



ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

М.В. Волкодаева^{1,2}, А.А. Кольцов², С.Д. Тимин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», РФ, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

²ООО «Институт проектирования, экологии и гигиены», РФ, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9, лит. Б, пом. 17Н
E-mail: m.volkodaeva@yandex.ru

Указывается на потребности автоматизации контроля качества атмосферного воздуха. Оценивается зарубежный опыт по созданию и использованию дешевых малогабаритных датчиков для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Приводится таблица их сравнительных характеристик. Рассматриваются различные виды малогабаритных датчиков, к которым относятся датчики, использующие электрохимические и полупроводниковые сенсоры, представлены принципиальные схемы, сделаны выводы о достоинствах и недостатках описываемых датчиков. Делается вывод о необходимости развития малогабаритных датчиков для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в отечественном приборостроении.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, концентрации загрязняющих веществ, малогабаритные датчики, электрохимические сенсоры, полупроводниковые сенсоры.

Поступила в редакцию: 13.01.2023. После доработки: 23.01.2023.

Введение. В последние годы во всем мире вырос интерес органов власти, природопользователей, экологических активистов и населения к информации о качестве атмосферного воздуха. Это стимулирует производителей газоаналитического оборудования к созданию более экономичных и простых в эксплуатации решений. Разработка и апробация такого оборудования, начавшаяся в западных странах около двадцати лет назад, а в России – менее десяти, привели к появлению нового класса оборудования – малогабаритных датчиков определения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. На территории городов РФ, в настоящее время мониторинг атмосферного воздуха ведется далеко не во всех городах. По данным ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова» регулярная сеть государственной службы мониторинга загрязнения атмосферы на территории Российской Федерации в 2021 году состояла из 620 стационарных постов наблюдений загрязнения атмосферы, число контролируемых городов – 221 [1].

Существующая сеть мониторинга атмосферного воздуха является явно недостаточной с учетом увеличения антропогенной нагрузки на окружающую среду в целом, и на атмосферный воздух в том числе.

Автоматизация наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха с использованием непрерывных методов, в том числе с использованием малогабаритных датчиков, может позволить обеспечить повышение оперативности получения первичных данных о концентрациях загрязняющих веществ, снизить трудозатраты при измерениях, исключить ошибки, связанные с человеческим фактором при пробоотборе.

Целью исследования является рассмотрение возможности использования в РФ малогабаритных датчиков для измерения концентраций загрязняющих веществ при проведении наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха.

Материалы и методы. Проведение наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в соответствии с Федеральным Законом от 26.06.2008 № 102-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021)

«Об обеспечении единства измерений» [2] отнесено к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Указанные измерения должны выполняться по первичным референтным методикам (методам) измерений, референтным методикам (методам) измерений и другим аттестованным методикам (методам) измерений, за исключением методик (методов) измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений, с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку (статья 5).

Общие принципы построения системы мониторинга и методы наблюдений за загрязняющими веществами регламентированы нормативным документом РД52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы», утвержденным Госкомгидрометом и Минздравом СССР [3].

В России никаких дополнений к существующей нормативной базе, касающихся малогабаритных постов наблюдения за качеством атмосферного воздуха, на момент выхода настоящей публикации не было.

Понятие «малогабаритный датчик» в законодательно-нормативных документах РФ отсутствует, габариты средства измерений не нормированы.

Нормативные требования в странах ЕС к оборудованию этого класса сформулированы в Директиве ЕС 2008/50 [4].

Ход и результаты исследования. В первую очередь необходимо изучить классификации малогабаритных датчиков, так авторы в данной статье называют тип оборудования для измерения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, которые в европейских странах чаще обозначают, как «малобюджетные сенсоры».

Существующие виды сенсоров описаны в брошюре Европейской Комиссии «Air pollution with low-cost sensors», в которой приведена информация по электрохимическим, поверхностно-активным (полупроводниковым) и оптическим сенсорам [5].

Авторы постарались выделить достоинства и недостатки данных сенсо-

ров, которые представлены в табл. 1. Ниже описаны принципы работы некоторых сенсоров (малогабаритных датчиков) и представлены принципиальные схемы.

Электрохимические сенсоры. На рис. 1 изображена схема электрохимического сенсора, принцип работы которого основан на химической реакции между газами в воздухе и электролитом внутри датчика. Контролируемый газ через противопылевой фильтр (также выполняющий функцию селективного фильтра) и гидрофобную мембрану диффундирует на измерительный электрод, произведенный из благородного металла. Высвобождающиеся электроны проходят через электролит и эталонный электрод, и формируют во внешней цепи сигнал постоянного тока, величина которого, прямо пропорциональна концентрации детектируемого газа [6, 7].

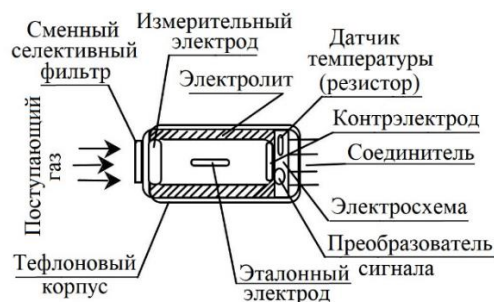


Рис. 1. Схема электрохимического сенсора
Fig. 1. Scheme of an electrochemical sensor

Полупроводниковые сенсоры. На рис. 2 изображена схема полупроводникового сенсора. Основную роль играет полупроводник с металлоксидным напылением, сопротивление которого меняется при контакте с газом. Датчик состоит из нагревательной спирали и проводника, нанесенного на трубку из глинозёма, а по краям трубки находятся контакты из драгоценного металла, предназначенные для измерения сопротивления. При попадании газа на поверхность датчика он окисляется, что приводит к уменьшению электрического сопротивления, которое преобразуется в концентрацию [8, 9].

Monitoring systems of environment No 1 (51) 2023

Таблица 1. Контролируемые вещества, достоинства и недостатки видов сенсоров (малогабаритных датчиков)

Вид сенсора	Контролируемые вещества	Достоинства	Недостатки
Электрохимические сенсоры	NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , NO, CO	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошая чувствительность, от мг/м³ до мкг/м³; • Быстрота отклика (30-200 секунд) 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая чувствительность к колебаниям температуры и влажности (изменению метеорологических условий) в зависимости от электролита; • Низкая селективность (проявляет перекрестную реактивность с аналогичными типами молекул)
Полупроводниковые сенсоры	NO ₂ , O ₃ , CO	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошая чувствительность, от мг/м³ до мкг/м³. 	<ul style="list-style-type: none"> • На результаты влияют колебания температуры и влажности. • Длительное время отклика (5-50 минут). • Наблюдается «эффект памяти». • Нестабильность показаний
Фотоионизационный детектор	ЛОС	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошая чувствительность, до мг/м³, некоторые до мкг/м³; • Ограниченная зависимость от температуры и влияния влажности; • Очень быстрое время отклика (несколько секунд) 	<ul style="list-style-type: none"> • Неселективность - реагирует на все ЛОС, которые могут быть ионизированы ультрафиолетовой лампой; • Значительный дрейф сигнала.
Оптический счетчик частиц	Мелкодисперсные фракции пыли	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрое время отклика (1 с); • Чувствительность в диапазоне 1 мкг/м³; • Возможность определить размер частицы (PM10, PM2.5). 	<ul style="list-style-type: none"> • Преобразование количества частиц в массу ТЧ основано на теоретической модели. • Измеряемый сигнал зависит от множества параметров, таких как форма частиц, цвет и плотность, влажность, показатель преломления и т.д.).

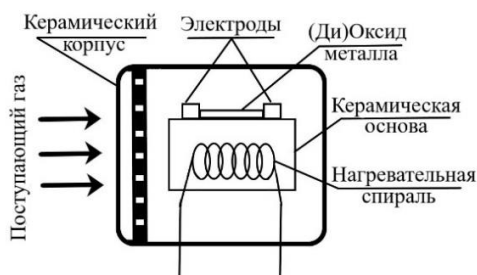


Рис. 2. Схема полупроводникового сенсора
Fig. 2. Scheme of a semiconductor sensor

Фотоионизационный детектор. На рис. 3 изображена схема фотоионизационного детектора (ФИД), принцип работы которого основан на следующих действиях: газ попадает в ионизационную камеру, где подвергается воздействию УФ-света, что приводит к потере газом электронов, с последующим генерированием катионов. Электроны и катионы, притягиваясь катодом и анодом, возбуждают электрический ток, который пропорционален значению концентрации. В ФИД, как правило, используют УФ-лампы с энергией 10,6 эВ или 11,7 эВ, для ионизации фотонов с энергией выше энергии данного конкретного газа [10, 11].

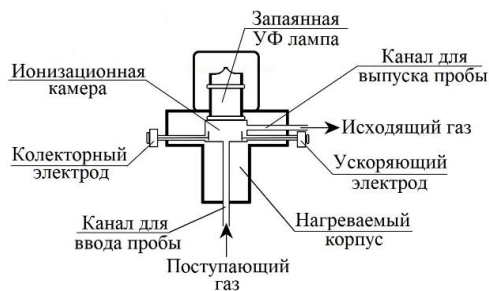


Рис. 3. Схема фотоионизационного детектора
Fig. 3. Scheme of a photoionization detector

Оптический счетчик частиц. На рис. 4 изображена схема инфракрасного (оптического) счетчика частиц, процесс работы которого основан на эффекте поглощения газами инфракрасных лучей, где каждый из этих газов имеет определенный спектр поглощения. Сенсорная часть газоанализатора состоит из источника ИК-света и датчика, между которыми находятся измерительная

ячейка и оптический фильтр. Поступая в измерительную ячейку, газ поглощает инфракрасный свет, а датчик фиксирует снижение интенсивности поступающего ИК-света и на основе калибровочной кривой, и генерирует выходной сигнал, который пропорционален значению концентрации [12, 13].

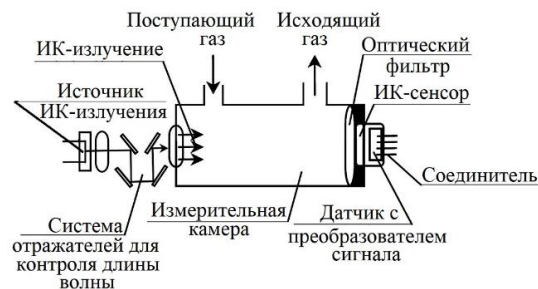


Рис. 4. Схема оптического счетчика частиц
Fig. 4. Schema of the optical particle counter

Полученные результаты. В связи с растущим интересом как населения, так и органов власти к информации о качестве атмосферного воздуха, происходит развитие газоаналитического оборудования, его модернизация, минимизация размеров и удешевление. В западных странах это привело к расширению сети мониторинга и в результате понятие «малобюджетные сенсоры» закрепилось на законодательном уровне, что выразилось в создании нормированных документов по данному типу оборудования.

На территории России сеть экологического мониторинга развита не во всех городах, а с помощью данного типа датчиков её также можно было расширить, как это случилось ранее в западных странах. Однако на данный момент нормативной базы по данному вопросу и понятия «малогабаритный датчик» в российском законодательстве не существует.

Технология сенсорных датчиков находится в стадии развития и к настоящему времени имеется недостаточно информации о качестве данных, которые вырабатывают сенсоры. При этом выявлены и явные преимущества малогабаритных датчиков, в первую очередь, хорошая чувствительность. Данные работы являются актуальными, которые требуют дальнейших исследований и развития.

Заключение. Использование малогабаритных датчиков в РФ находится на зачаточном уровне, однако с каждым годом увеличивается количество таких малогабаритных постов загрязнения атмосферного воздуха.

Применение обсуждаемых датчиков в настоящее время возможно в рамках учебных программ для популяризации вопросов охраны атмосферного воздуха, а также в исследовательских целях, в т.ч. для предварительной оценки качества атмосферного воздуха; проектирования/оптимизации сети постов наблюдения; мониторинга качества воздуха на территориях, где не существует риска превышения предельно допустимых значений; определения территорий с однородным качеством воздуха; предварительной оценки загрязнения вблизи точечных источников (дорожное движение, промышленность).

Авторы предлагают в первую очередь ввести нормативное понятие такому виду газоаналитического оборудования, например – «малогабаритный датчик», и определить критерии и параметры, на основе которых следует проводить сравнения оборудования данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ежегодник. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 год* / СПб: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2022. 220 с URL: <https://clck.ru/33FaxF> (дата обращения: 12.01.2023).

2. *Об обеспечении единства измерений*: Закон РФ от 26 июня 2008 г. (в ред. ФЗ от 11 июня 2021 г. № 102-ФЗ) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 27.12.2022).

3. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы*. РД 52.04.186-89. Л.: Гидрометеоздат. 1991. 693 с.

4. *Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза № 2008/50/ЕС от 21 мая 2008 г. о качестве атмосферного воздуха и мерах его очистки в Европе*. [Текст] URL:

<https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/04/Директива-Европейского-Парламента-и-Совета-Европейского-Союза-N-2008-50.pdf> (дата обращения: 27.12.2022).

5. *Air pollution with low-cost sensors*. URL: <https://www.bcs.org/media/4698/low-cost-pm-sensors-florentin-bulot.pdf> (дата обращения: 27.12.2022).

6. *Haleh N., Aashish J., Jaewoo P., Arezoo E. Advanced Micro- and Nano-Gas Sensor Technology: A Review*. // *Sensors*. Marth 2019. V. 19. No. 6 (1285).

7. *Ashfaq M., Khan M., Rao M., Li Q. Recent Advances in Electrochemical Sensors for Detecting Toxic Gases: NO₂, SO₂ and H₂S*. // *Sensors*. February 2019. V. 19. No. 4 (905).

8. *Peterson P., Aujla A., Grant K., Brundle A., Thompson Martin., Vande H.J., Leigh R. Practical Use of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors for Measuring Nitrogen Dioxide and Ozone in Urban Environments*. // *Sensors*. July 2017. V. 17. No. 7 (1653).

9. *Zhang C., Luo Y., Debliquy M. Room temperature conductive type metal oxide semiconductor gas sensors for NO₂ detection*. // *Sensors and Actuators A: Physical*. April 2019. V. 289. P. 118–133.

10. *Zhu H., She J., Zhou M., Fan X. Rapid and sensitive detection of formaldehyde using portable 2-dimensional gas chromatography equipped with photoionization detectors*. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. Marth 2019. V. 283. P. 182–187.

11. *Hori H., Ishimatsu S., Fueta Y., Hinoue M., Ishidao T. Comparison of sensor characteristics of three real-time monitors for organic vapors*. // *Journal of occupational health*. 2015. V. 57. No. 1. P. 13–19.

12. *Bogue, R. Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies*. // *Sensor Review*. Marth 2015 V. 35. No. 2. P. 133–140

13. *Benoit W., Hummelgård C., Bryzgalov M., Rödjegård H., Martin H., Schröder S. Compact Non-Dispersive Infrared Multi-Gas Sensing Platform for Large Scale Deployment with Sub-ppm Resolution*. // *Atmosphere*. November 2022. V. 13. No. 11 (1789).

ON THE USE OF SMALL-SIZED SENSORS FOR THE ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION

M.V. Volkodaeva^{1,2}, A.A. Koltsov², S.D. Timin¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg Mining University", RF, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line, 2

²LLC "Institute of Design, Ecology and Hygiene", RF, St. Petersburg, Medikov Av., 9, lit. B, room 17N

The need for automation of atmospheric air quality control is indicated. The foreign experience in the creation and use of cheap small-sized sensors for measuring concentrations of pollutants in the atmospheric air is evaluated. A table of their comparative characteristics is given. Various types of small-sized sensors, which include sensors using electrochemical and semiconductor sensors are considered, schematic diagrams are presented, conclusions are drawn about the advantages and disadvantages of the described sensors. It is concluded that it is necessary to develop small-sized sensors for measuring concentrations of pollutants in the atmospheric air in domestic instrumentation.

Keywords: atmospheric pollution, autonomous monitoring, small-sized sensors, electrochemical sensors, semiconductor sensors.

REFERENCES

1. <https://clck.ru/33FaxF> (January 12, 2023).
2. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (December, 27, 2022).
3. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* (Guidelines for air pollution control). RD 52.04.186-89. L.: Gidromeneoizdat, 1991. 693 p.
4. <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/04/Директива-Европейского-Парламента-и-Совета-Европейского-Союза-N-2008-50.pdf> (December, 27, 2022).
5. <https://www.bcs.org/media/4698/low-cost-pm-sensors-florentin-bulot.pdf> (December, 27, 2022)
6. Haleh N., Aashish J., Jaewoo P., and Arezoo E. Advanced Micro- and Nano-Gas Sensor Technology: A Review. *Sensors*, Marth 2019, Vol. 19, No. 6 (1285).
7. Ashfaque M., Khan M., Rao M., and Li Q. Recent Advances in Electrochemical Sensors for Detecting Toxic Gases: Electrochemical Sensors for Detecting Toxic Gases: NO₂, SO₂ and H₂S. *Sensors*, February 2019, Vol. 19, No. 4 (905).
8. Peterson P., Aujla A., Grant K., Brundle A., Thompson Martin., Vande H.J., and Leigh R. Practical Use of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors for Measuring Nitrogen Dioxide and Ozone in Urban Environments. *Sensors*, July 2017, Vol. 17, No. 7 (1653).
9. Zhang C., Luo Y., and Debliquy M. Room temperature conductive type metal oxide semiconductor gas sensors for NO₂ detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, April 2019, Vol. 289, pp. 118–133.
10. Zhu H., She J., Zhou M., and Fan X. Rapid and sensitive detection of formaldehyde using portable 2-dimensional gas chromatography equipped with photoionization detectors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Marth 2019, Vol. 283, pp. 182–187.
11. Hori H., Ishimatsu S., Fueta Y., Hinoue M., and Ishidao T. Comparison of sensor characteristics of three real-time monitors for organic vapors. *Journal of occupational health*, 2015, Vol. 57, No. 1, pp. 13–19.
12. Bogue, R. Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies. *Sensor Review*, Marth 2015, Vol. 35, No. 2. pp. 133–140.
13. Benoit W., Hummelgård C., Bryzgalov M., Rödjegård H., Martin H., and Schröder S. Compact Non-Dispersive Infrared Multi-Gas Sensing Platform for Large Scale Deployment with Sub-ppm Resolution. *Atmosphere*, November 2022, Vol. 13, No. 11 (1789).