УДК 504.064.3 URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/eco/iog/1126.html

РАЗРАБОТКА NDIR-ГАЗОАНАЛИЗАТОРА: ИНЖЕНЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ

И.А. Карпов karpov@bmstu.ru
SPIN-код: 8706-6218

А.П. Костерова kosterovaa2002@mail.ru
SPIN-код: 3995-7745

В.Р. Бессонов bessonov.v@bmstu.ru
SPIN-код: 8522-4851

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Одной из наиболее значимых задач современного экологического мониторинга является быстрый и высокоточный контроль за изменениями концентраций парниковых газов, таких как водяной пар и двуокись углерода, в атмосфере. В рамках настоящей статьи представлена инженерная реализация NDIR (non-dispersive infrared — недисперсионного инфракрасного) газоанализатора с новаторской схемой генерации дискретного инфракрасного излучения, основанной на широтно-импульсной модуляции сигнала. Помимо прочего, описано проведение испытаний разработанного устройства в составе эколого-климатической станции на учебной базе МГТУ им. Н.Э. Баумана в деревне Камшиловка (Московская область) в комплексе с трехосевым ультразвуковым анемометром для осуществления метода турбулентных пульсаций.

Ключевые слова: парниковые газы, экологический мониторинг, NDIR-газоанализатор, углекислый газ, водяной пар, метод турбулентных пульсаций, карбоновые полигоны, инфракрасная спектроскопия

Введение. Антропогенная деятельность является одним из факторов, отрицательно влияющих на баланс концентраций парниковых газов в атмосфере. Парниковые газы, такие как диоксид углерода, метан, диоксид серы и др., воздействуют на климат планеты, что впоследствии приводит к повышению среднегодовой температуры (рис. 1), таянию ледников, ухудшению состояния биосферы и т. д. Сжигание полезных ископаемых увеличивает выбросы CO_2 и других парниковых газов. Вклад животноводства в глобальные антропогенные выбросы оценивается примерно в 11 %. Непосредственно от животных происходят выбросы метана (CH_4) в процессе их пищеварения. Кроме того, значительные выбросы метана и закиси азота (N_2O) связаны с обработкой продуктов жизнедеятельности животных. Помимо прочего, доминирующий вклад в парниковый эффект вносит водяной пар, изучение изменения динамики концентрации которого также несет значимый характер для исследования атмосферно-биосферных связей и изменения глобального климата Земли [1–3].

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

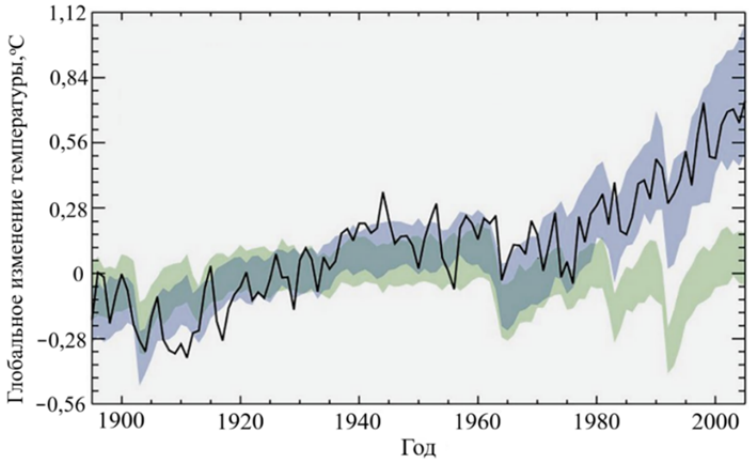


Рис. 1. Глобальные температурные тренды с учетом (*голубая заливка*) и без учета (*зеленая заливка*) влияния антропогенных парниковых газов. Сплошная черная линия представляет результаты наблюдений

Таким образом, актуальными и важными задачами являются разработка новых инженерных решений и их применение в реализации технический устройств, позволяющих осуществлять непрерывный, быстрый и высокоточный контроль концентрации парниковых газов в атмосферном воздухе [4].

Методы. ***Инфракрасная спектроскопия.*** Основными методами, применяемыми для экологического мониторинга парниковых газов и измерения их концентраций, являются оптические. Среди них следует выделить инфракрасную спектроскопию, методология которой позволяет анализировать колебательные и вращательные движения молекул, что делает ее ценным инструментом для точных качественного и количественного анализов состава парниковых газов в атмосфере [5].

Одним из самых распространенных и простых методов, с точки зрения инженерной реализации, является NDIR-спектроскопия (Non-dispersive infrared — недисперсионный инфракрасный), основанная на поглощении инфракрасного излучения анализируемым веществом. Описывается данное явление с помощью закона Бугера — Ламберта — Бера:

$$I = I_0 \exp(-a_\lambda LC),$$

где I_0 — интенсивность излучения инфракрасного источника до прохождения через вещество; I — интенсивность излучения инфракрасного источника после прохождения через вещество; a_λ — коэффициент поглощения для излучения с длиной волны λ; L — оптический путь; C — концентрация вещества [6, 7].

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Метод турбулентных пульсаций. Одним из наиболее теоретически обоснованных методов мониторинга концентраций CO_2 и H_2O в атмосферном воздухе является метод турбулентных пульсаций (Eddy covariance method), заключающийся в расчете потоков парниковых газов. Турбулентный поток газа определяется как произведение средней плотности воздуха ρ_a, ковариации вертикальной компоненты скорости ветра w и отношения плотности газа к плотности воздуха s:

$$F \approx \langle \rho_a \rangle \cdot \langle w's' \rangle,$$

где ρ_a — средняя плотность воздуха; w' — мгновенное отклонение от среднего значения скорости ветра; s' — мгновенное отклонение от среднего значения плотности воздуха [8].

Для реализации метода турбулентных пульсаций в составе эколого-климатической станции необходимо использовать трехосевой ультразвуковой анемометр для измерения скоростей ветра по трем осям, высокочастотный NDIR-газоанализатор для измерения концентраций CO_2 и H_2O в атмосферном воздухе, а также дополнительные датчики таких физических параметров как: температура, влажность и давление [9, 10].

Результаты. В рамках настоящей статьи был разработан NDIR-газоанализатор с принципиально новой схемой генерации дискретного инфракрасного излучения, основанной на широтно-импульсной модуляции сигнала (рис. 2). Частота измерений газоанализатора составляет 10 Гц.

Для расчета чувствительности разработанного устройства и газоанализатора LI-7500A был проведен 30-минутный эксперимент по записи данных о концентрациях парниковых газов (рис. 3, 4).

Затем из кривой сигнала вычитается сглаженная кривая и рассчитывается чувствительность приборов (σ_{CO_2} и σ_{H_2O}), посредством вычисления среднего квадратического отклонения (СКО) от полученного итогового временного ряда (шума) (см. таблицу).

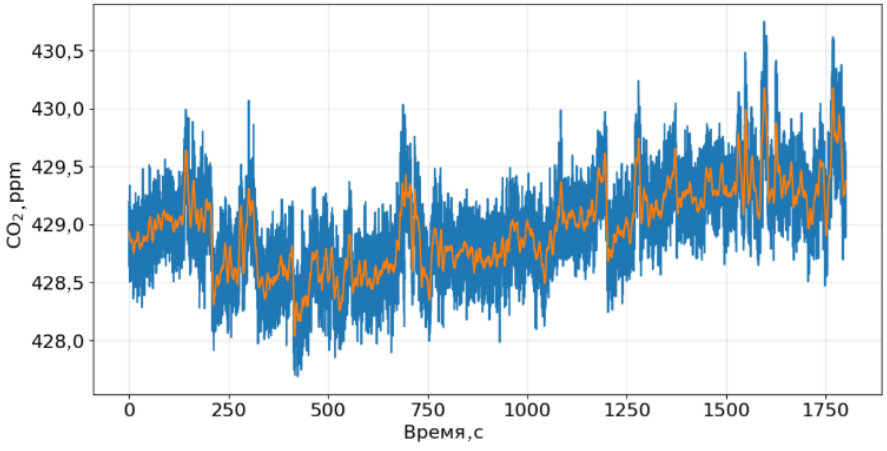


Рис. 2. Эколого-климатическая станция:
1 — разработанный NDIR газоанализатор;
2 — трехосевой ультразвуковой анемометр;
3 — газоанализатор LICOR LI-7500A

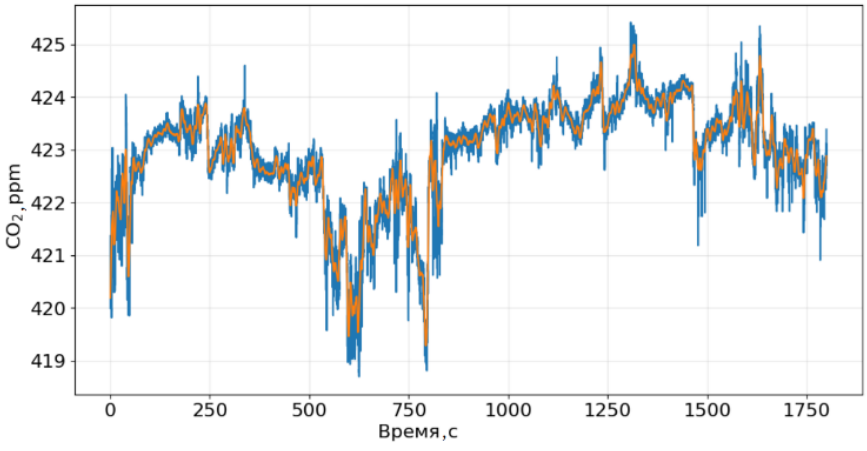
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

СКО шума в ppm разработанного NDIR газоанализатора и LI-7500A

№ п/п	СКО шума, ppm	Разработанный NDIR-газоанализатор	LI-7500A
1	σ_{CO_2}	0,2010	0,2202
2	σ_{H_2O}	17,5469	11,9790



а

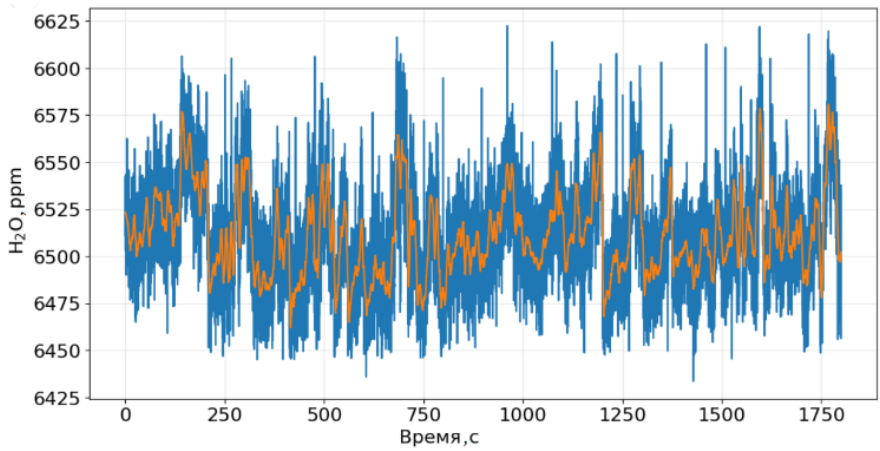


б

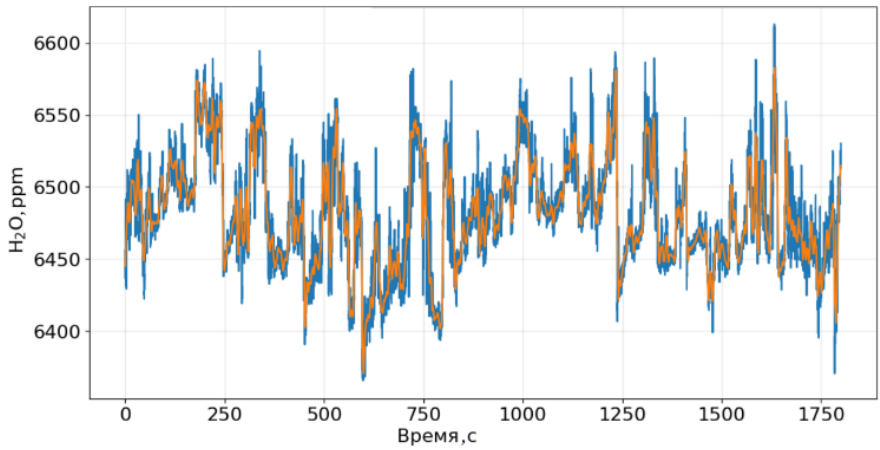
Рис. 3. Временные ряды изменения концентрации CO_2, полученные с помощью:

а — разработанного газоанализатора; *б* — газоанализатора LI-7500A (*синим* — концентрации CO_2, *оранжевым* — кривая, сглаженная с помощью фильтра Савицкого — Голая с окном 100)

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026



а



б

Рис. 4. Временные ряды изменения концентрации H_2O, полученные с помощью:

а — разработанного газоанализатора; *б* — газоанализатора LI-7500A (*синим* — концентрации H_2O, *оранжевым* — кривая, сглаженная с помощью фильтра Савицкого — Голая с окном 100)

Экспериментальные данные с эколого-климатической станции формируются в архивы с расширением .ghg. Для расчета потоков CO_2 и H_2O эти данные обрабатываются с помощью программного обеспечения EddyPro компании LI-COR. Потоки CO_2 и H_2O, рассчитанные с усреднением по 30 мин на точку, представлены на рис. 5 и 6.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

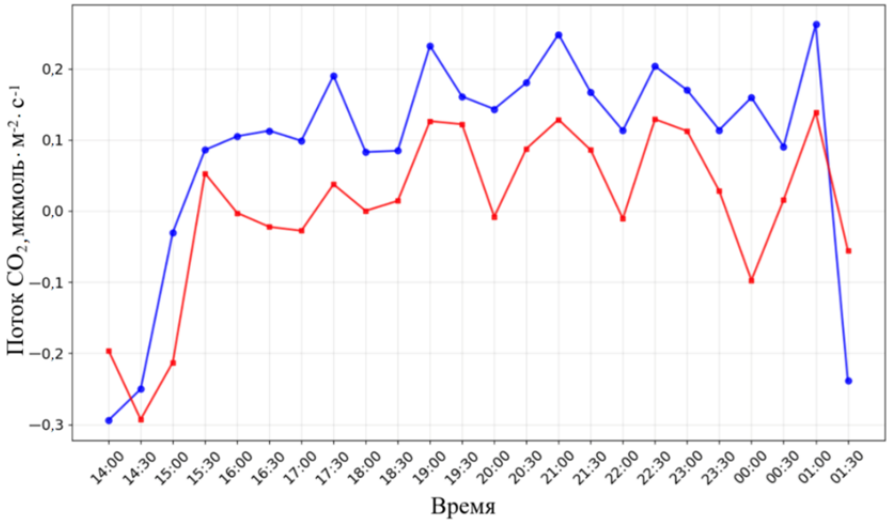


Рис. 5. Рассчитанные потоки CO_2, полученные по измерениям разработанного газоанализатора (*синяя кривая*) и газоанализатора LI-7500A (*красная кривая*). Корреляция значений потоков 0,82

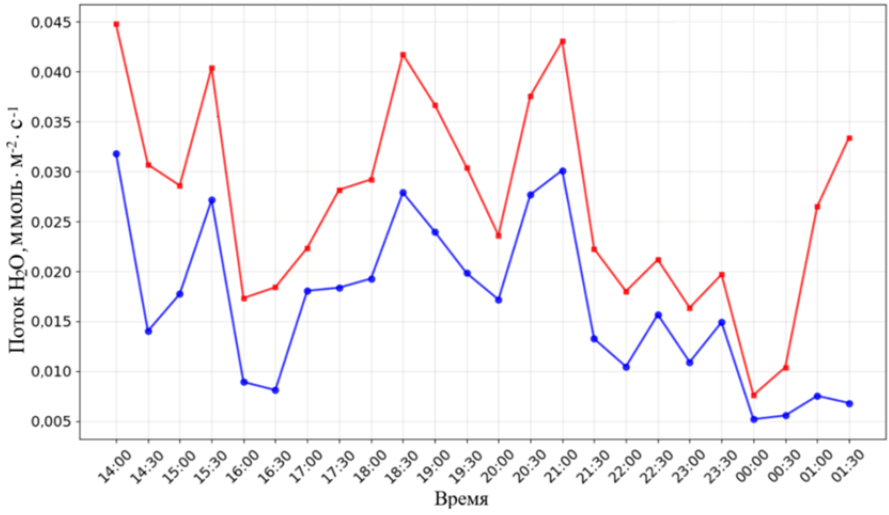


Рис. 6. Потоки H_2O, полученные по измерениям разработанного газоанализатора (*синяя кривая*) и газоанализатора LI-7500A (*красная кривая*). Корреляция значений потоков 0,86

Выводы. Среднее квадратическое отклонение шума разработанного NDIR-газоанализатора по CO_2 составляет 0,2010 ppm, по H_2O — 17,5469 ppm, что является сопоставимыми значениями по сравнению с LI-7500A, СКО шу-

ма которого составляет 0,2202 ppm по CO_2 и 11,9790 ppm по H_2O. Экспериментально полученные потоки углекислого газа и водяного пара показывают высокую корреляцию с данными газоанализатора LI-7500A — 0,82 и 0,86 соответственно, что говорит о применимости разработанного NDIR-газоанализатора в составе эколого-климатической станции.

Также характерным отличием разработанного NDIR-газоанализатора является принципиально новая схема модуляции инфракрасного излучения, заключающаяся в широтно-импульсной модуляции питания инфракрасного излучателя.

Литература

[1] Soeder D.J. *Greenhouse Gas and Climate Change. In: Energy Futures: The Story of Fossil Fuel, Greenhouse Gas, and Climate Change*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 97–141. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83603-9_5

[2] Rotz C.A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 2018, vol. 101, no. 7, pp. 6675–6690. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13272

[3] Guo N., Chen F., He C. et al. Multi-year average water vapor characteristics and potential sources and transport pathways of intense water vapor during extreme precipitation events in the Ili River Valley, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, vol. 58, art. no. 102278. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102278

[4] Карпов И.А., Фуфурин И.Л., Винтайкин И.Б. и др. Разработка недиспергирующего инфракрасного газоанализатора для измерения динамики концентраций парниковых газов. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*, 2025, т. 14, № 1, с. 16–23. https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.1.2

[5] Fufurin I.L., Golyak I.S., Golyak I.S. et al. Non-Dispersive IR Gas Analyzer for Monitoring H_2O and CO_2 Fluxes by Eddy Covariance Method. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 674–680. https://doi.org/10.1134/S199079312570040X

[6] Kim Y., Goo S.-g., Lim J.S. Multi-Gas Analyzer Based on Tunable Filter Non-Dispersive Infrared Sensor: Application to the Monitoring of Eco-Friendly Gas Insulated Switchgears. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 22, art. no. 8662. https://doi.org/10.3390/s22228662

[7] Мальцев А.А. *Молекулярная спектроскопия: теория, практические работы, задачи*. Москва, Изд-во Московского университета, 1980, 272 с.

[8] Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А. и др. *Метод турбулентных пульсаций: краткое практическое руководство*. Москва, LI-COR Biosciences; ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016, 223 с.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

[9] Fufurin I., Karpov I., Kosterova A. et al. Non-Dispersive Gas Analyzer for H_2O and CO_2 Flux Analysis by the Eddy Covariance Method. *Sensors*, 2026, vol. 26, no. 2, art. no. 560. https://doi.org/10.3390/s26020560

[10] Arens E., Ghahramani A., Przybyla R. et al. Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 211, art. no. 109805. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109805

Поступила в редакцию 05.04.2026

Карпов Иван Александрович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Костерова Алиса Павловна — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Бессонов Вячеслав Романович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Фуфурин Игорь Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: igfil@mail.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Карпов И.А., Костерова А.П., Бессонов В.Р. Разработка NDIR газоанализатора: инженерная реализация и испытания. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 5 (106). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/eco/iog/1126.html

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

DEVELOPMENT OF AN NDIR GAS ANALYZER: ENGINEERING IMPLEMENTATION AND TESTING

I.A. Karpov karpov@bmstu.ru
SPIN-code: 8706-6218

A.P. Kosterova kosterovaa2002@mail.ru
SPIN-code: 3995-7745

V.R. Bessonov bessonov.v@bmstu.ru
SPIN-code: 8522-4851

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

One of the most significant tasks of modern environmental monitoring is the rapid and highly accurate monitoring of changes in greenhouse gas concentrations, such as water vapor and carbon dioxide, in the atmosphere. This article presents an engineering implementation of the NDIR (Non-dispersive infrared) gas analyzer with an innovative discrete infrared radiation generation scheme based on pulse width signal modulation. Among other things, it describes the testing of the developed device as part of an ecological and climatic station at the Bauman Moscow State Technical University training base in the village of Kamshilovka (Moscow region) in combination with a three-axis ultrasonic anemometer for the implementation of the turbulent pulsation method.

Keywords: greenhouse gases, environmental monitoring, NDIR gas analyzer, carbon dioxide, water vapor, eddy covariance method, carbon landfills, infrared spectroscopy

References

[1] Soeder D.J. *Greenhouse Gas and Climate Change. In: Energy Futures: The Story of Fossil Fuel, Greenhouse Gas, and Climate Change*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 97–141. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83603-9_5

[2] Rotz C.A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 2018, vol. 101, no. 7, pp. 6675–6690. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13272

[3] Guo N., Chen F., He C. et al. Multi-year average water vapor characteristics and potential sources and transport pathways of intense water vapor during extreme precipitation events in the Ili River Valley, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, vol. 58, art. no. 102278. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102278

[4] Karpov I.A., Fufurin I.L., Vintaykin I.B. et al. Razrabotka nedispersionnogo infrakrasnogo gazoanalizatora dlya izmereniya dinamiki kontsentratsiy parnikovykh gazov [Development of a non-dispersive infrared gas analyzer for measuring greenhouse gas concentration dynamics]. *Vestnik Natsionalnogo issledovatelskogo yadernogo universiteta "MIFI"*, 2025, vol. 14, no. 1, pp. 16–23. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.1.2

© BMSTU, 2026 ISSN 2541-8009

[5] Fufurin I.L., Golyak I.S., Golyak I.S. et al. Non-Dispersive IR Gas Analyzer for Monitoring H_2O and CO_2 Fluxes by Eddy Covariance Method. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 674–680. https://doi.org/10.1134/S199079312570040X

[6] Kim Y., Goo S.-g., Lim J.S. Multi-Gas Analyzer Based on Tunable Filter Non-Dispersive Infrared Sensor: Application to the Monitoring of Eco-Friendly Gas Insulated Switchgears. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 22, art. no. 8662. https://doi.org/10.3390/s22228662

[7] Maltsev A.A. *Molekulyarnaya spektroskopiya: teoriya, prakticheskie raboty, zadachi* [Molecular spectroscopy: theory, practical work, problems]. Moscow, Moscow University Press, 1980, 272 p. (In Russ.).

[8] Burba G.G., Kurbatova Yu.A., Kuricheva O.A. et al. *Metod turbulentnykh pulsatsiy: kratkoe prakticheskoe rukovodstvo* [Eddy covariance method: a brief practical guide]. Moscow, LI-COR Biosciences; A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, 2016, 223 p. (In Russ.).

[9] Fufurin I., Karpov I., Kosterova A. et al. Non-Dispersive Gas Analyzer for H_2O and CO_2 Flux Analysis by the Eddy Covariance Method. *Sensors*, 2026, vol. 26, no. 2, art. no. 560. https://doi.org/10.3390/s26020560

[10] Arens E., Ghahramani A., Przybyla R. et al. Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 211, art. no. 109805. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109805

Received 05.04.2026

Karpov I.A. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Kosterova A.P. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Bessonov V.R. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — I.L. Fufurin, Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: igfil@mail.ru

Please reference this article as follows:
Karpov I.A., Kosterova A.P., Bessonov V.R. Development of an NDIR gas analyzer: engineering implementation and testing. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 5 (106). (In Russ.). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/eco/iog/1126.html

 © BMSTU, 2026