. Vincent T.A., Gardner J.W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, vol. 236, pp. 954–964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.04.016>
12. Xu M., Xu Y., Tao J., Li Y., Kang Q., Shu D., Li T., Liu Y. A design of an ultra-compact infrared gas sensor for respiratory quotient (qCO₂) detection. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, vol. 331, 112953 p. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112953>
13. Li Q., He Y., Zhao K., Ji J., Li. H., Bewley J. Development and Testing of NDIR-Based Rapid Greenhouse Gas Detection Device for Dairy Farms. Sustainability, 2024, vol. 16, no. 5, 2131 p. doi: <https://doi.org/10.3390/su16052131>
14. Fu L., You S., Li G., Fan Z. Enhancing methane sensing with NDIR technology: Current trends and future prospects. Reviews in Analytical Chemistry, 2023, vol. 42, no. 1, 20230062 p. doi: <https://doi.org/10.1515/revac-2023-0062>
15. Ab Latif F.N.B., Yaacob M. Detection of Methane Gas Using Absorption Spectroscopy Technique in Non-Dispersive Infrared (NDIR) Region. Evolution in Electrical and Electronic Engineering, 2022, vol. 3, no. 2, pp. 25–34. doi: <https://doi.org/10.30880/eeee.2022.03.02.004>
16. Karacan C.Ö., Ruiz F.A., Cotè M., Phipps S. Coal mine methane: a review` of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. International journal of coal geology, 2011, vol. 86, no. 2–3, pp. 121–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.009>
17. Burba G.G., Kurbatova YU.A., Kuricheva O.A., Avilov V.K., Mamkin V.V. Metod turbulentnykh pul'sacij. Kratkoe prakticheskoe rukovodstvo [Turbulent pulsation method. A short practical guide]. Moskva: IPEE im. AN Severtsova RAN, 2016, pp. 11–27 (in Russian).