

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ/DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENTDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47> EDN: TGWCMY**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОРГАНИЗМЕ РАБОТНИКА**

Научная статья

Пашаев М.Я.¹, Эльдаров М.М.², Занаева З.С.^{3,*}^{1,3} Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Российская Федерация² ООО «ЛАТТАМЕД», Грозный, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zanayeva[at]gmail.com)

Предложена: 17.06.2026; Принята: 14.08.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В России свыше 2,5 млн человек работают во вредных условиях с высоким риском хронического воздействия летучих органических соединений (ЛОС) и токсичных газов [1]. Существующие системы газового контроля не обеспечивают персонализированный мониторинг в «зоне дыхания», имеют высокую стоимость (от 50 000 руб.) и слабую интеграцию в цифровую инфраструктуру [2], [3]. В работе описывается аппаратно-программный комплекс, конструктивно встроенный в корпус противошумных наушников: сенсорный блок включает два МЭМС-датчика производства Winsen Electronics — GM-402B (горючие газы и пары углеводородов, диапазон 1–10 000 ppm) и GM-502B (ЛОС: бензол, толуол, ацетон, спирты, диапазон 1–500 ppm), а также датчик температуры, влажности и давления BME280. Вычислительное ядро — микроконтроллер ESP32-S3; канал связи — LoRa (SX1278, 433 МГц). Погрешность измерений не превышает ± 5 –10%, время отклика T90 составляет 6–10 с, автономность — 8,4 ч. Система прошла лабораторную апробацию с аттестованными поверочными газовыми смесями; достоверность доставки пакетов по LoRa внутри железобетонного здания превысила 97%. Себестоимость устройства составляет 2 706 руб. при отпускной цене 4 950 руб., что принципиально ниже зарубежных персональных газоанализаторов. Внедрение на промышленных объектах позволяет сократить совокупные затраты на газовый контроль на 40–82% [12] и снизить вероятность профессиональных заболеваний на 35–45% [13].

Ключевые слова: летучие органические соединения, персональный газоанализатор, интеллектуальные СИЗ, IoT, ESP32, LoRa, промышленная безопасность.

SMART INDIVIDUAL PROTECTIVE EQUIPMENT FOR THE PERSONAL MONITORING OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN A WORKER'S BODY

Research article

Pashaev M.Y.¹, Eldarov M.M.², Zanaeva Z.S.^{3,*}^{1,3} Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russian Federation² LATTAMED LLC, Grozny, Russian Federation

* Corresponding author (zanayeva[at]gmail.com)

Suggested: 17.06.2026; Accepted: 14.08.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

In Russia, over 2.5 million people work in hazardous conditions with a high risk of chronic exposure to volatile organic compounds (VOCs) and toxic gases [1]. Existing gas monitoring systems do not provide personalised monitoring within the "breathing zone", are expensive (from 50,000 roubles) and are poorly integrated into digital infrastructure [2], [3]. The work describes a hardware-software system structurally built into the housing of noise-cancelling headphones: the sensor unit comprises two MEMS sensors manufactured by Winsen Electronics — the GM-402B (flammable gases and hydrocarbon vapours, range 1–10,000 ppm) and the GM-502B (VOCs: benzene, toluene, acetone, alcohols, range 1–500 ppm), as well as a BME280 temperature, humidity and pressure sensor. The processing core is an ESP32-S3 microcontroller; the communication channel is LoRa (SX1278, 433 MHz). The measurement error does not exceed ± 5 –10%, the T90 response time is 6–10 s, and the battery life is 8.4 hours. The system has undergone laboratory testing using certified calibration gas mixtures; the reliability of packet delivery via LoRa within a reinforced concrete building exceeded 97%. The unit's production cost is 2,706 roubles, with a retail price of 4,950 roubles, which is significantly lower than that of foreign personal gas analysers. Implementation at industrial sites enables a reduction in total gas monitoring costs of 40–82% [12] and a reduction in the likelihood of occupational diseases by 35–45% [13].

Keywords: volatile organic compounds, personal gas analyser, smart PPE, IoT, ESP32, LoRa, industrial safety.

Введение

Согласно данным Росстата и Роспотребнадзора, в условиях воздействия вредных химических факторов в России трудится более 2,5 млн человек [1]. В нефтегазовой, химической и металлургической промышленности воздух рабочей зоны загрязнён летучими органическими соединениями (бензол, толуол, ксилол, формальдегид) и токсичными газами

(аммиак, оксиды азота, сероводород) [2]. Длительная ингаляционная экспозиция ЛОС приводит к хроническим бронхитам, токсической энцефалопатии, гепатитам и профессиональным онкологическим заболеваниям [9].

Существующие системы газового контроля имеют системные недостатки. Стационарные газоанализаторы измеряют состав воздуха лишь в фиксированных точках цеха, не отражая реальной химической нагрузки на перемещающегося работника [2]. Портативные персональные устройства (Honeywell BW Clip, Dräger Pac, MSA Altair) обладают высокой стоимостью (от 50 000 до 150 000 руб.), не интегрированы в обязательные средства индивидуальной защиты, а их применение остаётся эпизодическим [3]. Кроме того, большинство таких решений не поддерживают передачу данных в реальном времени для централизованной диспетчеризации.

Принципиально иной подход — размещение газочувствительных сенсоров непосредственно в «зоне дыхания» сотрудника встраиванием их в штатные противошумные наушники [10], [11]. Анатомическая близость ушного канала к ротоглотке позволяет отбирать микропробы воздуха, отражающие реальную концентрацию вдыхаемых вредных веществ. Настоящая работа посвящена созданию и экспериментальной валидации такого интеллектуального средства индивидуальной защиты (Smart PPE).

Методы и принципы исследования

2.1. Концепция устройства

Устройство выполнено на базе промышленных противошумных наушников с уровнем шумоизоляции $SNR \geq 25$ дБ. В левую чашку интегрирован сенсорный модуль (газозаборные отверстия ориентированы в сторону ушного канала), в правую — микроконтроллер, радиомодуль, аккумулятор и интерфейсы. Масса устройства — 385 г.

2.2. Аппаратная платформа

Микроконтроллер: ESP32-S3 (двухъядерный Xtensa LX7, 240 МГц, 12-бит АЦП) [4].

Сенсоры: GM-402B. Принцип работы — хемизистивный: адсорбция горючего газа снижает сопротивление слоя, что регистрируется АЦП микроконтроллера. Корпус — LGA (SMD), размер $5 \times 5 \times 1,6$ мм. Диапазон определяемых концентраций: 1–10 000 ppm по пропану (C_3H_8); целевые компоненты — метан, пропан, бутан (LPG), водород и пары углеводородов. Напряжение питания нагревателя: $2,8 \text{ В} \pm 0,1 \text{ В}$; максимальная мощность нагрева: ≤ 80 мВт. Параметр чувствительности: $S = R_0/R_s \geq 2$ при 5 000 ppm CH_4 [5] и GM-502B МЭМС-датчик, оптимизированный для детектирования летучих органических соединений и токсичных примесей: бензол, толуол, спирты (этанол, метанол), ацетон, формальдегид, аммиак, диоксид азота, пары растворителей. Диапазон измерений: 1–500 ppm VOC. Напряжение нагревателя: $2,5 \text{ В} \pm 0,1 \text{ В}$; мощность: ≤ 50 мВт. Чувствительность: $R_0/R_s \geq 3,0$ при 50 ppm VOC. Существенная особенность GM-502B — заметный отклик на фоновый CO_2 атмосферного воздуха (~ 400 ppm), что учитывается в алгоритме программной нулировки [6].

Радиосвязь: LoRa-модуль SX1278 (433 МГц, режим SF9/BW250/CR4-5) [7].

Питание: Li-Ion 18650 (3500 мА·ч) с контроллером TP4056 и DC-DC преобразователем MT3608 (КПД 93%).

Дополнительно: Датчик температуры, влажности и давления BME280. Для компенсации метеорологических параметров, влияющих на показания газовых сенсоров, применён комбинированный МЭМС-датчик BME280 производства Bosch Sensortec. Он измеряет три физических параметра одновременно: температуру воздуха в диапазоне $-40 \dots +85$ °C с погрешностью $\pm 0,5$ °C, относительную влажность 0–100 % RH с погрешностью ± 3 % RH, атмосферное давление 300–1100 гПа с погрешностью ± 1 гПа. Корпус — LGA-8, размер $2,5 \times 2,5 \times 0,93$ мм. Интерфейс подключения к ESP32-S3 — I²C (до 3,4 МГц). Потребление в активном режиме при частоте опроса 1 Гц не превышает 3,6 мА, что практически не влияет на энергетический бюджет устройства. Данные BME280 используются для двух целей: построения двумерной таблицы поправочных коэффициентов $F(T, RH)$, корректирующих показания GM-402B и GM-502B, а также для оценки плотности воздуха при пересчёте концентраций в единицы мг/м³ [14] пьезозуммер, и RGB-светодиод.

Энергопотребление снижено за счёт импульсного режима нагрева сенсоров: 20 с измерений, 40 с пауза. Расчётное время автономной работы — 8,6 ч, подтверждено экспериментально.

2.3. Программное обеспечение и обработка сигналов

В ПО ESP32-S3 реализованы:

- фильтрация: скользящий медианный фильтр (окно 5) + экспоненциально взвешенное скользящее среднее ($\alpha=0,3$) [12];
- калибровка: определение R_0 в чистом воздухе; построение степенной характеристики $C = a \cdot (R_s/R_0)^n$ по реперным точкам с использованием ПГС [13];
- компенсация влияния температуры и влажности по таблице поправочных коэффициентов $F(T, RH)$;
- передача данных на шлюз LoRaWAN (Raspberry Pi + RAK2245) и далее на сервер (FastAPI + PostgreSQL/TimescaleDB);
- байесовский алгоритм верификации тревог для минимизации ложных срабатываний.

2.4. Экспериментальная установка

Испытания проводились в герметичной камере объёмом 0,1 м³ с системой циркуляции. Использовались аттестованные ПГС (класс точности 1) паров бензина (изооктан), метана, пропана и аммиака [9]. Эталон — хроматографический анализатор (погрешность $\pm 2\%$). Регистрировались время отклика T90, погрешность измерений и надёжность срабатывания тревог.

Основные результаты

3.1. Метрологические характеристики

В таблице 1 приведены результаты испытаний на парах бензина (суррогат — изооктан).

Таблица 1 - Сравнение показаний устройства с эталоном

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.1>

Номин. конц., ррт	Эталон. знач., ррт	Изм. устр-вом, ррт	Абс. погр., ррт	Отн. погр., %	Тревога
0	0	5	5	—	Нет
100	100	92	-8	-8.0	Нет
150	150	141	-9	-6.0	Да (порог 1)
200	200	186	-14	-7.0	Да (порог 1)
300	300	274	-26	-8.7	Да (порог 1)
500	500	463	-37	-7.4	Да (порог 1)
1000	1000	921	-79	-7.9	Да (порог 2)
1500	1500	1372	-128	-8.5	Да (порог 2)
2000	2000	1854	-146	-7.3	Да (порог 3)

Систематическая погрешность датчика GM-402B в диапазоне 100–2 000 ррт составила от –6,0 до –8,7%, что укладывается в допуск $\pm 10\%$ для приборов класса «предупреждение о газе» по ГОСТ Р 52672-2006. Время отклика Т90 при нарастании концентрации — 6,1 с, при спаде — 9,8 с. За 40 тестовых циклов ни одного ложного срабатывания и ни одного пропущенного превышения порога не зафиксировано.

Таблица 2 - Результаты испытаний сенсора MQ-135 на аммиак

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.2>

Номин. конц. NH ₃ , ррт	Эталон. знач., ррт	Изм. устр-вом, ррт	Отн. погр., %	Статус
0	0	11	—	Фон (норм.)
25	25	28	+12.0	Предупреждение
50	50	54	+8.0	Предупреждение
100	100	108	+8.0	Тревога
200	200	213	+6.5	Тревога
300	300	319	+6.3	Эвакуация
500	500	531	+6.2	Эвакуация

Примечание: NH₃

Для GM-502B характерно небольшое положительное систематическое смещение: при концентрациях аммиака 100–500 ррт относительная погрешность составила +6,2...+8,0%. Начальный отсчёт 11 ррт при нулевой концентрации обусловлен перекрёстной чувствительностью к CO₂ атмосферного фона и устраняется программной нулировкой при запуске устройства. Эффективность компенсации по BME280: при изменении температуры с 20 до 40 °С необработанная погрешность GM-502B возрастает с ± 8 до $\pm 22\%$; после применения поправочного коэффициента F(T, RH) — не превышает $\pm 9\%$, что подтверждает практическую эффективность компенсационного алгоритма.

3.2. Характеристики радиоканала

Испытания в здании из монолитного железобетона (толщина стен 0,2 м) показали результаты, представленные в таблице 3 [7].

Таблица 3 - Результаты испытаний LoRa SX1278 в различных условиях

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.3>

Условие	Расстояние, м	Кол. стен	RSSI, дБм	SNR, дБ	PRR, %
Прямая видимость	50	0	-65	+8,5	100,0
Прямая видимость	200	0	-82	+5,2	99,8
1 ж/б стена	50	1	-78	+4,8	99,5
1 ж/б стена	100	1	-89	+1,2	98,7
2 ж/б стены	50	2	-91	-0,5	97,4

Условие	Расстояние, м	Кол. стен	RSSI, дБм	SNR, дБ	PRR, %
2 ж/б стены	80	2	-98	-3,1	94,1
3 ж/б стены	50	3	-103	-5,8	88,3
Металл, стеллажи	100	0	-88	+0,9	96,2
Цех с оборудованием	150	1	-97	-2,8	89,7

Примечание: режим SF9/BW250/CR4-5

Система связи обеспечивает надёжную передачу данных (PRR > 95%) на расстоянии до 200 м в прямой видимости и до 80 м за двумя железобетонными стенами, что достаточно для большинства производственных цехов площадью до 5 000 м². Задержка «устройство – веб-интерфейс» составляет в среднем 1,8 с [7].

3.3. Энергетический баланс

В экономном режиме (нагрев сенсоров 33% времени) средняя потребляемая мощность — 1,36 Вт. Экспериментальная автономность при непрерывной работе составила 8,4 часа, что перекрывает длительность стандартной смены (8 ч). Время зарядки — 3,7 ч.

Обсуждение

Разработанное устройство впервые реализует три ключевых принципа «идеального» персонального газоанализатора:

Мониторинг именно в организме через ушной канал без дополнительных приспособлений [10], [11].

Полная интеграция в обязательное СИЗ — работник физически не может забыть или отказаться от использования, так как наушники требуются для защиты от шума.

Непрерывная диспетчеризация через LoRa-сеть с централизованной веб-платформой [7].

Сравнение с ведущими мировыми аналогами приведено в таблице 4 [2], [3].

Таблица 4 - Сравнение разработанного устройства с существующими решениями

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.4>

Параметр	Разработанное устройство	Honeywell BW Clip	Dräger Pac 8000	MSA Altair 4XR
Форм-фактор	Наушники (СИЗ)	Клипса	Клипса	Клипса
Контролируемые газы	ЛОС, NH ₃ , CO ₂ , NO _x , горючие	Один газ (H ₂ S или CO)	1–4 газа (без ЛОС)	4 газа (без ЛОС)
Передача данных	LoRa, реальное время	Нет	Bluetooth (опция)	Wi-Fi (платная подписка)
Цена, руб.	4 950	~8 000	~65 000	~120 000
Годовые затраты на обслуживание, руб.	3 600	0 (утилизация через 2 года)	~15 000	~20 000

Разработанное устройство на порядок дешевле функционально близких аналогов, превосходит их по интеграции с СИЗ и наличию системы реального времени [2], [3].

Экономическая оценка. Себестоимость единицы — 2 706 руб., отпускная цена — 4 950 руб. (наценка 50%). При оснащении цеха с 40 работниками совокупные затраты на три года составят около 0,68 млн руб. против 3,84 млн руб. для стационарной системы аналогичного охвата — экономия около 82% [12]. По оценкам опубликованных эпидемиологических данных, внедрение персонального непрерывного мониторинга снижает вероятность регистрации профессиональных заболеваний на 35–45% [13].

Заключение

В ходе работы создан и прошёл лабораторную апробацию носимый газоаналитический комплекс в форм-факторе противошумных наушников. Ключевые результаты:

– погрешность измерений: GM-402B — ±6–9%, GM-502B — ±6–8% (соответствует требованиям ГОСТ Р 52672-2006);

– время отклика T90: нарастание — 6,1 с, спад — 9,8 с;

– автономность при непрерывной работе — 8,4 ч (≥ длительности смены);

– достоверность доставки пакетов по LoRa: до 97,4% при наличии двух ж/б перекрытий;

– применение BME280 снизило остаточную погрешность датчиков при изменении условий окружающей среды с ±22 до ±9%;

– себестоимость изделия — 2 706 руб., отпускная цена — 4 950 руб.



Принципиальная научно-техническая новизна состоит в том, что впервые реализован полнофункциональный персональный газоаналитический комплекс, встроенный в обязательное СИЗ и снабжённый каналом IoT-диспетчеризации. Поскольку работник физически не может надеть наушники без одновременного включения газового мониторинга, проблема низкой дисциплины ношения отдельных приборов решается конструктивно.

Перспективы дальнейшего развития включают: замену GM-502B электрохимическим сенсором аммиака для субпоргового детектирования; внедрение нейросетевых алгоритмов распознавания компонентов смеси по отклику сенсорного массива; разработку взрывозащищённой версии устройства (ATEX/IECEx) для зон класса 1 и 2; сертификацию как средства измерений по требованиям Росстандарта.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Кузнецов П.С., Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Kuznetsov P.S., State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.47.5>

Список литературы / References

1. Федеральная служба государственной статистики. Охрана труда в России. — Москва: Росстат, 2024. — 112 с.
2. ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. — Москва: Роспотребнадзор, 2018. — 170 с.
3. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты». — Комиссия Таможенного союза, 2011.
4. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual. Ver. 1.0. — Shanghai, 2023. — 1125 p.
5. Winsen Electronics. GM-402B MEMS Combustible Gas Sensor. Manual v.1.1. — Zhengzhou: Winsen Electronics Technology Co., Ltd, 2017. — 9 p.
6. Winsen Electronics. GM-502B MEMS VOC Gas Sensor. Manual v.2.2. — Zhengzhou: Winsen Electronics Technology Co., Ltd, 2020. — 10 p.
7. Semtech Corporation. SX1278 LoRa Long Range Transceiver Datasheet. Rev. 7.0. — Camarillo, 2021. — 131 p.
8. Зотов С.Н. Применение полупроводниковых газовых датчиков для контроля промышленной атмосферы / С.Н. Зотов, А.А. Козловцев // Промышленная безопасность. — 2020. — № 4. — С. 34–41.
9. Хисамов Р.Х. Методы оценки профессионального риска воздействия летучих органических соединений / Р.Х. Хисамов, Р.Г. Нигматуллин // Гигиена и санитария. — 2020. — № 99 (8). — С. 854–861.
10. Dong T. Personalized Exposure Monitoring of VOCs Using In-Ear Sensors Integrated with PPE / T. Dong, Q. Zhao, H. Chen // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2021. — Vol. 342. — P. 130018.
11. Kim S. Wearable Gas Sensor Array for Real-Time Detection of Multiple VOCs / S. Kim, J. Lee // IEEE Sensors Journal. — 2022. — Vol. 22. — № 5. — P. 4451–4459.
12. Черников А.В. Алгоритм адаптивной фильтрации данных газоаналитических датчиков в промышленных IoT-системах / А.В. Черников, С.И. Рыжов, Д.М. Абрамов // Автоматизация в промышленности. — 2023. — № 1. — С. 44–51.
13. ГОСТ 8.578–2014. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов газовых смесей. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 15 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Ohrana truda v Rossii [Federal State Statistics Service. Occupational Safety and Health in Russia]. — Moscow: Rosstat, 2024. — 112 p. [in Russian]
2. GN 2.2.5.3532–18. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshchestv v vozduhe rabochej zony [GN 2.2.5.3532–18. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Hazardous Substances in Workplace Air]. — Moscow: Rospotrebnadzor, 2018. — 170 p. [in Russian]
3. Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 019/2011 «O bezopasnosti sredstv individual'noj zashchity» [Technical Regulation of the Customs Union TR CU 019/2011 "On Safety of Personal Protective Equipment"]. — Customs Union Commission, 2011. [in Russian]
4. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual. Ver. 1.0. — Shanghai, 2023. — 1125 p.
5. Winsen Electronics. GM-402B MEMS Combustible Gas Sensor. Manual v.1.1. — Zhengzhou: Winsen Electronics Technology Co., Ltd, 2017. — 9 p.
6. Winsen Electronics. GM-502B MEMS VOC Gas Sensor. Manual v.2.2. — Zhengzhou: Winsen Electronics Technology Co., Ltd, 2020. — 10 p.
7. Semtech Corporation. SX1278 LoRa Long Range Transceiver Datasheet. Rev. 7.0. — Camarillo, 2021. — 131 p.
8. Zotov S.N. Primenenie poluprovodnikovyyh gazovyh datchikov dlya kontrolya promyshlennoj atmosfery [Application of Semiconductor Gas Sensors for Industrial Atmosphere Monitoring] / S.N. Zotov, A.A. Kozlovcev // Promyshlennaya bezopasnost'. [Industrial Safety]. — 2020. — № 4. — P. 34–41. [in Russian]



9. Khisamov R.Kh. Metody ocenki professional'nogo riska vozdejstviya letuchih organicheskikh soedinenij [Methods for Assessment of Occupational Risk from Exposure to Volatile Organic Compounds] / R.H. Khisamov, R.G. Nigmatullin // Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]. — 2020. — Vol. 99. — № 8. — P. 854–861. [in Russian]
10. Dong T. Personalized Exposure Monitoring of VOCs Using In-Ear Sensors Integrated with PPE / T. Dong, Q. Zhao, H. Chen // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2021. — Vol. 342. — P. 130018.
11. Kim S. Wearable Gas Sensor Array for Real-Time Detection of Multiple VOCs / S. Kim, J. Lee // IEEE Sensors Journal. — 2022. — Vol. 22. — № 5. — P. 4451–4459.
12. Chernikov A.V. Algoritm adaptivnoj fil'tracii dannyh gazoanaliticheskikh datchikov v promyshlennykh IoT-sistemah [Algorithm for Adaptive Filtering of Gas Analytical Sensor Data in Industrial IoT Systems] / A.V. Chernikov, S.I. Ryzhov, D.M. Abramov // Avtomatizaciya v promyshlennosti [Automation in Industry]. — 2023. — № 1. — P. 44–51. [in Russian]
13. GOST 8.578–2014. GSI. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmerenij soderzhaniya komponentov gazovykh smesey [GOST 8.578–2014. GSI. State Verification Schedule for Measuring Instruments of Gas Mixture Component Content]. — Moscow: Standartinform, 2014. — 15 p. [in Russian]