

УДК 616.673-07

В. Н. Азаров^а, В. В. Шевченко^б, А. В. Аликов^а, А. С. Гаспарян^а, Н. В. Мензелинцева^в

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *ООО «Союз АтомПрибор»*

^в *Волгоградский государственный университет*

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОБИЛЬНЫХ ПЫЛЕМЕРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

При исследовании загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами в последнее время применяются бюджетные мобильные датчики на основе оптических сенсоров, которые имеют определенные достоинства. Но точность замеров ими ниже, чем приборами, использующими традиционные методы измерения, а также нет единого подхода к оценке точности (калибровке) таких датчиков. Проведены полевые и лабораторные испытания новых пылемеров серии AirExpert Mini и ПИКМА-1. Проведено сравнение полученных результатов с метриками референтных анализаторов. Точность мобильных датчиков AirExpert Mini PM близка к точности референтных анализаторов и соответствует требованиям, предъявляемым к точности средств измерений концентрации пыли в воздушной среде.

Ключевые слова: мелкодисперсная пыль, мобильный сенсорный датчик, калибровка, точность замера, расширенная относительная неопределенность, график Бленда — Альмана.

В последние годы при исследовании загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами часто применяют относительно недорогие сенсорные технологии. Имеется целый ряд достаточно доступных по стоимости коммерческих предложений бюджетных сенсорных датчиков концентрации мелкодисперсной пыли различных иностранных производителей: датчик концентрации пыли в воздухе, температуры и влажности НТ-НЗ810, датчик концентрации пыли в воздухе НТИ-НЗ820, портативный прибор для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц Casella CEL-712-K1, анализатор пыли Microdust Pro CEL-712, прибор Fluke 985, анализатор концентрации пыли TUFF Pro и ряд других [1—6].

Наряду с явными достоинствами (цена, размер, вес, мобильность и количество потребляемой электроэнергии) мобильные датчики имеют ряд недостатков — достаточно короткий срок службы, существенное влияние на показания влажности воздуха, невысокую селективность, перекрестную чувствительность, вероятность «отравления», ежедневный дрейф нулевой отметки. Точность замеров ими ниже, чем приборами, использующими традиционные методы измерения, и нет единого подхода к оценке точности таких замеров [7—9].

Но бюджетные датчики, неоткалиброванные должным образом и показывающие нестабильные метрологические характеристики, уже вызвали большой общественный интерес, т. к. практически любой человек может на основании замеров в требуемой точке делать заключение о фактическом состоянии воздушной среды, при этом не задумываясь о достоверности результата. Это вызывает определенную озабоченность, т. к. данные, полученные от некорректно откалиброванных или некалиброванных вообще мобильных

датчиков, могут значительно отличаться от данных, полученных традиционными приборами [10—16].

ООО «Союз АтомПрибор» разработал новые малогабаритные мобильные газоанализаторы и пылемеры серии AirExpert Mini. Датчики определяют концентрацию вредных веществ, в т. ч. мелкодисперсной пыли (PM10, PM2.5), метеопараметры, координаты на местности, время, обеспечивают передачу данных по сети GSM/GPRS/GPS.

Для исследования концентрации природного аэрозоля в полевых условиях разработан малогабаритный мобильный пылемер ПИКМА-1.

Структурная схема и внешний вид прибора ПИКМА-1 представлены на рис. 1, 2.

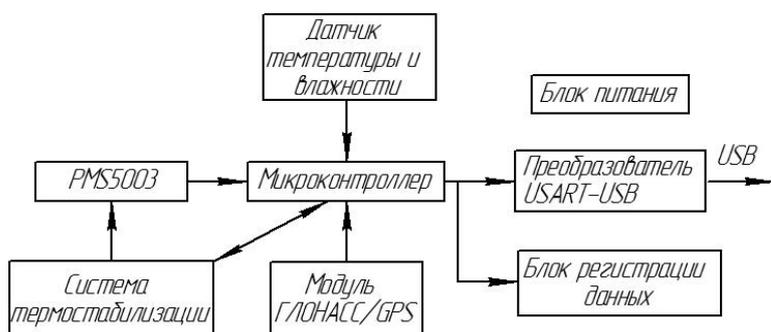


Рис. 1. Структурная схема пылемера ПИКМА-1



Рис. 2. Внешний вид пылемера ПИКМА-1

Пылемер ПИКМА-1 состоит из следующих компонентов:

- ATmega256A3 — управляющий микроконтроллер. Выполняет функции опроса датчиков, управления термостабилизацией датчика взвешенных частиц, а также формирования выходной строки данных.
- PMS5003 — датчик взвешенных частиц. Определяет концентрации частиц по рассеянному излучению посредством построения кривой рассеяния света с изменением во времени, выдает значения в $\text{мкг}/\text{м}^3$. Измеряет концентрацию пыли по трем фракциям 1, 2,5 и 10 мкм . Также имеет счетчик частиц пыли для 6 фракций (крупнее 0,3, 0,5, 1, 2,5, 5, 10 мкм).
- L80-R — модуль ГЛОНАСС/GPS со встроенной патч-антенной 15×15 мм. Служит для определения координат установки прибора, высоты и синхронизации по времени измерения.

- DTH22 — датчик температуры и влажности. Диапазон измерения температуры $-40...+85$ °С, с точностью $\pm 0,5$ °С, влажности — $0...99,9$ % с точностью $2...4$ %.

Принцип действия пылемера ПИКМА-1 основан на опросе всех датчиков с последующим выводом данных в виде единой строки в формате ASCII на экран ПК (ноутбука), либо записью на SD-карту файла-отчета о работе компонентов устройства (log-файл). Обновление данных происходит каждую секунду. Расположенный внутри корпуса датчик взвешенных частиц PMS5003 всасывает воздух из окружающей среды вентилятором в отверстия для приема пробы воздуха. Отобранная пылевоздушная смесь проходит через луч лазера, где определяются размеры взвешенных частиц и частота их следования. Температура датчика поддерживается на уровне 20 ± 5 °С системой термостабилизации.

Составные части прибора собраны и укомплектованы в корпусе размером $150\times 95\times 50$ мм. Пылемеру необходим внешний источник питания, подключаемый через USB-разъем. Ток потребления прибора не превышает $0,5$ А, поэтому питание может осуществляться от USB-порта ПК или ноутбука.

Материалы и методы

С целью определения точности измерений концентрации мелкодисперсной пыли мобильными пылемерами серии AirExpert на основе оптических сенсоров OPC-R1/OPC-N3 в соответствии с рекомендациями EPA¹ проведены полевые (первый этап) и лабораторные (второй этап) исследования.

В ходе полевых исследований измерители концентрации пыли (сенсора пыли) AirExpert Mini PM были размещены в специальном метрологическом домике, установленном рядом с павильоном станции мониторинга воздуха «Шаболовка» ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва (рис. 3). Станция оснащена анализатором пыли ТЕОМ серии 1405 (референтный прибор).



Рис. 3. Полевые исследования измерители концентрации пыли (сенсора пыли) AirExpert Mini PM

¹ Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe OJ L 152. 11.6.2008. Pp. 1—44.

Лабораторные испытания мобильных измерителей концентрации AirExpert Mini PM проведены на базе государственного центра испытаний и сертификации средств измерений Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д. И. Менделеева (рис. 4). За базу сравнения при проведении исследований принимали показания эталонного анализатора пыли ВАМ-1020 и счетчика аэрозольных частиц GRIMM модели 1.109 (референтные анализаторы).

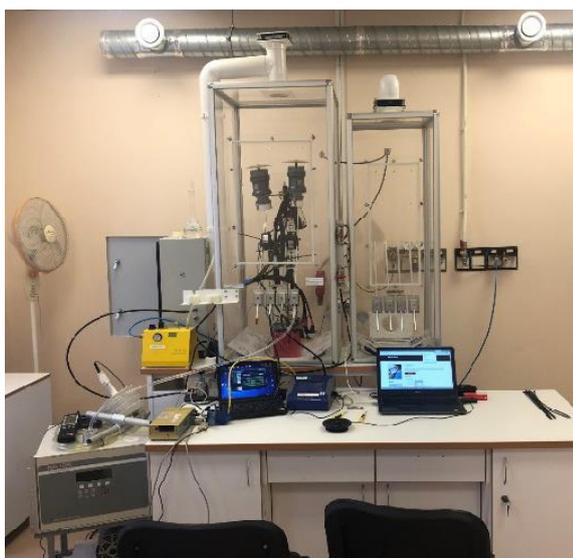


Рис. 4. Лабораторные испытания мобильных измерителей концентрации AirExpert Mini PM

Одновременно тестировали три измерителя концентрации пыли (сенсора пыли) AirExpert Mini PM.

С целью определения точности измерения концентрации мелкодисперсной пыли мобильным пылемером ПИКМА-1 в соответствии с рекомендациями ЕРАХ проведены полевые испытания (первый этап).

Результаты исследования

В соответствии с рекомендациями ЕРАХ основными метриками качества измерения концентрации мелкодисперсной пыли являются: относительная погрешность измерения, коэффициент линейной корреляции Пирсона R , коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратичная ошибка $RMSE$, нормированная среднеквадратичная ошибка $NRMSE$, стандартное отклонение SD , погрешность измерения CV , средняя ошибка смещения MBE , средняя абсолютная процентная ошибка $MAPE$, средняя относительная погрешность MRE , расширенная относительная неопределенность REU и ряд других.

Сравнение показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM и референтного анализатора ТЕОМ-1405 по мелкодисперсной пыли PM₁₀, PM_{2.5}, а также мобильного измерителя концентрации пыли ПИКМА-1 с референтным анализатором (CEL712 Microdast pro) по метрике $MAPE$ (средняя абсолютная погрешность по модулю) приведены в таблице.

Сравнение показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM и референтного анализатора TEOM-1405

МАРЕ для пыли	AirExpert Mini PM 20003	AirExpert Mini PM 20005	AirExpert Mini PM 20006	AirExpert Mini PM среднее	ПИКМА-1
PM10	22,1	19,7	19,6	20,5	19,5
PM2.5	21,1	20,7	21	20,9	20,2
PM1	—	—	—	—	21

Единственной признанной на международном уровне мерой доверия к точности результатов измерений является метрика неопределенности, которая является количественной мерой того, насколько полученный результат надежно оценивает измеряемую величину. Она показывает разброс значений, который может быть характерен исследуемой величине, поэтому неопределенность измерения можно интерпретировать как интервал, в котором измеренные значения находятся с достаточной вероятностью. Неопределенность можно трактовать как количественную меру точности полученного результата измерений и степени доверия тому, что значение измеренной величины находится внутри определенного интервала. Неопределенность позволяет сравнить результаты различных измерений одинаковых измеряемых величин между собой² [17, 18].

При расчете неопределенности в качестве исходных данных могут быть использованы: данные предшествующих измерений величины, данные о характере распределения вероятностей, неопределенность констант и справочных данных, сведения изготовителя о приборе и т. п. Суммирование всех вкладов в неопределенность измерений позволяет оценить стандартную неопределенность.

В свидетельствах о калибровке приборов приводят расширенную неопределенность U :

$$U = k u(y),$$

где $u(y)$ — стандартная неопределенность измерения; y — выходная величина; k — коэффициент охвата, значение выбирают на основе уровня доверия, требуемого для интервала от $(y - U)$ до $(y + U)$; обычно k принимает значения от 2 до 3, однако в особых случаях значение k может находиться вне этих границ.

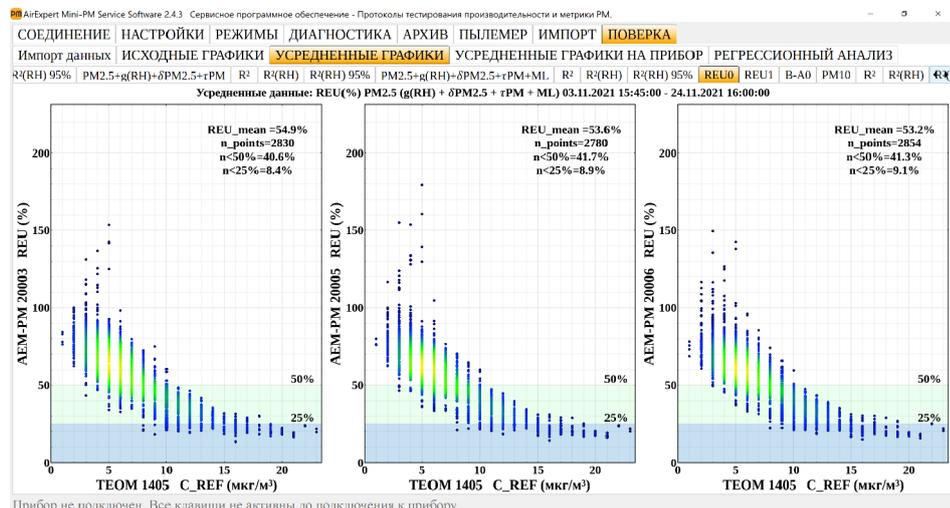
Расширенная относительная неопределенность REU — это отношение расширенной неопределенности к значению оценки измеряемой величины (результату измерения или среднему арифметическому результатов измерений), выраженное в процентах. Относительная расширенная неопределенность эквивалентна относительной погрешности и количественно совпадает с ней при заданной доверительной вероятности.

Если величина $REU \leq 50\%$, то мобильный измеритель концентрации мелкодисперсной пыли PM10, PM2.5 соответствует требованиям, предъяв-

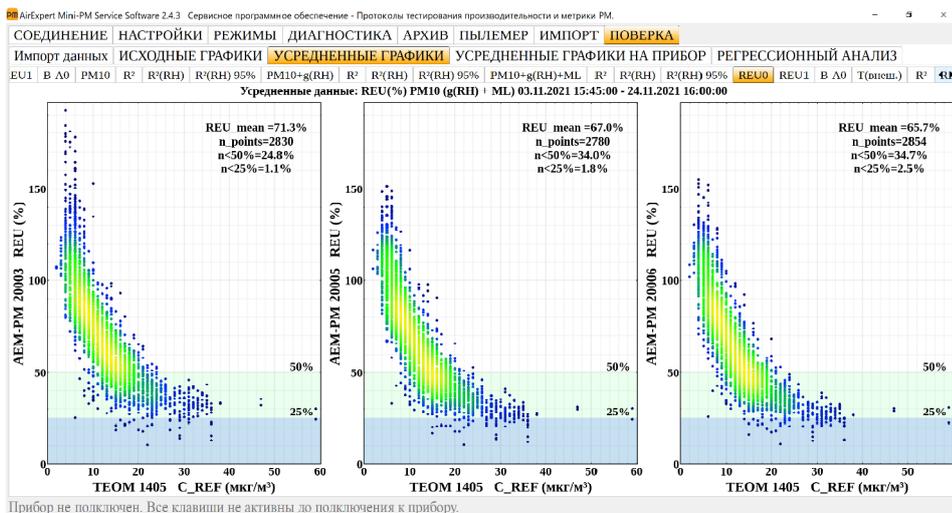
² ГОСТ Р ИСО 11222—2006. Качество воздуха. Оценка неопределенности измерений характеристик качества воздуха, полученных усреднением по времени. М.: Стандартинформ, 2012. С. 190.

ляемым к средствам измерения качества атмосферного воздуха населенных мест [4].

На рисунке 5 приведены графики *REU* после обработки данных сравнения AirExpert Mini PM с TEOM-1405 с усреднением 20 мин.



a

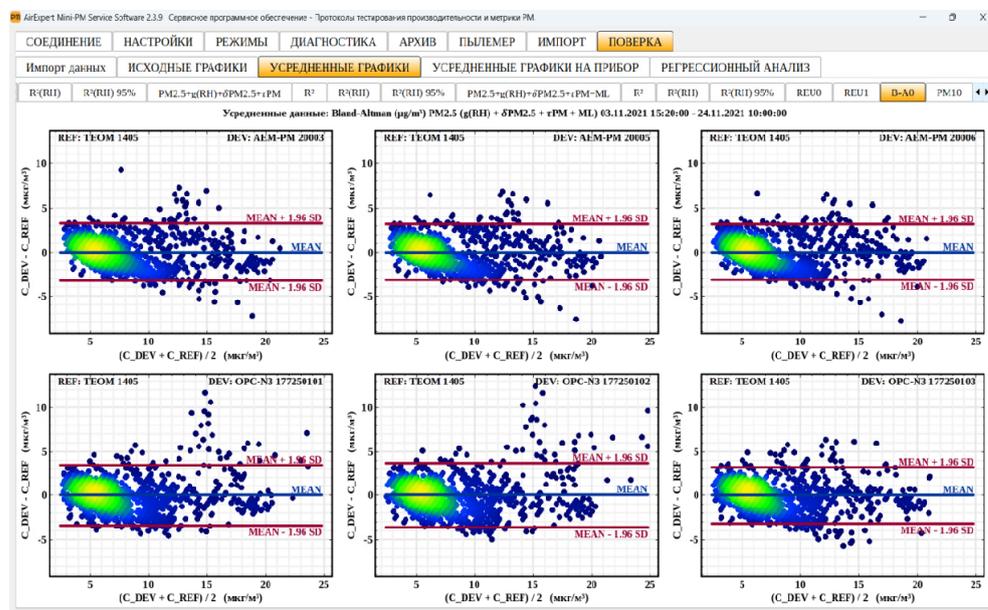


b

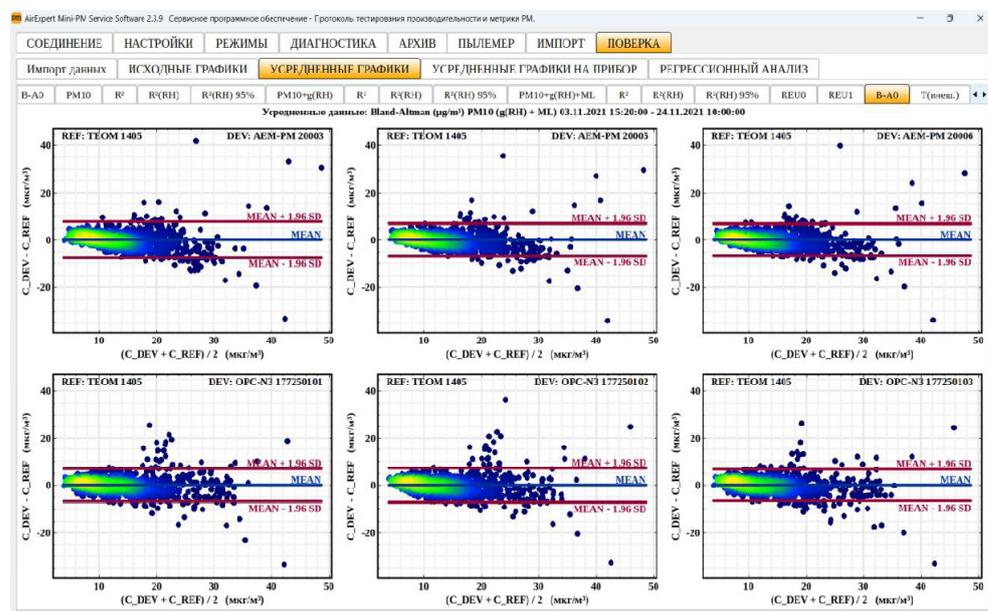
Рис. 5. Графики относительной расширенной неопределенности (*REU*) после обработки данных сравнения AirExpert Mini PM с TEOM-1405: а — по пыли PM2.5; б — по пыли PM10 с усреднением 20 мин.

Для визуализации различий в измерениях между разными пылемерами (AirExpert Mini PM и TEOM-1405) построены графики Бленда — Альтмана [8]. На рисунке 6 приведены графики Бленда —Альтмана при сравнении показаний пылемеров AirExpert Mini PM и референтного прибора по мелкодисперсной пыли.

Анализ графиков Блэнда — Альтмана (см. рис. 6) позволяет определить среднюю разницу в измерениях исследуемым и референтным прибором (линия *MEAN*), верхний и нижний предел (95 % доверительный интервал для средней разницы).



а



б

Рис. 6. Графики Блэнда — Альтмана при сравнении показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM к показаниям анализатора пыли ТЕОМ-1405 по фракциям пыли: а — PM2.5; б — PM10

На рисунке 7 приведено сравнение показаний мобильных пылемеров ПИКМА-1 и референтного анализатора (CEL712 Microdast) по фракциям пыли PM10, PM2.5 и PM1.

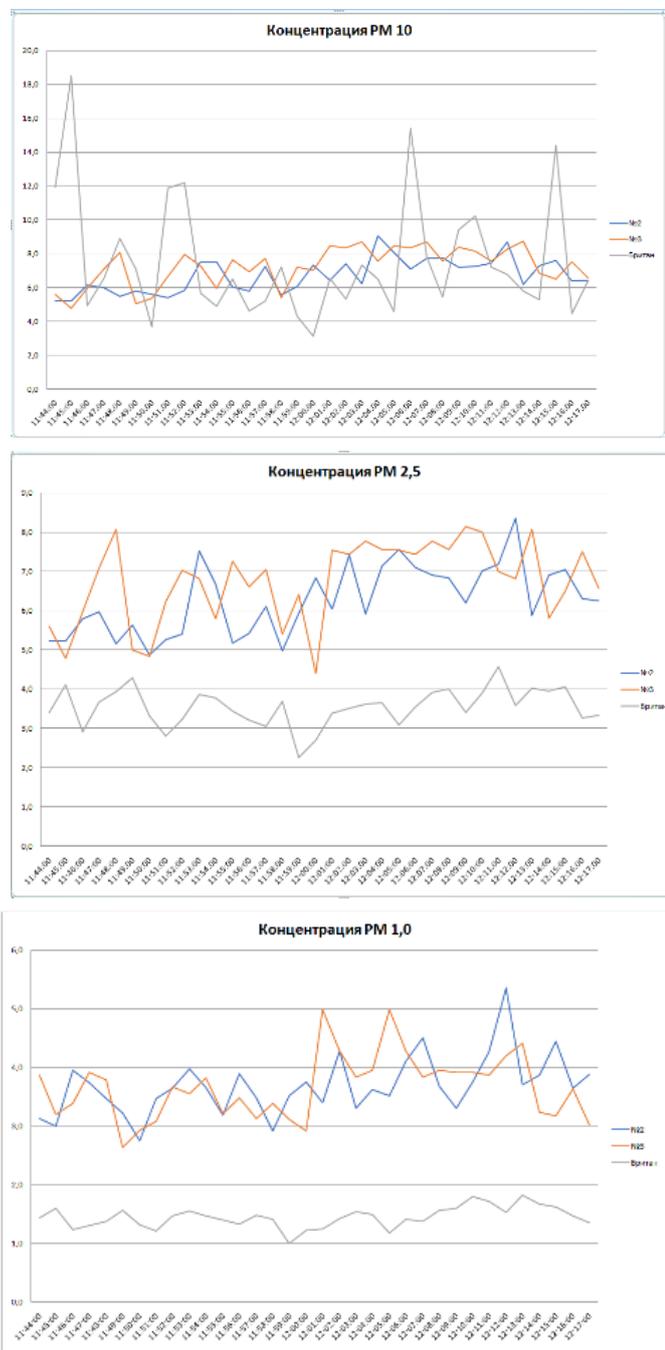


Рис. 7. Сравнительные данные показаний мобильных пылемеров ПИКМА-1 к анализатору пыли CEL712 Microdast pro по фракциям пыли PM10, PM2.5 и PM1: Britan — показание референтного прибора; 2, 3 — показания прибора ПИКМА-1

В лабораторных испытаниях мобильных измерителей концентрации AirExpert Mini PM за базу сравнения при проведении исследований принимала показания эталонного анализатора пыли VAM-1020 и счетчика аэрозольных частиц GRIMM модели 1.109 (референтные анализаторы).

В качестве эталонных использовали аэрозоль на основе хлористого натрия (тестовый аэрозоль № 1) и аэрозоль на основе масла минерального белого легкого парафинового (тестовый аэрозоль № 2). Экспериментальные исследования проводились при следующих параметрах: температуре окружающего воздуха от +15 до +25 °С, относительной влажности воздуха не более 80 % и атмосферном давлении от 90,6 до 104,8 кПа.

Значения метрик при лабораторных испытаниях не регламентируются какими-либо нормативными или техническими документами. Для оценки сходимости полученных результатов показаний мобильных измерителей концентрации пыли AirExpert Mini PM (сенсоров OPC-N3) и показаний эталонных анализаторов пыли VAM-1020, GRIMM1.109 использован коэффициент детерминации — чем ближе значение коэффициента к 1, тем лучше исследуемое устройство имитирует работу эталонного устройства.

На рисунках 8, 9 приведены сравнительные данные показаний мобильных пылемеров AirExpert Mini PM, сенсоров OPC-N3 и анализатора пыли VAM-1020 и расчет метрик.

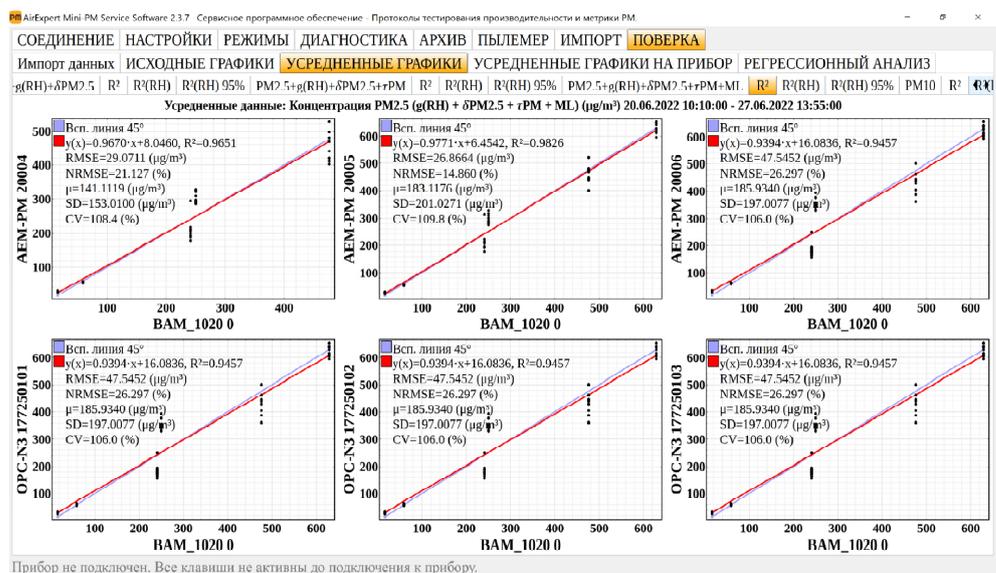


Рис. 8. Сравнительные данные показаний мобильных пылемеров AirExpert Mini PM, сенсоров OPC-N3, анализатора пыли VAM-1020 и расчет метрик (тестовый аэрозоль № 2, пыль PM2.5)

Средний коэффициент детерминации R^2 по трем приборам в данных исследованиях равен $R^2 = 0,964$. В целом лабораторные испытания с аэрозолями соли и масла показали высокий коэффициент детерминации ($R^2 > 0,9$).

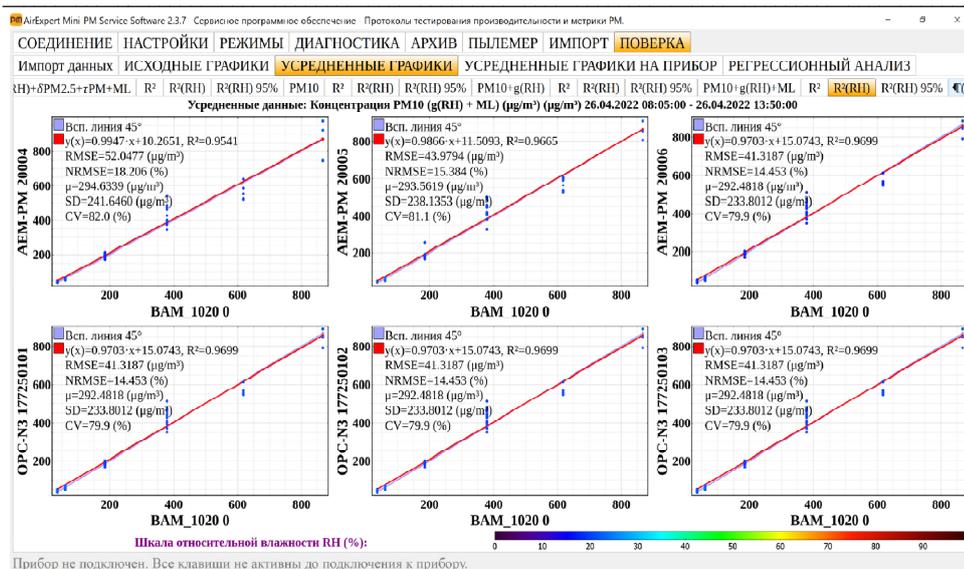


Рис. 9. Сравнительные данные показаний мобильных пылемеров AirExpert Mini PM, сенсоров OPC-N3, анализатора пыли VAM-1020 по фракции пыли PM10 и расчет метрик (тестовый аэрозоль № 1, пыль PM10)

Обсуждение и заключение

Проведены полевые и лабораторные испытания мобильных пылемеров серии AirExpert на основе оптических сенсоров OPC-R1/OPC-N3, позволившие определить точность измерения ими концентрации пыли PM10, PM2.5 на основании сравнения показателей мобильных пылемеров с показателями референтных анализаторов по следующим метрикам: коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная погрешность по модулю *MAPE*, расширенная неопределенность *REU* и графики Блэнда — Альтмана.

Проведены полевые испытания мобильных датчиков ПИКМА-1, позволившие определить точность измерения концентрации пыли PM1, PM2.5, PM10 на основании сравнения показателей исследуемых датчиков с показателями референтного анализатора по рассматриваемым метрикам.

Точность рассмотренных мобильных датчиков близка к точности референтных анализаторов и в целом соответствует требованиям, предъявляемым к точности средств измерений концентрации пыли в воздушной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities / P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. K.-A. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, R. Britter // *Environ. Int.* 2015. No. 75. Pp. 199—205. DOI: 10.1016/j.
2. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring / R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson, J. Ortega, A. Collier, Y. Jiang, K. Li, R. P. Dick, Q. Lv, M. Hannigan // *Atmos. Measurement Tech.* 2014. No. 7. 3325. DOI: 10.5194/amt-7-3325-2014.
3. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring / F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, A. Borowiak // *Atmosphere*. 2019. No. 10. P. 506. DOI: 10.3390/atmos10090506.
4. *Alexandre M., Gerboles M.* Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas // *Chem. Eng. Trans.* 2012. No. 30. Pp. 169—174.

5. Opportunistic mobile air pollution monitoring: a case study with city wardens in Antwerp / J. T. Bossche, B. Elen, J. Peters, D. Botteldooren, B. Baets // *Atmos. Environ.* 2016. No. 141. Pp. 408—421.
6. Jeon H., Ryu J., Kim K. M. The Development of a Low-Cost Particulate Matter 2.5 Sensor Calibration Model in Daycare Centers Using Long Short-Term Memory Algorithms // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. 1228. DOI: [org/10.3390/atmos14081228](https://doi.org/10.3390/atmos14081228).
7. Broday D. M., Rosenzweig R. Deposition of fractal-like soot aggregates in the human respiratory tract // *J. Aerosol Sci.* 2011. No. 42. Pp. 372—386.
8. Lewis A. C., von Schneidmesser E., Peltier R. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications // *World Meteorological Organization*. 2018. 29 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/325790570_Low-cost_sensors_for_the_measurement_of_atmospheric_composition_overview_of_topic_and_future_applications.
9. Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost PM2.5 sensors / M. Y. Patel, P. F. Vannucci, J. Kim, W. M. Berelson, R. C. Cohen // *Atmos. Meas. Tech.* 2024. No. 17. Pp. 1051—1060.
10. Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide / L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre, F. Bonavitaola // *Sens. Actuators B Chem.* 2015. No. 215. Pp. 249—257.
11. Lewis A., Edwards P. Validate personal air-pollution sensors // *Nat. News*. 2016. No. 535. P. 29.
12. Development of an in-home, real-time air pollutant sensor platform and implications for community use / S. E. Gilooly, Y. Zhou, J. Vallarino, M. T. Chu, D. R. Michanowicz, J. I. Levy, G. Adamkiewicz // *Environ. Pollut.* 2019. No. 244. Pp. 440—450.
13. Sakshi J., Zimmerman N. Exploration of intra-city and inter-city PM2.5 regional calibration models to improve low-cost sensor performance // *Journal of Aerosol Science*. 2024. No. 177. 106335. DOI: [org/10.1016/j.jaerosci](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci).
14. Сергина Н. М., Брызгина Е. О., Сущенко Р. В., Азарова М. Д. Исследования загрязнения мелкодисперсной пылью воздушной среды в парковых зонах большого промышленного города // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2022. Вып. 4(89). С. 231—239.
15. Гаспарян, А. С., Азарова М. Д. Об источниках образования природной пыли на территории полигона и ее распространении на городскую среду // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020. Вып. 4(81). С. 353—360.
16. Азаров В. Н., Калюжина Е. А. Об организации мониторинга PM10 и PM2.5 на примере г. Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2011. Вып. 25(44). С. 398—401.
17. Ефремова Н. Ю. Оценка неопределенности в измерениях. Минск : БелГИМ, 2003. 50 с.
18. Слаев В. А. Руководство по выражению неопределенности измерения. СПб. : ГП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 127 с.

© Азаров В. Н., Шевченко В. В., Аликов А. В., Гаспарян А. С., Мензелинцева Н. В., 2024

*Поступила в редакцию
в сентябре 2024 г.*

Ссылка для цитирования:

Оценка точности мобильных пылемеров при измерении концентрации мелкодисперсной пыли / В. Н. Азаров, В. В. Шевченко, А. В. Аликов, А. С. Гаспарян, Н. В. Мензелинцева // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2024. Вып. 4(97). С. 272—283. DOI: [10.35211/18154360_2024_4_272](https://doi.org/10.35211/18154360_2024_4_272).

Об авторах:

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232

Шевченко Вадим Васильевич — ген. дир. ООО «Союз АтомПрибор». Российская Федерация, 19034, г. Москва, ул. Пречистенка, 40/2, стр. 3, помещ. 2/1

Аликов Александр Витальевич — аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая

Гаспарян Артур Сергеевич — аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая

Мензелинцева Надежда Васильевна — д-р техн. наук, проф., Волгоградский государственный университет (ВолГУ). Российская Федерация, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100

Valerii N. Azarov^a, Vadim V. Shevchenko^b, Alexander V. Alikov^a, Artur S. Gasparyan^a, Nadezhda V. Menzelintseva^c

^a *Volgograd State Technical University*

^b *“Soyuz AtomPribor” LLC*

^c *Volgograd State University*

EVALUATION OF THE ACCURACY OF MOBILE DUST METERS IN MEASURING THE CONCENTRATION OF FINE DUST

In the study of air pollution by fine particles, low-cost mobile sensors based on optical sensors have recently been used, which have certain advantages. But their measurement accuracy is lower than with devices using traditional measurement methods, and there is also no single approach to evaluating the accuracy (calibration) of such sensors. Field and laboratory tests of the new AirExpert Mini and PICMA-1 series dust meters have been carried out. The results obtained were compared with the metrics of the reference analyzers. The accuracy of the AirExpert Mini PM mobile sensors is close to the accuracy of reference analyzers and meets the requirements for the accuracy of dust concentration measuring instruments in the air.

Key words: fine dust, mobile touch sensor, calibration, measurement accuracy, extended relative uncertainty, the Bland — Altman graph.

For citation:

Azarov V. N., Shevchenko V. V., Alikov A. V., Gasparyan A. S., Menzelintseva N. V. [Evaluation of the accuracy of mobile dust meters in measuring the concentration of fine dust]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 4, pp. 272—283. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_272.

About authors:

Valerii N. Azarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232

Vadim V. Shevchenko — general manager, “Soyuz AtomPribor” LLC. Room 2/1, building 3, 40/2, Prechistenka st., Moscow, 19034, Russian Federation

Alexander V. Alikov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Artur S. Gasparyan — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Nadezhda V. Menzelintseva — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State University. 100, Universitetskiy Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation