

УДК 535

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДА ПО ОСУШЕНИЮ ПРОБЫ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА ЧЕЛОВЕКОМ

*И.А. Карнов\*, И.Л. Фуфурин, О.А. Небритова, П.П. Демкин, Д.Р. Анфимов*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия*

*\*e-mail : [Ivan123121@mail.ru](mailto:Ivan123121@mail.ru)*

Поступила в редакцию: 27.09.2023

После доработки: 27.09.2023

Принята к публикации: 10.10.2023

В настоящий момент 6 % людей от всего населения планеты больны сахарным диабетом обоих типов, а 4 % – бронхиальной астмой. Прогнозируется, что количество людей с этими заболеваниями будет расти с каждым годом. Большой процент от всех страдающих вышеупомянутыми заболеваниями – дети. Актуальной задачей является разработка неинвазивного метода диагностирования диабета первого и второго типов, астмы и других болезней. Разработан подход для подготовки проб выдыхаемого человеком воздуха для их последующего анализа с помощью метода, основанного на инфракрасной лазерной спектроскопии. Применяемый метод подробно описан в данной работе. С помощью установки, основанной на инфракрасном квантово-каскадном лазере, проводится анализ спектров пропускания выдыхаемого человеком воздуха. По полученным спектрам можно рассчитать концентрации веществ-биомаркеров, отклонение от нормы которых связано с развитием у пациента определенных заболеваний или патологий. В данной работе проведен анализ таких существующих типов осушителей воздуха, как например, капиллярная колонка, криоловушка, адсорбционные осушители и др. В качестве наиболее оптимального решения для использования в экспериментальной установке с инфракрасным квантово-каскадным лазером был выбран нафионовый осушитель. По результатам исследований спектров выдыхаемого воздуха пациентов, с заранее известными поставленными диагнозами, был разработан и описан метод осушения пробы выдыхаемого человеком воздуха, а также была рассчитана абсолютная влажность осушенной пробы выдыхаемого воздуха.

*Ключевые слова:* выдыхаемый воздух, нафионовый осушитель, инфракрасная спектроскопия, спектральный анализ.

**DOI:** 10.26583/vestnik.2023.271

### ВВЕДЕНИЕ

В приведенной работе объектом исследования является выдыхаемый человеком воздух. В рамках данного исследования проводились эксперименты с выдыхаемым воздухом пациентов Морозовской детской городской клинической больницы и Клиники детских болезней им. М.А. Хлудова. Также исследовались спектры воздуха больничных палат. С помощью экспериментальной установки, основанной на инфракрасном квантово-каскадном лазере, проводится исследование спектров поглощения проб выдыхаемого воздуха для обнаружения в них веществ-биомаркеров. Данные о присутствии некоторых таких веществ, как ацетон, оксид азота и др., в выдыхаемом пациентом воздухе можно использовать для диагностирования таких заболеваний, как диабет, астма и т. д. [1–6].

Данная статья посвящена методике подготовки проб выдыхаемого человеком воздуха для их дальнейшего исследования, которое основывается на ИК-спектроскопии пропускания, а точнее на получении спектра выдыхаемого воздуха [7]. Необходимо точно определять спектральные линии веществ-биомаркеров, которые содержатся в малых концентрациях [8]. Проблемой, препятствующей спектральному анализу, является вода, содержащаяся в выдыхаемом воздухе. Известно, что у воды много спектральных линий в диапазоне, в котором находятся линии веществ-биомаркеров (рис. 1) [9].

При получении спектра неосушенной пробы спектральные линии воды препятствуют надежной идентификации и анализу веществ-биомаркеров. Именно поэтому перед проведением эксперимента необходимо провести осушку пробы.

## 1. МЕТОДЫ

### 1.1. Экспериментальная установка

Разработанная экспериментальная установка основана на квантово-каскадном лазере LaserTune компании «Block Engineering». Источник инфракрасного излучения перенастраиваемый лазер с внешним резонатором в конфигурации Литтроу и чипом квантово-каскадного лазера, имеющим широкий спектральный диапазон. Важным компонентом является дифракционная решетка, от угла поворота которой за-

висит длина волны испускаемого устройством излучения. Данный лазер позволяет работать с инфракрасным диапазоном излучения 5.3–12.8 мкм ( $770\text{--}1850\text{ см}^{-1}$ ). Средняя мощность лазера в этом спектральном диапазоне превосходит 0.5 мВт [10].

На рис. 2 представлена схема источника инфракрасного излучения LaserTune.

На рис. 3 представлена оптическая часть экспериментальной установки по изучению выдыхаемого человеком воздуха.

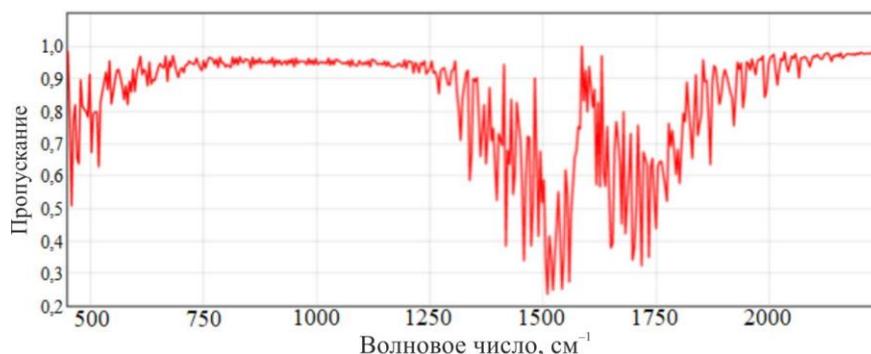


Рис. 1. Спектр пропускания воды по данным Национального института стандартов и технологий США (NIST) [9]

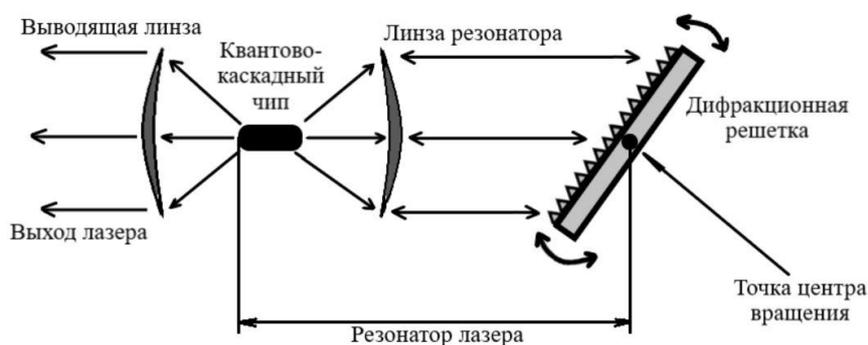


Рис. 2. Схема источника инфракрасного излучения лазера LaserTune

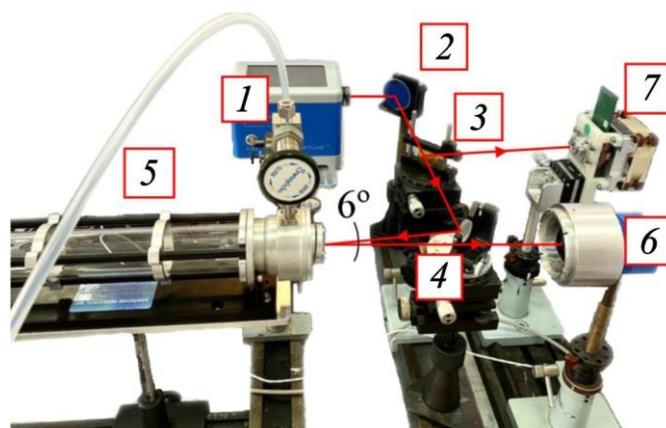


Рис. 3. Оптическая часть экспериментальной установки по изучению выдыхаемого человеком воздуха

Компоненты оптической части экспериментальной установки, представленной на рис. 3:

- 1 – инфракрасный квантово-каскадный лазер LaserTune;
- 2 – зеркало;
- 3 – светоделительная пластина из селенида цинка (ZnSe);
- 4 – зеркало;
- 5 – многоходовая газовая кювета Эрриота;
- 6 – сигнальное фотоприемное устройство;
- 7 – опорное фотоприемное устройство.

Испускаемый лазерный пучок квантово-каскадного лазера отражается от зеркала и разделяется светоделительной пластиной: 80 % излучения проходит через пластину и 20 % отражается на опорное фотоприемное устройство. Основной лазерный пучок после прохождения светоделительной пластины отражается от второго зеркала и попадает в многопроходную газовую кювету Эрриота, в которую закачан выдыхаемый человеком воздух. С помощью системы зеркал кюветы луч лазера преодолевает расстояние в 76 м и выходит из нее под углом в  $6^\circ$  к направлению входа луча в кювету. После прохождения предыдущих этапов луч лазера падает на сигнальное фотоприемное устройство. Затем информация об излучении, падающем на опорный и сигнальный фотоприемник, обрабатывается, и по полученным данным строятся спектры пропускания выдыхаемого человеком воздуха.

В газовую кювету закачивается 1–2 л выдыхаемого человеком воздуха. Для обнаружения веществ-биомаркеров в пробе воздуха их предельная теоретическая концентрация должна быть порядка нескольких ppb.

## 1.2. Подготовка пробы выдыхаемого человеком воздуха

### 1.2.1. Теоретически изученные виды осушителей воздуха

1.2.1.1. *Криоловушка*. Принцип работы ловушки: в процессе создания остаточного давле-

ния в испытываемой емкости образуются пары веществ, которые на пути в вакуумный насос оседают на внутренней колбе ловушки за счет низких температур, что исключает их попадание в сам насос. В качестве рабочего вещества в таком типе осушителей используется азот, фреон и другие хладагенты.

1.2.1.2. *Адсорбционные осушители*. Принцип работы типичного адсорбционного осушителя: пары влаги потребляются твердой поверхностью адсорбента. В качестве адсорбента используются силикагель, активный оксид алюминия и др.

1.2.1.3. *Капиллярная колонка*. Принцип работы капиллярной колонки: на внутренней поверхности трубки, по которой с большой скоростью движется инертный газ с анализируемым веществом, нанесена тонким слоем неподвижная фаза, что позволяет анализировать многокомпонентные смеси.

Описанные выше типы осушителей (1.2.1.1–1.2.1.3) используются для подготовки газообразных проб для исследования методами газовой хроматографии, масс-спектрометрии, ИК-фурье-спектроскопии и др. Эти осушители не подходят для использования в ранее упомянутой экспериментальной установке по таким причинам, как: высокая стоимость расходных материалов и обслуживания, недостаточное осушение пробы, большие интервалы времени между экспериментами из-за подготовки оборудования, потенциальное уменьшение концентраций веществ-биомаркеров из-за агрессивного способа осушения, большие размеры и др. [11–13].

1.2.1.4. *Нафионовый осушитель*. Для целей, преследуемых в этой работе, подходит нафионовый осушитель серии MD фирмы Perma Pure. Данный осушитель был выбран из-за компактных размеров, простоты в обслуживании между циклами, бережного способа осушения [14]. Схема газовых потоков и внешний вид осушителя представлены на рис. 4 слева и справа, соответственно.

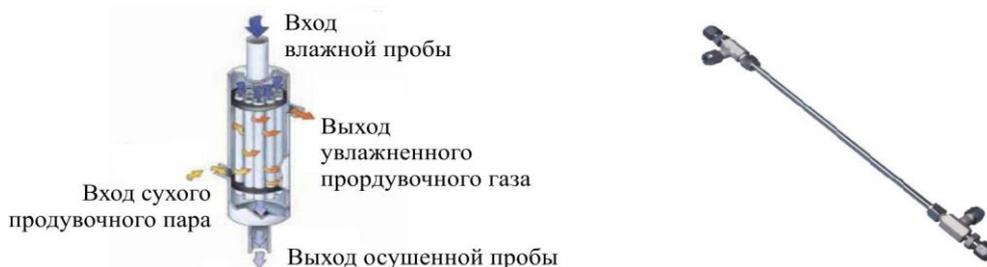


Рис. 4. Схема газовых потоков (слева) и внешний вид нафионового осушителя (справа)

Осушители такого типа представляют собой конструкцию из двух трубок, одна из которых находится внутри другой, подобно теплообменнику. Влажный газ (выдыхаемый человеком воздух) движется по нафионовой внутренней трубке, омываемой сухим газом (в случае вышеописанной экспериментальной установки – азотом). Внешняя трубка состоит из инертных материалов, а внутренняя – из нафионового полимера. Движущей силой процесса является разность в парциальном давлении этих двух потоков. Молекулы водяного пара адсорбируются на стенках внутренней трубки из нафиона и проходят через них в поток азота [15–16]. Для определения расхода чистого газа, который необходим для реализации метода разделения пробы, можно воспользоваться формулой (1),

где  $V_p$  – расход азота;  $V_s$  – расход пробы выдыхаемого человеком воздуха;  $P_s$  – давление пробы;  $P_v$  – давление азота:

$$V_p = V_s / (P_s / 2P_v) - 1. \quad (1)$$

### 1.2.2. Разработанный подход по осушению пробы выдыхаемого человеком воздуха

На рис. 5 представлена схема части экспериментальной установки, отвечающей за подготовку пробы выдыхаемого человеком воздуха и газораспределение азота и самой пробы. Стрелками разных цветов показаны пути, которые проходят потоки азота и пробы выдыхаемого воздуха.

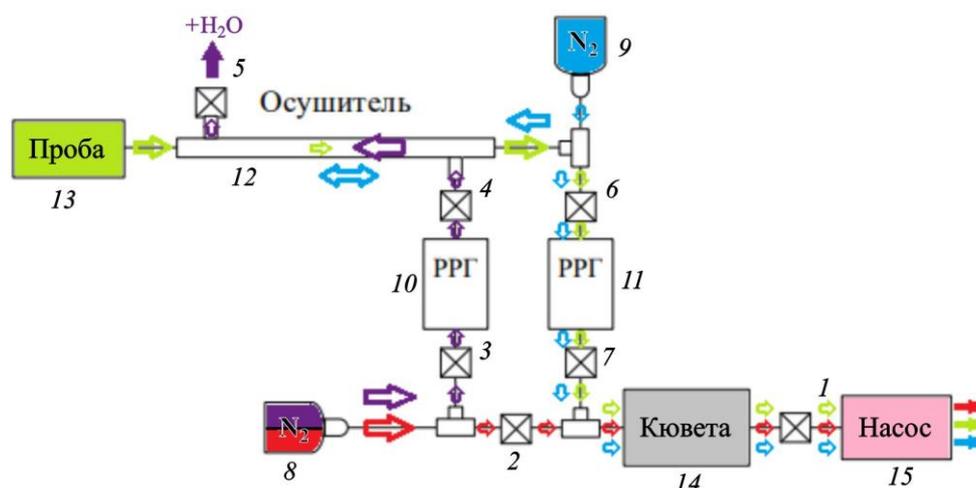


Рис. 5. Схема газораспределения при пробоподготовке

Компоненты газовой части экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 5:

- игольчатый вентиль 1–7;
- баллон с газообразным азотом 8, 9;
- распределитель расхода газа 10, 11;
- нафионовый осушитель 12;
- тедларовый пакет с пробой выдыхаемого человеком воздуха 13;
- многоходовая газовая кювета 14;
- вакууматор 15.

Из газового баллона по пути 8→3→10→4→12→5 течет азот, навстречу азоту в осушителе (12) течет проба воздуха по пути 13→12→6→11→7→14→1→15, при этом, благодаря нафионовому осушителю, молекулы воды переходят в азот и вместе с ним выходят в атмосферный воздух. Осушенная проба накачивается в кювету до достижения давления, равного атмосферному. Проба накачивается в те-

чение 20–30 мин. После получения и сохранения спектральных данных пробы, она откачивается насосом 15 в атмосферный воздух. Для исследования выдыхаемого воздуха людей, страдающих болезнями, которые передаются воздушно-капельным путем, необходимо дополнительно очищать пробу на выходе, для безопасности проведения экспериментов.

В данной работе эксперименты с такими болезнями не проводились. Между экспериментами газовая система установки очищается азотом по путям 8→2→14→1→15 и 9→12, 6→11→7→14→1→15.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментально было получено среднее значение абсолютной влажности осушенной пробы воздуха выбранным нафионовым осушителем на примере нескольких экспериментов

при температуре воздуха 30 °С и относительной влажности 34 % для нескольких спектральных линий с помощью закона Бугера–Ламберта–Бера [17]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-a_\lambda lc). \quad (2)$$

где  $I$  – интенсивность излучения, прошедшего через среду (пробу воздуха);  $I_0$  – интенсивность падающего на вещество излучения;  $a_\lambda$  – коэффициент поглощения среды для данной длины волны  $\lambda$ ;  $l$  – оптический путь;  $c$  – концентрация вещества.

Из закона Бугера-Ламберта-Бера выразим пропускание (формула 3).

$$\tau = I/I_0. \quad (3)$$

Также из этого закона следует соотношение для степени осушения:

$$C_1/C_2 = \ln(\tau_1)/\ln(\tau_2), \quad (4)$$

где  $C_1$  – концентрация воды в неосушенной пробе воздуха;  $C_2$  – в осушенной.

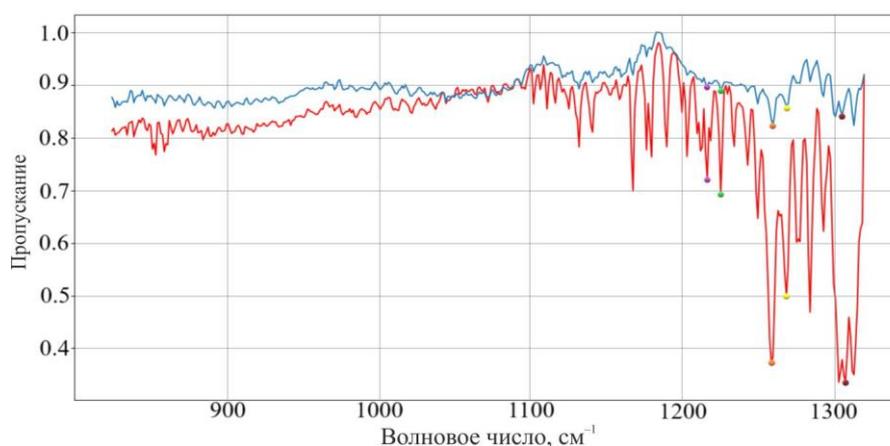
На рис. 6 представлены спектры пропускания пробы комнатного воздуха до (красным) и

после (синим) осушения для первого эксперимента.

После проведения экспериментов были построены соответствующие им графики, на каждом из которых было выбрано пять точек. По этим точкам с помощью формулы (4) было рассчитано, во сколько раз становится меньше абсолютная влажность пробы воздуха после осушения нафионовым осушителем. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Осушение пробы нафионовым осушителем для пяти выбранных точек с доверительной вероятностью  $P = 0.9$

Волновое число, см <sup>-1</sup>	Во сколько раз стала меньше абсолютная влажность пробы воздуха
1218	3.02±0.3
1225	3.16±0.33
1258	5.13±0.14
1271	4.17±0.51
1307	6.41±0.31



**Рис. 6.** Спектры пропускания пробы комнатного воздуха в одном из экспериментов

В среднем абсолютная влажность пробы уменьшилась в  $4.38 \pm 0.28$  раза. Для более понятного представления данных получим значение абсолютной влажности пробы после осушения. Плотность насыщенных паров воды при 30 °С:  $\rho_0 = 30.30$  г/м<sup>3</sup>. В соответствии с формулой (5) для относительной влажности  $\varphi$  рассчитаем абсолютную влажность воздуха:

$$\varphi = \rho/\rho_0 \cdot 100 \%. \quad (5)$$

В результате вычислений, абсолютная влажность воздуха  $\rho = 10.30$  г/м<sup>3</sup>. В соответствии с уменьшением абсолютной влажности, проба

воздуха осушилась до содержания воды  $2.40 \pm 0.10$  г/м<sup>3</sup>.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что нафионовый осушитель подходит для пробоподготовки выдыхаемого человеком воздуха. Малое значение абсолютной влажности после осушения проб воздуха позволяет исследовать их методами инфракрасной спектроскопии. Разработанную экспериментальную установку и метод ее использования можно применять для

диагностирования у пациентов таких заболеваний, как астма, сахарный диабет первого и второго типов и других болезней, при которых в выдыхаемом человеком воздухе содержатся вещества-биомаркеры, имеющие линии в инфракрасном спектре пропускания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fufurin I., Berezanskiy P., Golyak I., Anfimov D., Kareva E., Scherbakova A. Morozov A.* Deep Learning for Type 1 diabetes mellitus diagnosis using infrared quantum cascade laser spectroscopy // *Materials*. 2022. V. 15. № 9. P. 2984. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15092984>.
2. *Tabalina A. S., Anfimov D. R., Fufurin I. L., Golyak I. S.* Infrared quantum cascade laser spectroscopy as non-invasive diagnostic tests for human diseases // *Biomedical Spectroscopy, Microscopy, and Imaging*, 2020. V. 11359. P. 233–242. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2555042>.
3. *Das S., Pal S., Mitra M.* Significance of exhaled breath test in clinical diagnosis: a special focus on the detection of diabetes mellitus // *Journal of medical and biological engineering*, 2016. V. 36. P. 605–624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40846-016-0164-6>.
4. *Kharitonov S.A., Barnes P.J.* Exhaled biomarkers // *Chest*, 2006. V. 130. № 5, P. 1541–1546. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.130.5.1541>.
5. *Righettoni M., Tricoli A., Pratsinis S.E.* Si: WO3 sensors for highly selective detection of acetone for easy diagnosis of diabetes by breath analysis // *Analytical chemistry*, 2010. V. 82. № 9. P. 3581–3587. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac902695n>.
6. *Голяк И.С., Бережанский П.В., Седова А.Ю., Гутырчик Т.А., Небритова О.А., Морозов А.Н., Anfimov Д.Р., Винтайкин И.Б., Коноплева А.А., Демкин П.П., Фуфурин И.Л.* Применение машинного обучения для диагностики некоторых социально значимых заболеваний по выдыхаемому человеком воздуху методом инфракрасной лазерной спектроскопии // *Оптика и спектроскопия*, 2023. Т. 131. № 6. С. 825–831. DOI: <https://doi.org/10.21883/OS.2023.06.55917.109-23>.
7. *Anfimov D. R., Fufurin I. L., Golyak I. S., Morozov A.N.* Design of an analyzer based on a quantum cascade laser for substance identification by infrared reflected radiation // *Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI*, 2021. V. 11775. P. 115–122. SPIE. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2589238>.
8. *Davies S., Spanel P., Smith D.* Quantitative analysis of ammonia on the breath of patients in end-stage renal failure // *Kidney international*, 1997. V. 52(1). P. 223–228. DOI: <https://doi.org/10.1038/ki.1997.324>
9. *Chu P.M., Guenther F.R., Rhoderick G.C., Lafferty W.J.* The NIST quantitative infrared database // *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*. 1999. V. 104. № 1. P. 59–81. DOI: <https://doi.org/10.6028/jres.104.004>.
10. *Shcherbakova A.V., Anfimov D.R., Fufurin I.L., Golyak I.S., Trapeznikova I.A., Kareva E.R., Morozov A.N.* Experimental Setup Based on a Quantum Cascade Laser Tunable in the Wavelength Range of 5.3–12.8  $\mu\text{m}$  for Spectral Analysis of Human Exhaled Air // *Optics and Spectroscopy*, 2021. V. 129. iss.7. P. 830–837. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X21060151>.
11. *Михайлова С.М., Шарифуллина Л.П.* Оценка загрязнения воздуха высокотоксичными соединениями в зоне техногенных чрезвычайных ситуаций, связанных с возгоранием синтетических материалов // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*, 2020. Т. 2. № 45. С. 47–55.
12. *Соляк Л.* Разделение и идентификация изомерных углеводов методами капиллярной газовой хроматографии и сочетаниями ее с масс-спектрометрией и ИК-фурье-спектроскопией // *Российский химический журнал*, 2003. Т. 47. № 2. С. 51–69.
13. *Шерстов И.В., Пустовалова Р.В., Зенов К.Г.* Система сбора и подготовки проб выдыхаемого воздуха для медицинского лазерного оптико-акустического газоанализатора // *Оптика атмосферы и океана*, 2017. Т. 30. № 5. С. 435–441. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20170513>.
14. *Pleil J.D., Oliver K.D., McClenney W.A.* Enhanced performance of Nafion dryers in removing water from air samples prior to gas chromatographic analysis // *Ярса*, 1987. V. 37. № 3. P. 244–248. DOI: <https://doi.org/10.1080/08940630.1987.10466219>.
15. *Welp L.R., Keeling R.F., Weiss R.F., Paplawsky W., Heckman S.* Design and performance of a Nafion dryer for continuous operation at CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> air monitoring sites // *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013. V. 6. № 5. P. 1217–1226. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-6-1217-2013>.
16. *Ye X., LeVan M.D.* Water transport properties of Nafion membranes: Part I. Single-tube membrane module for air drying // *Journal of Membrane Science*, 2003. V. 221. iss. 1–2. P. 147–161. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00255-2).
17. *Мальцев А. А.* Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во Московского университета, 1980. 272 с.

## DEVELOPMENT OF AN APPROACH FOR DRYING HUMAN EXHAUST AIR SAMPLES

*I.A. Karpov\*, I.L. Fufurin, O.A. Nebritova, P.P. Demkin, D.R. Anfimov*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia*

*\*e-mail: [Ivan123121@mail.ru](mailto:Ivan123121@mail.ru)*

Received September 27, 2023; revised September 27, 2023; accepted October 10, 2023

Currently, 6 % of the total population of the planet has both types of diabetes mellitus, and 4% have bronchial asthma. It is predicted that the number of people with these diseases will increase every year. A large percentage of all those suffering from the above diseases are children. An urgent task is to develop a non-invasive method for diagnosing type 1 and type 2 diabetes, asthma and other diseases. An approach has been developed for preparing samples of human exhaled air for their subsequent analysis using a method based on infrared laser spectroscopy. The method used is described in detail in this work. Using an installation based on an infrared quantum cascade laser, the transmission spectra of human exhaled air are analyzed. From the obtained spectra, it is possible to calculate the concentrations of biomarker substances, deviations from the norm are associated with the development of certain diseases or pathologies in the patient. In this work, an analysis of existing types of air dehumidifiers was carried out, for example: capillary column, cryotrap, adsorption dehumidifiers, etc. A Nafion dehumidifier was chosen as the most optimal solution for use in an experimental setup with an infrared quantum cascade laser. Based on the results of studies of the spectra of exhaled air from patients with previously known diagnoses, a method for drying a sample of human exhaled air was developed and described, and the absolute humidity of the dried exhaled air sample was calculated.

*Keywords:* exhaled air, Nafion desiccant, infrared spectroscopy, spectral analysis

### REFERENCES

1. *Fufurin I., Berezhanskiy P., Golyak I., Anfimov D., Kareva E., Scherbakova A. Morozov A.* Deep Learning for Type 1 diabetes mellitus diagnosis using infrared quantum cascade laser spectroscopy. *Materials*, 2022. Vol. 15. No. 9. Pp. 2984. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15092984>.
2. *Tabalina A. S., Anfimov D. R., Fufurin I. L., Golyak I. S.* Infrared quantum cascade laser spectroscopy as non-invasive diagnostic tests for human diseases. *Bio-medical Spectroscopy, Microscopy and Imaging*, 2020. Vol. 11359. Pp. 233–242. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2555042>.
3. *Das S., Pal S., Mitra M.* Significance of exhaled breath test in clinical diagnosis: a special focus on the detection of diabetes mellitus. *Journal of medical and biological engineering*, 2016. Vol. 36. Pp. 605–624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40846-016-0164-6>.
4. *Kharitonov S.A., Barnes P.J.* Exhaled biomarkers. *Chest*, 2006. Vol. 130. No. 5. Pp. 1541–1546. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.130.5.1541>.
5. *Righettoni M., Tricoli A., Pratsinis S.E.* Si: WO<sub>3</sub> sensors for highly selective detection of acetone for easy diagnosis of diabetes by breath analysis. *Analytical chemistry*, 2010. Vol. 82. No. 9. Pp. 3581–3587. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac902695n>.
6. *Golyak I.S., Berezhansky P.V., Sedova A.Yu., Gutyrychik T.A., Nebritova O.A., Morozov A.N., Anfimov D.R., Vintaykin I.B., Konopleva A.A., Demkin P.P., Fufurin I.L.* Primenenie mashinnogo obucheniya dlya diagnostiki nekotoryh social'no znachimyh zabolevanij po vydyhaemomu chelovekom vozduhu metodom infrakrasnoj lazernoj spektroskopii. [Application of machine learning for the diagnosis of some socially significant diseases using the air exhaled by a person using infrared laser spectroscopy]. *Optics and Spectroscopy*, 2023. Vol. 131. No. 6. Pp. 825–831. DOI: <https://doi.org/10.21883/OS.2023.06.55917.109-23> (in Russian).
7. *Anfimov D.R., Fufurin I.L., Golyak I.S., Morozov A.N.* Design of an analyzer based on a quantum cascade laser for substance identification by infrared reflected radiation. *Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI*, 2021. Vol. 11775. Pp. 115–122. SPIE. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2589238>.
8. *Davies S., Spanel P., Smith D.* Quantitative analysis of ammonia on the breath of patients in end-stage renal failure. *Kidney international*, 1997. Vol. 52(1). Pp. 223–228. DOI: <https://doi.org/10.1038/ki.1997.324>.
9. *Chu P.M., Guenther F.R., Rhoderick G.C., Lafferty W.J.* The NIST quantitative infrared database. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 1999. Vol. 104. No. 1. Pp. 59–81. DOI: <https://doi.org/10.6028/jres.104.004>.
10. *Shcherbakova A.V., Anfimov D.R., Fufurin I.L., Golyak I.S., Trapeznikova I.A., Kareva E.R., Moro-*

zov A.N. Experimental Setup Based on a Quantum Cascade Laser Tunable in the Wavelength Range of 5.3–12.8  $\mu\text{m}$  for Spectral Analysis of Human Exhaled Air. *Optics and Spectroscopy*, 2021. Vol. 129. iss.7. Pp. 830–837. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X21060151>.

11. *Mikhailova S.M., Sharifullina L.R.* Ocenka zagryazneniya vozduha vysokotoksichnymi soedineniyami v zone tekhnogennyh chrezvychajnyh situacij, svyazannyh s vozgoraniem sinteticheskikh materialov. [Assessment of air pollution by highly toxic compounds in the zone of man-made emergency situations associated with the fire of synthetic materials]. *Scientific and educational problems of civil protection*, 2020. Vol. 2. No. 45. Pp. 47–55 (in Russian).

12. *Soyak L.* Razdelenie i identifikaciya izomernyh uglevodorodov metodami kapillyarnoj gazovoj hromatografii i sochetaniyami ee s mass-spektrometrije i IK-Fur'e-spektroskopiej [Separation and identification of isomeric hydrocarbons by methods of capillary gas chromatography and its combinations with mass spectrometry and IR-Fourier spectroscopy]. *Russian Chemical Journal*, 2003. Vol. 47. No. 2. Pp. 51–69 (in Russian).

13. *Sherstov I.V., Pustovalova R.V., Zenov K.G.* Sistema sbora i podgotovki prob vydyhaemogo vozduha

dlya medicinskogo lazernogo optiko-akusticheskogo gazoanalizatora. [System for collecting and preparing exhaled air samples for a medical laser optical-acoustic gas analyzer]. *Atmosphere and Ocean Optics*, 2017. Vol. 30. No. 5. Pp. 435–441. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20170513> (in Russian).

14. *Pleil J.D., Oliver K.D., McClenny W.A.* Enhanced performance of Nafion dryers in removing water from air samples prior to gas chromatographic analysis. *Japca*, 1987. Vol. 37. No. 3. Pp. 244–248. DOI: <https://doi.org/10.1080/08940630.1987.10466219>.

15 *Welp L.R., Keeling R.F., Weiss R.F., Paplawsky W., Heckman S.* Design and performance of a Nafion dryer for continuous operation at CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> air monitoring sites. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013. Vol. 6. No. 5. Pp. 1217–1226. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-6-1217-2013>.

16. *Ye X., LeVan M. D.* Water transport properties of Nafion membranes: Part I. Single-tube membrane module for air drying // *Journal of Membrane Science*, 2003. Vol. 221, iss. 1–2. Pp. 147–161. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00255-2).

17. *Maltsev A.A.* Molekulyarnaya spektroskopiya. [Molecular spectroscopy]. Moscow, Moscow University Publishing House, 1980. 272 p.