

Научная статья

УДК 614.72 + 504.064; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-35-46

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

✉ Гарелина Светлана Александровна;

Рыбаков Анатолий Валерьевич.

Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Россия.

Захарян Роберт Артушевич.

Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна Национальной академии наук

Республики Армения, Ереван, Армения

✉ s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Рассматриваются современные подходы к мониторингу вредных веществ вблизи промышленных объектов с использованием беспилотных воздушных судов. Проведен анализ традиционных методов контроля загрязнений воздуха, таких как стационарные газоанализаторы, инструментально-расчетные модели и наземные обходы, выявлены их ограничения в условиях труднодоступности. Обоснована целесообразность применения мобильных воздушных комплексов на базе беспилотных воздушных судов, позволяющих повысить безопасность, оперативность и достоверность измерений. Предложена методика выбора средств измерений, устанавливаемых на беспилотных воздушных судах, с учетом массы, энергопотребления, габаритов, температурного диапазона и метрологических характеристик. Особое внимание уделено перспективным сенсорным технологиям и оптико-физическим методам измерений. Сформулированы требования к средствам измерений и обоснованы принципы их интеграции в состав беспилотных воздушных судов. Представленные решения ориентированы на повышение эффективности мониторинга атмосферного воздуха и снижение экологических и техногенных рисков.

Ключевые слова: вредные вещества, анализ воздуха, средство измерений, труднодоступные места, беспилотное воздушное судно, воздушный комплекс, газоанализатор, промышленный объект, концентрация, мониторинг воздушной среды

Для цитирования: Гарелина С.А., Рыбаков А.В., Захарян Р.А. Анализ методов и выбор средств измерений для мониторинга вредных веществ с использованием беспилотных воздушных судов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 35–46. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-35-46

Scientific article

ANALYSIS OF METHODS AND SELECTION OF MEASUREMENT INSTRUMENTS FOR MONITORING HARMFUL SUBSTANCES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

✉ Garelina Svetlana A.;

Rybakov Anatoly V.

Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia.

Zakharyan Robert A.

Nalbandyan institute of chemical physics of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, Armenia.

✉ s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. The article explores modern approaches to monitoring harmful substances near industrial facilities using unmanned aerial vehicles. Traditional air pollution control methods – such as stationary gas analyzers, instrumental-analytical models, and ground inspections – are analyzed, with key limitations identified in hard-to-reach or hazardous areas. The relevance of employing mobile aerial complexes based on unmanned aerial vehicles is substantiated, as they improve safety, responsiveness, and measurement accuracy. A methodology for selecting measurement instruments to be mounted on unmanned aerial vehicles is proposed, considering constraints such as weight, power consumption, dimensions, operating temperature range, and metrological characteristics. Special attention is given to advanced sensor technologies and optico-physical measurement methods. Requirements for onboard measuring devices are formulated, and principles for their integration into unmanned aerial vehicles platforms are justified. The proposed solutions are aimed at enhancing the effectiveness of atmospheric air monitoring and reducing environmental and technogenic risks.

Keywords: harmful substances, air analysis, measuring instrument, hard-to-reach places, unmanned aircraft, air complex, gas analyzer, industrial facility, concentration, air environment monitoring

For citation: Garelina S.A., Rybakov A.V., Zakharyan R.A. Analysis of methods and selection of measurement instruments for monitoring harmful substances using unmanned aerial vehicles // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 35–46. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-35-46.

Введение

В Академии гражданской защиты МЧС России ведется масштабная работа по разработке средств измерений для мониторинга и контроля физических параметров производственных процессов для широкого спектра промышленных объектов. К числу таких разработок относят: оптико-акустические и оптико-пиromетрические газоанализаторы, пиromетры для измерения температуры пламени и объектов, маскируемых пламенем, а также трансформаторные кондуктометры, предназначенные для контроля гидрогеохимического режима в гидротехнических сооружениях.

На основе накопленного опыта была поставлена задача создания воздушного комплекса для дистанционного мониторинга вредных веществ с применением беспилотных воздушных судов (БВС). Реализация данной задачи потребовала поэтапного решения следующих научно-технических проблем:

- анализ категорий промышленных объектов, на которых возникает необходимость в дистанционном определении состава вредных веществ в атмосфере;

– формирование перечня приоритетных контролируемых веществ, представляющих наибольшую опасность, с учетом возможности их определения с использованием одного газоанализатора;

– обоснование требований к газоанализатору и выбор его конструктивных и эксплуатационных параметров, обеспечивающих возможность интеграции в состав воздушного комплекса.

В случае отсутствия серийных технических решений, удовлетворяющих выдвинутым критериям, была предусмотрена возможность разработки оригинальных компонентов. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты проектирования такого комплекса, без анализа которых невозможно обеспечить полноту инженерного обоснования. Следует отметить, что в соответствии с принятыми техническими и организационными подходами в качестве платформы БВС был выбран Phantom IV Pro+, эксплуатируемый в Академии гражданской защиты МЧС России. Газоанализатор, адаптированный для размещения на борту данного БВС и обеспечивающий измерение концентраций предварительно выявленного спектра вредных веществ, был разработан авторами. Результаты проектирования, реализации и полевых испытаний будут представлены в последующей статье: «Воздушный комплекс на базе беспилотного воздушного судна для измерения концентраций вредных веществ: разработка, реализация и испытания».

В условиях современной промышленной деятельности особую актуальность приобретает задача оперативного и точного измерения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе. Это необходимо как для оценки экологической обстановки на территории штатно функционирующих объектов, так и в случае аварийных ситуаций и чрезвычайных ситуаций (ЧС), когда требуется быстрое принятие решений для минимизации ущерба.

Особенно остро проблема загрязнения воздуха стоит в Российской Федерации, где функционирует свыше 24 тыс. промышленных предприятий. По оценкам, ежегодные выбросы загрязняющих веществ превышают 25 млн т, включая более 500 различных соединений, при этом под воздействием техногенных выбросов находится более 65 млн чел. [1–6]. В этой связи мониторинг состояния атмосферного воздуха приобретает не только экологическую, но и социальную значимость.

Значительную долю загрязнений (более 25 %) формирует энергетический сектор [7]. Однако существующие технологии газоочистки сопряжены с высокими затратами и не решают проблему в полном объеме: очистные сооружения требуют значительных площадей, а методы удаления ряда веществ до сих пор находятся в стадии разработки. Даже применение высоких дымовых труб (260–320 м), направленных на рассеивание выбросов, не предотвращает загрязнение окружающей среды, поскольку загрязняющие вещества распространяются на расстояния до 30 км и более. Это подтверждает ограниченность традиционных инженерных решений и необходимость поиска более мобильных и эффективных средств контроля.

Не менее значимыми источниками потенциальной опасности являются магистральные трубопроводы, входящие в Единую систему газоснабжения. Их эксплуатация под высоким давлением сопровождается рисками утечек и аварий, связанных как с внутренними дефектами, так и с внешними факторами: оползнями, эрозией почвы, паводками и несанкционированными земляными работами. Статистика свидетельствует о 349 авариях за период с 2004 г., включая 223 на газопроводах и 126 на нефтепроводах, что подчеркивает необходимость постоянного контроля протяженных участков трубопроводной инфраструктуры [8].

На международном уровне Российская Федерация входит в первую десятку стран, оказывающих наибольшее влияние на изменение климата [9]. Существенную роль здесь играет метан – второй по значимости парниковый газ после CO₂ [10]. Одним из ключевых источников его эмиссии являются полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО), на которые приходится около 11 % глобальных выбросов метана [11]. При этом высокая

концентрация биогаза внутри тела полигона создает угрозу пожаров, взрывов и прорыва защитных оболочек, что усиливает неконтролируемые выбросы в окружающую среду.

Дополнительный вклад в антропогенную эмиссию вредных веществ вносит сельское хозяйство, доля которого в глобальных выбросах парниковых газов составляет около 32 % [12]. Особенno интенсивны выбросы от животноводческих комплексов, где фиксируют высокие концентрации CH_4 , NH_3 и N_2O . Эти соединения опасны даже на расстоянии до 500 м от источника выбросов, что требует их регулярного контроля вблизи животноводческих комплексов и агропромышленных предприятий.

В совокупности все перечисленные факторы свидетельствуют о высокой актуальности и объективной необходимости проведения регулярного мониторинга состава воздуха вблизи промышленных и коммунальных объектов, таких как энергетические предприятия (выбросы из труб, магистральные газопроводы), полигоны ТКО, животноводческие комплексы и др. При этом важно учитывать, что размещение стационарных газоанализаторов для мониторинга на большинстве таких объектов экономически нецелесообразно из-за их высокой стоимости, сложности обслуживания и избыточности в штатных условиях.

Материалы и методы исследования

Для решения указанных задач требуется проводить измерения концентраций таких газов, как CO_2 (один из основных парниковых газов; источник: энергетические установки, промышленные выбросы), CH_4 (второй по значимости парниковый газ; источники: полигоны ТКО, утечки из газопроводов, животноводство), CO (продукт неполного сгорания; источники: транспорт, промышленные процессы, пожары), NO , NO_2 , N_2O (NO_2 – высокотоксичный газ, регулируется санитарными нормами, N_2O – третий по значимости парниковый газ; источники: энергетика, животноводческие комплексы, ТЭЦ), NH_3 (токсичен, вызывает вторичное загрязнение при реакции с другими соединениями; источники: животноводческие комплексы, удобрения), SO_2 (токсичен, вызывает вторичное загрязнение при реакции с другими соединениями; источник: сжигание угля, металлургия), C_3H_8 (вспламеняется, представляет техногенную опасность; источники: утечки из трубопроводов, ТКО, нефтехимия) и многих других в режиме реального времени. Часто эти измерения необходимо выполнять в труднодоступных местах и в аварийных ситуациях, в том числе при ЧС, на безопасном расстоянии. Важно обеспечить высокую точность, достоверность и производительность и безопасность измерений в режиме реального времени.

Одним из ключевых направлений экологического контроля является мониторинг выбросов вредных веществ в атмосферу, в том числе в труднодоступных зонах, таких как верхние участки дымовых труб и вентиляционных шахт. Рассмотрим существующие методы определения состава воздуха в подобных условиях, а также их основные ограничения [12–16]:

1. Стационарные и переносные газоанализаторы. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных решений остаются стационарные и переносные газоанализаторы. Однако эффективность их применения существенно ограничена рядом факторов. Во-первых, результаты измерений зависят от погодных условий, особенно от температуры, влажности и скорости ветра. Во-вторых, газоанализаторы, как правило, размещают в одной фиксированной точке потока, что не позволяет охватить всю область выброса. В-третьих, в дымовую трубу могут поступать газы от нескольких котлоагрегатов с разной концентрацией загрязняющих веществ, что формирует неравномерное распределение концентраций по сечению трубы. Особенно это проявляется при снижении скорости отходящих газов, когда возникают сильно неоднородные поля концентраций, что снижает достоверность результатов.

2. Инструментально-расчетный метод основан на математических моделях распространения загрязняющих веществ и оценке потенциальных рисков на основании известных параметров производственного процесса. Однако область его применения остается ограниченной. Метод чаще всего используют для предварительной оценки уровня безопасности

на промышленных объектах, когда выполнение прямых измерений невозможно или экономически нецелесообразно. При этом точность прогнозов может быть низкой из-за высокой чувствительности модели к исходным данным и часто недостаточной адекватности математического описания реальных процессов.

Контроль состояния и герметичности магистральных трубопроводов является приоритетной задачей промышленной безопасности. На сегодняшний день для этих целей применяют следующие технологические решения, каждое из которых имеет свои ограничения:

1. Распределенные системы видеонаблюдения обеспечивают визуальный контроль над протяженными участками трубопроводов. Однако эффективность мониторинга снижается при неблагоприятных погодных условиях (дождь, туман, снег). Требует значительных эксплуатационных затрат на обслуживание оборудования и обработку видеопотока.

2. Оптоволоконные системы мониторинга основаны на регистрации изменений в характеристиках оптоволоконного кабеля, проложенного вдоль трубопровода. Несмотря на высокую чувствительность, метод сопряжен с рядом трудностей: монтаж таких кабелей представляет собой длительный, трудоемкий и дорогостоящий процесс, особенно в условиях сложного рельефа или нестабильных геологических структур. Кроме того, эффективность обнаружения аварийных утечек может снижаться при транспортировке агрессивных или нестандартных веществ.

3. Сети сейсмоакустических датчиков требуют установки и калибровки большого количества чувствительных сенсоров вдоль трассы трубопровода. Основными проблемами являются высокая стоимость, сложность интерпретации сейсмоакустических сигналов и необходимость фильтрации помех от фоновых шумов. Кроме того, точность локализации утечек ограничена – особенно при наличии посторонних вибраций или нестабильных погодных условий, влияющих на распространение сигналов.

4. Наземный мониторинг (пешие обходы, автолаборатории, кинологические группы). Один из традиционных подходов к контролю состояния магистральных трубопроводов основан на использовании пеших обходов, в том числе с привлечением кинологических расчетов и мобильных лабораторий. Несмотря на определенную эффективность, метод требует значительных человеческих и материальных ресурсов: необходимо задействовать большое количество специалистов и служебных собак, а также обеспечить их обучение и техническое сопровождение. Производительность такого способа значительно уступает воздушному мониторингу. Кроме того, затраты на содержание и логистику делают метод экономически невыгодным для протяженных трасс.

5. Воздушный мониторинг (облет территории на вертолетах). Применение пилотируемых вертолетов позволяет охватывать большие территории за короткое время. Однако данный метод характеризуется высокой стоимостью эксплуатации, зависимостью от погодных условий и ограниченной чувствительностью при обнаружении утечек газа низкой концентрации. Наличие турбулентности, осадков и сильного ветра может значительно повлиять на точность получаемых данных. Кроме того, безопасность пилотируемых полетов при аварийных ситуациях вызывает дополнительные риски.

Для контроля газовыделений на полигонах ТКО наиболее часто применяют пешие обходы с использованием портативных газоанализаторов. Преимуществом метода является его простота и доступность. Однако основными недостатками являются низкая производительность, значительные затраты времени, невозможность оперативного охвата всей территории полигона, а также высокая трудоемкость измерений.

Контроль воздушной среды в помещениях животноводческих комплексов обычно осуществляют с помощью стационарных газоанализаторов. Такие установки обеспечивают непрерывный мониторинг содержания вредных газов, включая аммиак, метан и закись азота. Однако стационарные средства контроля охватывают ограниченное пространство и не позволяют выявить распределение концентраций вне помещений, что важно при оценке

влияния на прилегающую территорию. Кроме того, данные системы чувствительны к загрязнению, требуют регулярного обслуживания и откалиброванной настройки.

Таким образом, в современных условиях становится очевидной необходимость совершенствования существующих методов мониторинга выбросов и утечек, в том числе на полигонах ТКО, в животноводческих комплексах и на других объектах с высоким экологическим и техногенным риском. Для обеспечения точности, надежности и оперативности контроля требуется внедрение более гибких, адаптируемых решений, способных функционировать в условиях ограниченного доступа и переменных внешних воздействий.

Цель настоящего исследования заключается в повышении эффективности измерения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе в режиме реального времени. Особое внимание уделяется таким аспектам, как снижение эксплуатационных затрат, повышение достоверности и производительности измерений, а также возможность работы в труднодоступных зонах. Решение этих задач предлагается за счет создания и практического применения воздушного комплекса на базе БВС.

Наиболее перспективным направлением является использование БВС, оснащенных специализированными газоанализаторами. Это техническое решение позволяет исключить влияние человеческого фактора, обеспечить высокий уровень безопасности для персонала, а также упростить доступ к объектам, где применение традиционных средств затруднено или невозможно. БВС выступает как универсальная мобильная платформа, объединяющая преимущества наземных и воздушных методов, и тем самым значительно повышает эффективность мониторинга.

Дополнительным аргументом в пользу внедрения таких решений является экономическая целесообразность. Проведение одной серии замеров воздуха с помощью БВС требует меньше ресурсов по сравнению с традиционными методами и обеспечивает большую гибкость при масштабировании мониторинга в полевых условиях.

Следует отметить, что действующая нормативно-техническая база (в частности, Воздушный кодекс Российской Федерации, ГОСТ Р 56122–2014 и ГОСТ Р 57258–2016) оперирует только двумя терминами: беспилотное воздушное судно и беспилотная авиационная система. В связи с этим в рамках настоящего исследования вводится уточняющий термин – воздушный комплекс, обозначающий совокупность двух и более специализированных компонентов (БВС и средств измерений), конструктивно не объединенных на предприятии-изготовителе, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных задач в единой измерительной системе.

Одним из ключевых аспектов при проектировании воздушного комплекса является выбор и обоснование применимых средств измерений, которые могут быть установлены на борту БВС. Данный выбор существенно ограничен рядом факторов, связанных с конструктивными, энергетическими и эксплуатационными характеристиками БВС.

Согласно классификации, приведенной в ГОСТ 13320–81, газоанализаторы подразделяют по степени мобильности на стационарные, передвижные, переносные и носимые (индивидуальные) устройства. Однако следует отметить, что ни одна из этих категорий не охватывает специфические требования к газоанализаторам, устанавливаемым на БВС, поскольку норматив не предусматривает их использования в составе воздушных комплексов.

Особенность БВС заключается в строгих ограничениях по массе, объему, энергопотреблению и устойчивости к внешним воздействиям. В связи с этим на борту могут размещаться исключительно такие средства измерений, которые не требуют сложных технологических операций – пробоотбора, пробоподготовки, нагревания, смешения реагентов, взвешивания и использования химических реагентов. Следовательно, приоритетными являются методы прямого измерения, а также – в ограниченных случаях – косвенного, если они не нарушают конструктивные и эксплуатационные параметры платформы.

В соответствии с ГОСТ Р 8.1030–2024 выделяют 12 видов измерений, из которых к условиям мобильного мониторинга применимы следующие:

- измерения уровня;
- измерения физико-химического состава;
- измерения температуры;
- оптико-физические измерения;
- измерения ионизирующих и ионизированных излучений.

Одновременно с этим целый ряд методов измерений является ограниченно применимым или малопригодным для использования на борту БВС. Это обусловлено совокупностью факторов, включая необходимость громоздкого оборудования, использование жидких или горючих реагентов, нестабильность функционирования в условиях вибрации и переменного движения, а также чрезмерные требования к энергопитанию, массе измерительных модулей. К числу таких методов относят фотоколориметрический, термохимический, пламенно-ионизационный, аэрозольно-ионизационный, масс-спектрометрический, хроматографический и др.

Вместе с тем наиболее перспективными для применения в воздушных комплексах являются следующие методы: абсорбционно-оптические (ИК- и УФ-поглощение); термокондуктометрический, термомагнитный и аналогичные им, обладающие приемлемыми массогабаритными и энергетическими характеристиками.

В последнее десятилетие в измерительной практике наблюдается стремительное распространение сенсорных технологий – первичных измерительных преобразователей, выполненных на твердотельной элементной базе. Такие сенсоры сочетают в себе не только функцию измерения, но и первичную обработку данных (усиление, нормирование, линеаризация, аналого-цифровое преобразование и др.). Их основные преимущества – миниатюрность, надежность, низкое энергопотребление и высокая помехозащищенность, что делает их особенно актуальными для применения на борту БВС.

В соответствии с ГОСТ Р 8.673–2009 такие сенсоры классифицируются как интеллектуальные датчики – измерительные устройства со встроенной функцией метрологического самоконтроля и адаптации. Их использование открывает новые возможности для построения компактных, энергоэффективных и высокоточных систем мониторинга в составе воздушных комплексов.

Результаты исследования и их обсуждение

Применение БВС для изучения параметров атмосферного воздуха – концепция, находящаяся в фокусе научного интереса на протяжении последнего десятилетия (например, работы [17, 18]). Однако, несмотря на накопленный теоретический и практический опыт, остаются нерешенными важнейшие вопросы, касающиеся эффективной интеграции средств измерений в качестве полезной нагрузки на БВС, а также выбора оптимальной модели летательного аппарата с учетом условий конкретной задачи.

В ряде исследований рассматриваются БВС, оснащенные сенсорами, работающими по принципу диодно-лазерной спектроскопии. Такие устройства позиционируют как перспективные для выявления утечек метана на расстоянии до 100 м при минимальной концентрации порядка 5 ppm (например, работа [17]). Однако эффективность данных систем существенно ограничена при неблагоприятных погодных условиях (дождь, снег, туман), вызывающих рассеивание лазерного сигнала и, соответственно, снижение точности измерений.

Для целей экологического мониторинга также предлагается использование БВС, оборудованных электрохимическими газоанализаторами. Как показано в работе [17], подобные комплексы могут обеспечивать идентификацию до восьми различных соединений. Вместе с тем их существенным недостатком остается ограниченный срок службы сенсоров,

составляющий, как правило, не более одного года, что существенно снижает их эксплуатационную надежность и требует регулярной замены чувствительных элементов.

В рамках разрабатываемого авторами воздушного комплекса ключевую роль играют средства измерений, выбор которых осуществляют с прицелом на решение конкретной аналитической задачи. В этой связи сформулированы следующие основные требования к измерительным модулям, пред назначенным для установки на БВС:

- соответствие заданному диапазону измерений и требуемой погрешности;
- высокая селективность по отношению к измеряемому параметру;
- масса устройства – не более нескольких сотен грамм;
- компактность (объем не более одного кубического дециметра);
- минимальное энергопотребление, совместимое с ресурсами БВС;
- работоспособность в широком температурном диапазоне;
- устойчивость к вибрационным и другим нагрузкам, возникающим при полете.

Дополнительно следует учитывать, что большинство газоанализаторов не обладают широким диапазоном измерений, и потому необходимо предварительно оценить ожидаемую концентрацию контролируемого компонента в исследуемой зоне. Это позволит обеспечить правильный выбор сенсора по диапазону и избежать как перегрузки, так и недостоверности в нижней границе измерений.

Процесс выбора измерительного устройства, предназначенного для установки на БВС, должен быть строго регламентирован с учетом как метрологических, так и эксплуатационных ограничений. Методика выбора включает следующие последовательные этапы:

1. Определение метода измерений. Выбор метода должен осуществляться исходя из характера контролируемого параметра (например, концентрация, температура, спектральные характеристики) и предполагаемых условий эксплуатации (дальность, температура, агрессивность среды и др.).

Например, для решения задач, обозначенных в данной статье, наибольшую практическую ценность представляют полупроводниковые и инфракрасные датчики. Эти устройства выгодно отличаются по стоимости, долговечности, компактности и энергоэффективности, а также обеспечивают возможность измерения концентраций широкого спектра вредных веществ, приведенных в статье, на уровне их предельно допустимых концентраций.

2. Подбор средства измерений. На данном этапе выбирается конкретное измерительное устройство, соответствующее заданному диапазону измерений и требуемому уровню погрешности.

Например, первоначально в качестве измерительного модуля на Phantom IV Pro+ использовался газоанализатор, основанный на электрохимическом принципе. Однако в процессе эксплуатации были выявлены его существенные ограничения: выход из строя менее чем за год вследствие низкой устойчивости сенсоров к влаге, температурным колебаниям, а также ограниченного срока службы реагентов и чувствительных элементов. В связи с этим, несмотря на приемлемые метрологические характеристики, электрохимические газоанализаторы были исключены из дальнейшего рассмотрения как неподходящие для решения задач, обозначенных в данной статье.

3. Оценка соответствия средств измерений по массе $G_{СИ}$. Проверяется выполнение условия:

$$G_{СИ} \leq G_{\max}.$$

Если нет, то выбираем более легкий прибор либо используем БВС с большей грузоподъемностью.

Проверяем, выполняется ли условие по энергопотреблению средства измерений $C_{\text{СИ}}$:

$$C_{\text{СИ}} \leq C_{\text{max}}.$$

Если нет, то выбираем менее энергоемкое средство измерений или выбираем аккумулятор с большей емкостью.

Проверяем выбранное средство измерений на соответствие рабочему диапазону температур окружающего воздуха и к воздействию вибрации.

Если выбранное средство измерений соответствует всем требованиям и ограничениям, то прибор выбран.

Заключение

Проведенный анализ показал, что применение БВС в составе специализированного измерительного комплекса является эффективным и технологически обоснованным решением для мониторинга вредных веществ на промышленных объектах условиях труднодоступности и аварийной опасности.

Установлено, что традиционные методы контроля (стационарные посты, инструментально-расчетные модели, наземные обходы и др.) обладают значительными ограничениями по охвату территории, оперативности и безопасности, особенно в аварийных условиях.

Выявлены приоритетные категории объектов, требующие дистанционного мониторинга, включая энергетические установки, магистральные трубопроводы, полигоны ТКО и животноводческие комплексы. Сформирован перечень наиболее значимых загрязняющих компонентов, подлежащих контролю: CO, NH₃, CO₂, CH₄, C₃H₈, N₂O и др.

Предложена методика выбора средств измерений для воздушного комплекса, включающая пошаговую оценку: (1) применимого метода; (2) метрологических характеристик; (3) соответствия по массе, энергопотреблению и температурному диапазону. Приведен пример отказа от электрохимического газоанализатора ввиду его недолговечности и уязвимости к внешним воздействиям.

Введено понятие «воздушного комплекса» как совокупности БВС и измерительных модулей, конструктивно не объединенных на этапе производства, но функционально сопряженных в рамках единой задачи. Определены критерии совместимости сенсоров с платформой.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых комплексов для экологического и техногенного мониторинга, а также в рамках программ импортонезависимых решений в сфере мобильных средств контроля.

Список источников

1. Безопасность жизнедеятельности / Л. В. Бондаренко [и др.]. М.: Изд-во Российской экономической академии, 2008. 229 с.
2. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Российской Федерации в 2023 году. URL: <https://mnr.gov.ru> (дата обращения: 27.02.2025).
3. Будилова Е. В., Лагутин М. Б. Загрязнение атмосферного воздуха и демографические показатели здоровья в городах России // Вестник Московского университета. Сер. 23. Антропология. 2021. № 4. С. 81–96.
4. Hilary I., Inuang, Daniels D. Environmental Monitoring. EOLSS Publications. 2005. Vol. 1. P. 587.
5. Hilary I., Inuang, Daniels D. Environmental Monitoring. EOLSS Publications. 2005. Vol. 2. P. 339.
6. Ponthieu E. The Climate Crisis, Democracy and Governance. Cham: Springer, 2020. 112 p.

7. Рябова Т. В., Жаворонок А. В. Проблемы и перспективы развития тепловой энергетики в России // Экономика России в XXI веке: XII Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 424–431.
8. Никулина Д. П. Совершенствование системы комплексного мониторинга технического состояния площадных объектов магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа, 2021. 150 с.
9. Environmental Performance Index by Country 2025 // World Population Review. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/environmental-performance-index-by-country> (дата обращения: 05.05.2025).
10. Кузнецова А. Р., Кузнецов А. И. Тенденции выбросов парниковых газов в Российской Федерации // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2024. № 1. С. 104–126.
11. Снижение эмиссии метана на полигонах твердых коммунальных отходов / Н. И. Лыков [и др.] // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 36–40.
12. Гриденева Т. Т. Эмиссия вредных газов при производстве животноводческой продукции // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации в животноводстве. 2024. № 4 (8). С. 61–69.
13. Емельянчиков В. И., Елисеенко Ю. Ю. Мониторинг промышленных выбросов: измерение концентрации загрязняющих веществ в отходящих газах стационарных источников // Промпривод. 2018. 02 февр. URL: <https://promprivod.by/stati/statji/monitoring-promyshlennyh-vybrosov> (дата обращения: 15.06.2025).
14. Инфразвуковой мониторинг магистрального газопровода / Н. В. Чухарева [и др.] // Газовая промышленность. 2019. № 6 (785). С. 42–49.
15. Мониторинг утечек метана на свалках и газопроводе: преимущества применения дронов // Gas-Leak.ru. 2024. URL: <https://gas-leak.ru/blog/357> (дата обращения: 15.06.2025).
16. Латышенко К. П. Экологический мониторинг: учеб. и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2025. 458 с.
17. Газоанализатор как основной инструмент для мониторинга состояния воздуха // Аэромотус. 2020. 17 сент. URL: <https://aeromotus.ru/gazoanalizator-kak-osnovnoj-instrument-dlya-monitoringa-sostoyaniya-vozdukh> (дата обращения: 14.06.2025).
18. Drone Technology: Future Trends and Practical Applications 2023 / S. Mohanty [et al.]. Scrivener Publishing LLC, 2023. P. 464.

References

1. Безопасность жизнедеятельности / Л. В. Бондаренко [и др.]. М.: Изд-во Российской экономической академии, 2008. 229 с.
2. Государственный отчет о состоянии и охране окружающей среды в Российской Федерации в 2023 году. URL: <https://mnr.gov.ru> (дата обращения: 27.02.2025).
3. Будилова Е. В., Лагутин М. В. Загрязнение атмосферного воздуха и демографические показатели здравья в городах России // Вестник Московского университета. Сер. 23. Антропология. 2021. № 4. С. 81–96.
4. Hilary I., Inuang, Daniels D. Environmental Monitoring. EOLSS Publications. 2005. Vol. 1. P. 587.
5. Hilary I., Inuang, Daniels D. Environmental Monitoring. EOLSS Publications. 2005. Vol. 2. P. 339.
6. Ponthieu E. The Climate Crisis, Democracy and Governance. Cham: Springer, 2020. 112 p.
7. Рябова Т. В., Жаворонок А. В. Проблемы и перспективы развития тепловой энергетики в России // Экономика России в XXI веке: XII Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 424–431.

8. Nikulina D. P. Sovershenstvovanie sistemy kompleksnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya ploshchadnyh ob"ektorov magistral'nyh gazoprovodov: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: RGU nefti i gaza, 2021. 150 s.
9. Environmental Performance Index by Country 2025 // World Population Review. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/environmental-performance-index-by-country> (data obrashcheniya: 05.05.2025).
10. Kuznecova A. R., Kuznecov A. I. Tendencii vybrosov parnikovyh gazov v Rossijskoj Federacii // Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnih resursov. 2024. № 1. S. 104–126.
11. Snizhenie emissii metana na poligonah tverdyh kommunal'nyh othodov / N. I. Lykov [i dr.] // Problemy regional'noj ekologii. 2018. № 4. S. 36–40.
12. Gridneva T. T. Emissiya vrednyh gazov pri proizvodstve zhivotnovodcheskoj produkci / Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizacii v zhivotnovodstve. 2024. № 4 (8). S. 61–69.
13. Emel'yanchikov V. I., Eliseenko Yu. Yu. Monitoring promyshlennih vybrosov: izmerenie koncentracii zagryaznyayushchih veshchestv v othodyashchih gazah stacionarnyh istochnikov // Promprivod. 2018. 02 fevr. URL: <https://promprivod.by/stati/statji/monitoring-promyshlennih-vybrosov> (data obrashcheniya: 15.06.2025).
14. Infrazvukovoj monitoring magistral'nogo gazoprovoda / N. V. Chuhareva [i dr.] // Gazovaya promyshlennost'. 2019. № 6 (785). S. 42–49.
15. Monitoring utechek metana na svalkah i gazoprovode: preimushchestva primeneniya dronov // Gas-Leak.ru. 2024. URL: <https://gas-leak.ru/blog/357> (data obrashcheniya: 15.06.2025).
16. Latyshenko K. P. Ekologicheskij monitoring: ucheb. i praktikum dlya vuzov. M.: Yurajt, 2025. 458 s.
17. Gazoanalizator kak osnovnoj instrument dlya monitoringa sostoyaniya vozduha // Aeromotus. 2020. 17 sent. URL: <https://aeromotus.ru/gazoanalizator-kak-osnovnoj-instrument-dlya-monitoringa-sostoyaniya-vozdukh> (data obrashcheniya: 14.06.2025).
18. Drone Technology: Future Trends and Practical Applications 2023 / S. Mohanty [et al.]. Scrivener Publishing LLC, 2023. R. 464.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.04.2025; одобрена после рецензирования: 14.05.2025;
принята к публикации: 03.06.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.04.2025; approved after review: 14.05.2025;
accepted for publication: 03.06.2025

Информация об авторах:

Гарелина Светлана Александровна, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1 А), кандидат технических наук, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0784-3003>, SPIN-код: 8591-0495

Рыбаков Анатолий Валерьевич, начальник научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1 А), доктор технических наук, профессор, e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 8654-3788

Захарян Роберт Артушевич, старший научный сотрудник Института химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН РА (0014, Республика Армения, ул. П. Севака, д. 5/2), кандидат технических наук, e-mail: razleib@yandex.ru, SPIN-код: 4337-8340

Information about the authors:

Garelina Svetlana A., professor of the department of mechanics and engineering graphics of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bldg. 1 A), candidate of technical sciences, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8591-0495

Rybakov Anatoly V., head of the research center of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bldg. 1 A), doctor of technical sciences, professor, e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8654-3788

Zakharyan Robert A., senior researcher of Nalbandyan institute of chemical physics of the National Academy of sciences of the Republic of Armenia (0014, RA, Yerevan, P. Sevak str., 5/2), candidate of technical sciences, e-mail: razleib@yandex.ru, SPIN: 4337-8340