

Научная статья

УДК 614.72 + 504.064; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-76-88

ВОЗДУШНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ: РАЗРАБОТКА, РЕАЛИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ

✉ 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.garelin@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки и экспериментальной апробации воздушного комплекса для измерения концентраций вредных веществ в воздухе на базе беспилотного воздушного судна вертолетного типа. Описана методика выбора платформы беспилотного воздушного судна с учетом грузоподъемности, энергоемкости и устойчивости, а также обоснован выбор квадрокоптера Phantom IV Pro+ для реализации комплекса. Представлены конструкция и принцип действия газоанализатора, основанного на комбинации полупроводникового и инфракрасного датчиков. Рассмотрены технические решения, обеспечивающие высокую селективность, точность и устойчивость к внешним условиям. Приведены результаты летных испытаний воздушного комплекса на реальном промышленном объекте, подтверждающие его эффективность для дистанционного мониторинга атмосферного воздуха. Показаны преимущества комплекса: мобильность, низкая зависимость от погодных условий, безопасность эксплуатации и высокая чувствительность к низким концентрациям вредных веществ.

Ключевые слова: анализ состава воздуха в труднодоступных местах, беспилотное воздушное судно, газоанализатор, вредные вещества, концентрация, мониторинг воздушной среды

Для цитирования: Гарелина С.А., Рыбаков А.В., Захарян Р.А. Воздушный комплекс на базе беспилотного воздушного судна для измерения концентраций вредных веществ: разработка, реализация и испытания // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 76–88. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-76-88

Scientific article

AIR COMPLEX BASED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR MEASURING THE CONCENTRATION OF HARMFUL SUBSTANCES: DEVELOPMENT, IMPLEMENTATION AND TESTING

Garelin 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.garelin@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. The article presents the results of the development and experimental testing of an aerial system for measuring concentrations of harmful substances in the air based on an unmanned helicopter-type aircraft. The method of choosing the platform of an unmanned aircraft is described, taking into account the payload, energy intensity and stability, and the choice of the Phantom IV Pro+ quadcopter for the implementation of the complex is justified. The design and operating principle of a gas analyzer based on a combination of semiconductor and infrared sensors are presented. Technical solutions providing high selectivity, accuracy and resistance to external conditions are considered. The results of flight tests of the air complex at a real industrial facility are presented, confirming its effectiveness for remote monitoring of atmospheric air. The advantages of the complex are shown: mobility, low dependence on weather conditions, safety of operation and high sensitivity to low concentrations of harmful substances.

Keywords: analysis of air composition in hard-to-reach places, unmanned aircraft, gas analyzer, harmful substances, concentration, monitoring of the air environment

For citation: Garelin S.A., Rybakov A.V., Zakharyan R.A. Air complex based on an unmanned aerial vehicle for measuring the concentration of harmful substances: development, implementation and testing // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 76–88. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-76-88.

Введение

Применение беспилотных воздушных судов (БВС) в сочетании с газоанализаторами и иными средствами измерений (СИ) открывает принципиально новые возможности для мониторинга качества атмосферного воздуха, особенно в труднодоступных, потенциально опасных или экстремальных зонах. Такие комплексы позволяют организовать дистанционный экологический контроль, обеспечивая получение оперативных и достоверных данных о концентрации вредных веществ без непосредственного участия персонала и без воздействия на измеряемую среду. В условиях промышленной эксплуатации это способствует не только повышению точности и скорости измерений, но и существенному снижению рисков для обслуживающего персонала, особенно при аварийных выбросах, пожарах, утечках газа или обследовании участков с ограниченным доступом.

Ряд обзоров [1–5] подтверждает высокий потенциал БВС в экологическом мониторинге, однако демонстрирует и системные ограничения текущих подходов. Так, в работе [1] представлено концептуальное обобщение применения БВС в атмосферном контроле, однако отсутствует классификация летательных платформ по эксплуатационным характеристикам (грузоподъемность, высота и продолжительность полета, энергетическая эффективность), что затрудняет выбор средств под конкретные задачи. Газоанализаторы рассматриваются лишь на уровне типологий по физическому принципу действия, без анализа

метрологических характеристик и процедур калибровки. Аналогичные недостатки отмечены в монографии [3], охватывающей различные отрасли, включая экологию, но не дающей технически обоснованных рекомендаций по сенсорам, способам коррекции погрешностей и обеспечению достоверности в переменных условиях. Статья [4], посвященная автономным решениям, также не содержит технической спецификации аппаратных средств и не затрагивает экономическую сторону их применения. В работе [5], сосредоточенной на мониторинге особо охраняемых природных территорий, представлен прикладной опыт использования БВС, но отсутствует инженерный анализ задействованных комплексов и методик обработки данных.

Таким образом, несмотря на прогресс в области дистанционного мониторинга, большинство известных публикаций ограничены концептуальными описаниями и не решают ряд критически важных задач, включая выбор сенсоров с учетом метрологических требований, учет энергетических и эксплуатационных ограничений платформ, а также методики адаптации комплексов к условиям чрезвычайной ситуации (ЧС) или промышленной эксплуатации. В этой связи возрастают актуальность исследования, направленного на разработку и апробацию конкретных технических решений для мониторинга вредных веществ с применением БВС и газоанализаторов, адаптированных под условия риска, ограничения доступа и необходимости высокоточного контроля параметров воздушной среды.

Однако эффективность и надежность работы воздушного комплекса напрямую зависят от правильного выбора платформы БВС, к которой предъявляют целый ряд технических и эксплуатационных требований. К числу ключевых параметров относят:

- грузоподъемность, достаточная для размещения газоанализатора и сопутствующего оборудования;
- время автономного полета, определяющее продолжительность мониторинга без замены аккумуляторов;
- стабильность полета, особенно при воздействии ветровых нагрузок и вибраций;
- дальность и устойчивость передачи сигнала, обеспечивающие непрерывность получения данных;
- уровень защиты корпуса и компонентов, позволяющий использовать БВС в неблагоприятных погодных и промышленных условиях.

Указанные параметры определяют пригодность конкретной летательной платформы для выполнения задач мониторинга в условиях, требующих высокой точности измерений, устойчивости к внешним воздействиям и способности функционировать вблизи потенциальных источников загрязнения. В этой связи особое значение приобретает сопоставление технических характеристик БВС с параметрами выбранных СИ, включая массу, энергопотребление, требования к виброзоляции и температурному режиму. Кроме того, важным аспектом остается оценка совокупной энергетической эффективности комплекса, в том числе путем оптимизации конфигурации полезной нагрузки, траекторий полета и режимов работы аппаратуры.

Таким образом, обоснованный выбор платформы БВС выступает неотъемлемым элементом методики построения комплексных систем экологического мониторинга, обеспечивая достижение требуемой достоверности измерений и надежности функционирования в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Материалы и методы исследования

Методика выбора БВС для дистанционного мониторинга промышленных объектов и окружающей среды представляет собой логически последовательную инженерную процедуру, направленную на обеспечение соответствия технических характеристик БВС задачам мониторинга. В ее основе – строгие количественные критерии, обеспечивающие работоспособность комплекса в заданных условиях эксплуатации.

Методика включает следующие этапы:

1. Формулировка цели мониторинга, включая постановку задач по получению экологически значимой информации (например, контроль концентрации вредных веществ в воздухе).

2. Формирование технического задания на воздушный комплекс, включающее:

– выбор объекта наблюдения;

– определение расстояния от точки запуска БВС до объекта мониторинга L ;

– определение высоты полета H , на которой необходимо проводить измерения;

– указание контролируемого параметра (например, вредного вещества, его концентрации) и диапазона его изменений;

– оценка требуемой частоты измерений (число замеров в единицу времени).

3. Выбор СИ контролируемого параметра (газоанализатора или иного сенсора) с учетом его диапазона измерений, чувствительности, времени отклика и массы.

4. Выбор радиопередатчика, обеспечивающего надежную передачу данных. При этом должно выполняться условие: $L_{\text{перед}} > L$, где $L_{\text{перед}}$ – радиус действия передатчика. Если это неравенство не выполняется, необходимо выбрать передатчик с большей дальностью радиопередачи.

5. Определение типа БВС: выбор между самолетным или вертолетным типом платформы осуществляют на основе анализа конфигурации промышленного объекта и характера мониторинга (например, [6, 7]).

БВС самолетного типа характеризуется высокой аэродинамической эффективностью и продолжительным временем автономного полета. Он подходит для мониторинга линейных объектов (магистральных трубопроводов, дорог, линий электропередач), обследования обширных территорий (например, зон с рассеянным загрязнением), полетов на больших расстояниях (от десятков до сотен километров) при ограниченной массе полезной нагрузки. Однако такие БВС требуют значительного пространства для взлета и посадки, обладают меньшей маневренностью и не способны «зависать» над точкой.

БВС вертолетного типа обеспечивает вертикальный взлет и посадку, а также высокую маневренность и возможность зависания. Эти свойства критичны при мониторинге локальных источников выбросов, работе в условиях ограниченного пространства (например, заводские корпуса, технологические площадки), проведении измерений вблизи потенциально опасных зон (газовые факелы, зоны аварий). Основным ограничением таких БВС являются меньшая дальность полета и ограниченная продолжительность автономной работы.

6. Расчет технических параметров БВС:

– грузоподъемность $G_{\text{БВС}}$:

$$G_{\text{БВС}} > G_{\text{СИ}} + G_{\text{перед}} + G_{\text{вк}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{СИ}}$ – вес СИ; $G_{\text{перед}}$ – вес передатчика; $G_{\text{вк}}$ – вес видеокамеры;

– энергоемкость для работы полезной нагрузки $C_{\text{БВС1}}$:

$$C_{\text{БВС1}} > C_{\text{СИ}} + C_{\text{перед}} + G_{\text{вк}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{СИ}}$, $C_{\text{перед}}$, $G_{\text{вк}}$ – энергоемкость, обеспечивающая штатную работу СИ, передатчика и видеокамеры, соответственно;

– энергопотребление на полет $C_{\text{БВС2}}$:

$$C_{\text{БВС2}} > LB_{\text{полёта}}m + HB_{\text{подъёма}}n, \quad (3)$$

где $B_{\text{полёта}}$ и $B_{\text{подъёма}}$ – удельный расход электричества при горизонтальном полете и подъеме, соответственно; m – число полетов длиной L ; n – число подъемов высотой H ;

– полная емкость аккумулятора $C_{БВС}$:

$$C_{БВС} > C_{БВС1} + C_{БВС2} = C_{СИ} + C_{перед} + G_{вк} + LB_{полёта}m + HB_{подъёма}n. \quad (4)$$

В случае невыполнения условий (1–4) необходимо скорректировать выбор БВС с учетом увеличения соответствующих характеристик: грузоподъемности, энергоемкости и (или) типа платформы.

В соответствии с разработанной методикой обоснованного выбора беспилотной платформы в качестве базовой конструкции для реализации воздушного мониторингового комплекса было выбрано БВС вертолетного типа – Phantom IV Pro+ [8], используемый на кафедре аэронавигации и беспилотных авиационных систем Академии гражданской защиты МЧС России. Указанный выбор обусловлен совокупностью эксплуатационных и летно-технических параметров, обеспечивающих соответствие требованиям мониторинга в сложных и потенциально опасных условиях, а также подтвержденной надежностью в реальной практике. К числу ключевых характеристик квадрокоптера Phantom IV Pro+ относят: продолжительность автономного полета – до 30 мин; дальность передачи сигнала – 3,5 км в стандарте CE, 4,0 км для SRRC и 7,0 км по FCC; емкость аккумуляторной батареи – 5 800 мА·ч; допустимый температурный диапазон эксплуатации – от 0 до +40 °C.

Указанные параметры обеспечивают необходимую гибкость и устойчивость при проведении мониторинга вблизи промышленных объектов, в том числе в условиях ограниченного доступа, повышенной задымленности или нестабильного микроклимата.

Первоначально в качестве измерительного модуля на БВС был установлен газоанализатор, работающий на электрохимическом принципе. Несмотря на высокую чувствительность и относительную простоту конструкции, в процессе эксплуатации было выявлено его ограниченное ресурсное и эксплуатационное качество: прибор вышел из строя менее чем через один год использования. Это стало следствием низкой устойчивости электрохимических сенсоров к воздействию влаги, температурных колебаний, а также ограниченного срока службы реагентов и чувствительных элементов.

Данный опыт подтвердил необходимость перехода к более надежным типам сенсорных технологий, обеспечивающим стабильную работу в условиях реального мониторинга и соответствующих специфике применения в составе воздушных комплексов.

Следует отметить, что до недавнего времени рынок газоаналитической техники в Российской Федерации в значительной степени зависел от зарубежных поставок и импортных компонентов [9]. Такая ситуация ограничивала технологическую независимость, повышала стоимость измерительных систем и снижала устойчивость их поставок в условиях внешнеэкономических ограничений. В связи с этим встал вопрос о разработке отечественного газоанализатора, способного обеспечивать измерения по ключевым параметрам, включая концентрации таких веществ, как CO, NH₃, CO₂, CH₄, C₃H₈, N₂O и др.

Целью стало создание компактного, высокоточного и энергетически эффективного газоанализатора, специально адаптированного для размещения на борту БВС. Основными требованиями к прибору были: малые массогабаритные характеристики, устойчивость к вибрациям и температурным колебаниям, высокая чувствительность и селективность по отношению к приоритетным загрязняющим веществам.

Для обоснования выбора сенсоров авторами был проведен анализ технических характеристик наиболее распространенных типов датчиков, применяемых в газоанализаторах. На основе обзора значительного количества литературных источников (список не представлен в статье) была составлена сводная таблица параметров.

Таблица

**Сравнительные тактико-технические характеристики
самых востребованных датчиков для газоанализаторов**

Датчик	Применение	Срок службы	Отравление	Устойчивость к изменениям окружающей среды	Стоимость	Спектр контролируемых веществ. Чувствительность	Особенности
Термокаталитический	Для контроля взрывоопасных концентраций газов	Короткий	Неустойчив	Высокая	Низкий диапазон	Широкий спектр контролируемых веществ; Не подходят для измерения малых концентраций газов	Из-за старения и воздействия следовых количеств отправляющих веществ постепенно смещается нулевой сигнал и снижается чувствительность. Чувствительность зависит от свойств определяемого газа. Требовательны к обслуживанию
Полупроводниковый	Для выявления малейших утечек токсичных или горючих веществ. Для измерения предельно допустимых концентраций (ПДК) широкого спектра токсичных и горючих газов	Длительный	Устойчив	Высокая	Низкий диапазон	Высокая чувствительность к сверхнизким концентрациям газов, которые трудно фиксировать с помощью других типов датчиков	Долговременная стабильность
Термокондуктивный	Для измерения концентраций негорючих газов, таких как аргон, азот и углекислый газ	Длительный	–	Низкая	Низкий диапазон	Не обладают высокой избирательностью. Используют, если контролируемый компонент по теплопроводности существенно отличается от остальных	Стабильность показаний. Устойчивость к агрессивным средам

Датчик	Применение	Срок службы	Отравление	Устойчивость к изменениям окружающей среды	Стоимость	Спектр контролируемых веществ. Чувствительность	Особенности
Электрохимический	Для измерения ПДК токсичных веществ	Короткий	Неустойчив	Высокая по температуре, но влажность влияет на точность	Средний диапазон	Высокая чувствительность	Низкая селективность. Крупные габариты, необходимость носить с собой реагенты и блоки
Гальванический	Для измерения кислорода, водорода, углекислого газа, сероводорода, аммиака и др. C_nH_n	Увеличенный срок службы по сравнению с электрохимическим	Неустойчив	Высокая	Высокий диапазон	Высокая чувствительность. Хорошая селективность	Не требуют внешнего питания. Необходимо подбирать электроды (при отсутствии кислорода проявление электродных процессов)
Инфракрасный	Для измерения взрывоопасных концентраций (ДВК) горючих газов и паров в диапазоне от 0 до 100 % НКПР, а также определение концентраций в объеме	Длительный	Устойчив	Высокая	Средний диапазон	Высокая чувствительность	Нечувствительность к полимеризирующимся и коррозийным веществам и катализитическим ядам
Интерферометрический	Для измерения горючих газов, углекислого газа, элегаза	Длительный	Устойчив	Низкая	Средний диапазон	Высокая точность. Линейность статической характеристики	Низкая погрешность
Фотоионизационный	Обнаружение летучих органических соединений (ЛОС) и токсичных газов (бензол, толуол)	Зависимость от УФ-лампы (срок службы 100–5 000 ч)	Устойчив	Зависит от пыли	Высокий диапазон	Чувствительность к низким концентрациям. Широкий спектр измеряемых веществ	Не определяет газы с высоким потенциалом ионизации (метан, CO_2). Высокое энергопотребление
Пиролитический	Для измерения ПДК высокотоксичных газов	Длительный	Устойчив	Высокая	Высокий диапазон	Высокая точность	Большая постоянная времени

Примечание: НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективными для поставленных задач являются полупроводниковые датчики, обладающие высокой чувствительностью к малым концентрациям широкого спектра газов и устойчивостью к внешним условиям. Вторыми по эффективности оказались инфракрасные (ИК) сенсоры, обеспечивающие высокую точность при измерении концентраций метана, углекислого газа и других горючих веществ.

Таким образом, было принято решение о создании комбинированного газоанализатора, сочетающего в себе преимущества полупроводниковых и инфракрасных датчиков, что позволило достичь оптимального баланса между точностью, компактностью и энергетической автономностью устройства.

В данном случае потребовалось использование комбинированного подхода, объединяющего в одном корпусе как полупроводниковые датчики, так и ИК (рис. 1). Полупроводниковые датчики, используемые авторами, способны измерять концентрации CO , NH_3 и H_2S , а ИК – метана, пропана и CO_2 , CO , N_2O , каждый из них работает в своем диапазоне концентраций.

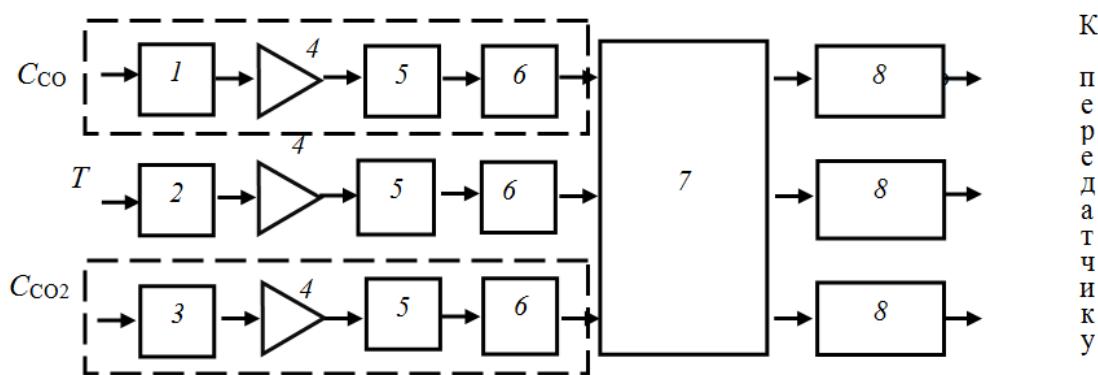


Рис. 1. Блок-схема газоанализатора на примере измерений концентраций CO , CO_2 и температуры:

- 1 – полупроводниковый датчик;
- 2 – терморезистор;
- 3 – ИК-датчик;
- 4 – усилитель;
- 5 – нормирующий преобразователь;
- 6 – аналого-цифровой преобразователь;
- 7 – микроконтроллер;
- 8 – цифро-аналоговый преобразователь

Ключевая особенность разработанной конструкции заключается в модульности архитектуры, что позволяет в перспективе интегрировать дополнительные сенсорные элементы, расширяя тем самым спектр измеряемых загрязняющих веществ. Такая возможность обеспечивает адаптацию газоанализатора к изменяющимся требованиям мониторинга и особенностям конкретных промышленных предприятий.

Новизна разработанного газоанализатора заключается в применении оригинальных схемотехнических и конструктивных решений, включая использование компактной, энергоэффективной элементной базы и специализированного микропроцессорного управления. В отличие от традиционных приборов новая модель отличается существенно меньшими габаритами и массой, что делает ее пригодной для установки на борту БВС с ограниченной грузоподъемностью (рис. 2).

В приборе реализована оптимизированная электрическая схема, обеспечивающая минимизацию энергопотребления при сохранении высокой чувствительности и быстродействия. Кроме того, в состав устройства включена система защиты от ложных срабатываний, основанная на алгоритмах обработки сигнала, что позволяет повысить достоверность измерений в условиях нестабильной внешней среды (температурные колебания, вибрации, пылевая нагрузка и др.).

Комплексность, компактность и интеллектуальная обработка данных позволяют использовать данный газоанализатор в составе мобильных комплексов мониторинга для решения задач экологического контроля, техносферной безопасности и реагирования на ЧС.

Срок службы прибора составляет до 15 лет, что в несколько раз превышает ресурс традиционных электрохимических сенсоров. Газоанализатор демонстрирует высокое быстродействие, сниженное энергопотребление, массу и габариты, что критически важно при его установке на борту беспилотных платформ. Кроме того, его себестоимость ниже, чем у большинства импортных аналогов. Прибор позволяет регистрировать концентрации вредных веществ на уровне ПДК. Так, минимально определяемая концентрация СО составляет 1 ppm, аналогично – 1 ppm для CH₄, что обеспечивает возможность мониторинга даже слабовыраженных загрязнений на ранней стадии.

Важным этапом в реализации воздушного комплекса стало проектирование специализированного крепежного узла (рис. 3), обеспечивающего жесткое и устойчивое размещение газоанализатора на БВС. Конструкция была разработана с учетом переменных аэродинамических нагрузок, вибраций и погодных условий, что позволило обеспечить надежную работу сенсоров в реальных условиях полета.

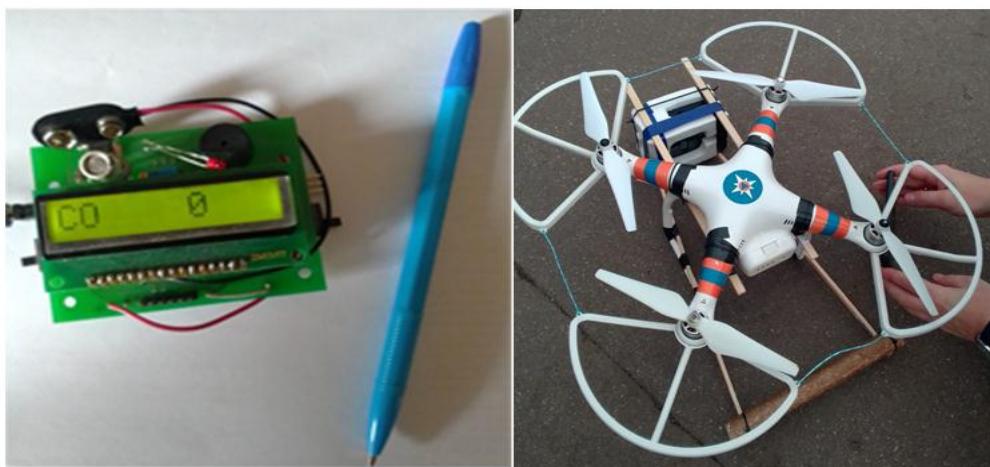


Рис. 2. Газоанализатор

Рис. 3. Воздушный комплекс с газоанализатором

Для реализации онлайн-мониторинга в режиме реального времени БВС дополнительно оснащен видеокамерой, обеспечивающей визуализацию исследуемого участка и передачу данных на наземный компьютер (рис. 4). Такая конфигурация позволяет не только проводить количественный анализ состава воздуха, но и осуществлять визуальное сопровождение полета, уточнять координаты зоны отбора и обеспечивать полноценную документацию результатов.



Рис. 4. Монитор с информацией о результатах измерений

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания проводились с использованием непрерывного мониторинга в режиме реального времени, что позволило оценить не только точность и стабильность работы измерительного оборудования, но и функциональные характеристики самого беспилотного комплекса при полетах вблизи промышленных сооружений (рис. 5). В процессе измерений были зафиксированы значения концентрации оксида углерода, которые не превышали предельно допустимых нормативов, что подтверждает корректность работы сенсорной системы и адекватность принятых технических решений.

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности и надежности комплекса, а также о его практической применимости для мониторинга воздушной среды вблизи промышленных предприятий.



Рис. 5. Полет воздушного комплекса с инспекцией дымовых газов

Разработанный воздушный комплекс обладает рядом ключевых преимуществ, обеспечивающих его высокую эффективность в задачах мониторинга состояния атмосферы:

- низкая зависимость от погодных условий, что расширяет диапазон его применения;
- возможность проведения измерений в труднодоступных и потенциально опасных для человека местах;
- высокое быстродействие и визуализация данных в реальном времени, что критически важно для принятия оперативных управлеченческих решений;
- длительный срок службы оборудования (до 15 лет);
- сравнительно низкая стоимость по сравнению с аналогами;
- универсальность применения – в том числе в экологическом мониторинге, промышленной безопасности и реагировании на ЧС.

На основе проведенного анализа и экспериментальных испытаний была обоснована оптимальная комплектация воздушного комплекса:

- БВС вертолетного типа Phantom IV Pro+, обладающее необходимыми летно-техническими характеристиками и успешно применяемое в Академии гражданской защиты МЧС России;

– компактный комбинированный газоанализатор, основанный на двух типах сенсоров – полупроводниковом и ИК, что обеспечивает высокую точность и селективность измерений заданной номенклатуры вредных веществ, а также возможность оценки температуры воздуха. Газоанализатор имеет малую массу и габариты, низкое энергопотребление, длительный срок службы (до 15 лет) и сравнительно низкую себестоимость.

Результаты лабораторных и полевых испытаний подтвердили работоспособность комплекса и его высокую практическую эффективность, что позволяет рекомендовать его для дальнейшего внедрения в систему мониторинга промышленных предприятий, полигонов твердых коммунальных отходов, животноводческих комплексов и зон аварийного загрязнения воздуха.

Заключение

Разработан воздушный комплекс мониторинга на базе БВС вертолетного типа Phantom IV Pro+, удовлетворяющий требованиям по грузоподъемности, автономности и устойчивости полета. Сконструирован газоанализатор с оригинальной схемотехникой, использующий полупроводниковые и ИК-датчики, что обеспечило высокую чувствительность, селективность и стабильность измерений. Проведенные летные испытания подтвердили работоспособность воздушного комплекса, эффективность предложенной архитектуры и достоверность измерений при реальных условиях эксплуатации. Комплекс обладает рядом преимуществ: низкой себестоимостью, высокой мобильностью, длительным сроком эксплуатации, безопасностью использования и возможностью адаптации под различные задачи экологического и аварийного мониторинга.

Работа развивает теоретические основы проектирования мобильных систем экологического мониторинга, уточняет методику выбора платформы БВС и сенсоров на основе энергетических, весовых и метрологических характеристик. Предложены и обоснованы алгоритмы расчета емкости аккумулятора и массы полезной нагрузки, что может быть использовано при построении универсальных моделей БВС-мониторинга.

Созданный воздушный комплекс доказал свою эффективность в полевых испытаниях и может быть использован службами МЧС России, экологического надзора, промышленной безопасности и наукоемких производств для оперативного контроля загрязнений воздуха. Его мобильность, автономность и высокая точность делают систему особенно востребованной в труднодоступных или опасных зонах, а также при ЧС.

Список источников

1. Elhacham E., Ayalon O., Shemer J. Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution: A systematic review // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 4. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2210> (дата обращения: 15.05.2025).
2. Технологии дистанционного мониторинга крупных пожаров с использованием беспилотных авиационных систем: монография / А. В. Кузнецов [и др.]. Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2020. 124 с.
3. *Drone Technology: Future Trends and Practical Applications* / S. Mohanty [et al.]. Hoboken: Scrivener Publishing LLC, 2023. P. 464.
4. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. № 6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020300979> (дата обращения: 15.05.2025).
5. Мишиева А. Т., Гайрабеков И. Г., Каимов Ш. С. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга особо охраняемых природных территорий // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. № 2 (48). С. 59–64.

6. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring / S. Manfreda [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. № 4 (641). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641> (data обращения: 15.05.2025)
7. González F. T., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring // MDPI Books. 2018. 670 c. DOI: 10.3390/books978-3-03842-754-4.
8. Davidson J. Buyers Guide for the Phantom 4 Pro Quadcopter Drone: Buyers Guide to the Phantom Drone Series // *Imaginarypress Impressions*. 2016. 32 c.
9. Анализ рынка электронных газоанализаторов и дымоанализаторов в России – 2025: показатели и прогнозы // Tebiz Group. 2025. 143 c. URL: <https://tebiz.ru/mi/rynek-elektronnykh-gazoanalizatorov-i-dymoanalizatorov-v-rossii> (data обращения: 15.05.2025).

References

1. Elhacham E., Ayalon O., Shemer J. Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution: A systematic review // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 4. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2210> (data обращения: 15.05.2025).
2. Tekhnologii distancionnogo monitoringa krupnyh pozharov s ispol'zovaniem bespilotnyh aviacionnyh sistem: monografiya / A. V. Kuznecov [i dr.]. Ivanovo: IPSA GPS MCHS Rossii, 2020. 124 s.
3. Drone Technology: Future Trends and Practical Applications / S. Mohanty [et al.]. Hoboken: Scrivener Publishing LLC, 2023. P. 464.
4. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. № 6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020300979> (data обращения: 15.05.2025).
5. Mishieva A. T., Gajrabekov I. G., Kaimov Sh. S. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya monitoringa osobo ohranyaemyh prirodnnyh territorij // *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2021. № 2 (48). S. 59–64.
6. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring / S. Manfreda [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. № 4 (641). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641> (data обращения: 15.05.2025).
7. González F. T., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring // MDPI Books. 2018. 670 s. DOI: 10.3390/books978-3-03842-754-4.
8. Davidson J. Buyers Guide for the Phantom 4 Pro Quadcopter Drone: Buyers Guide to the Phantom Drone Series // *Imaginarypress Impressions*. 2016. 32 s.
9. Analiz rynka elektronnyh gazoanalizatorov i dymoanalizatorov v Rossii – 2025: pokazateli i prognozy // Tebiz Group. 2025. 143 s. URL: <https://tebiz.ru/mi/rynek-elektronnykh-gazoanalizatorov-i-dymoanalizatorov-v-rossii> (data обращения: 15.05.2025).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 15.05.2025; одобрена после рецензирования: 04.06.2025; принята к публикации: 12.06.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 15.05.2025; approved after review: 04.06.2025; accepted for publication: 12.06.2025

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