Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 504.064.36

СОСТОЯНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Э.А.КРЕМЧЕЕВ, А.С.ДАНИЛОВ, Ю.Д.СМИРНОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрены сферы и способы применения беспилотных воздушных судов. Затронуты вопросы, касающиеся действующих законодательных норм в России и в мире, значительно ограничивающих возможность применения беспилотных воздушных судов при решении мониторинговых задач. Впервые на примере базовой модели беспилотного воздушного судна представлен вариант решения задачи по созданию мониторингового измерительного комплекса, включенного в государственный реестр средств измерений. Проведен анализ перспективных подходов к формированию метрологического и методического обеспечения беспилотных воздушных судов, а также путей адаптации их целевой нагрузки для решения задач по оперативному мониторингу загрязнения атмосферного воздуха.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно; метрологическое обеспечение; оперативный мониторинг; законодательные ограничения

Как цитировать эту статью: Кремчеев Э.А. Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов / Э.А.Кремчеев, А.С.Данилов, Ю.Д.Смирнов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 96-105. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96

Введение. За последние десятилетия компании-разработчики беспилотных воздушных судов (БВС) гражданского применения прошли путь от опытно-промышленных образцов и полупромышленного производства до полноценных серийных воздушных систем, отвечающих всем современным требованиям по безопасности. Современное бортовое радиоэлектронное и авиационное оборудование беспилотных воздушных судов позволяет выполнять полеты во всех климатических зонах, причем диапазон их безопасного использования в большинстве случаев шире, чем у пилотируемых гражданских воздушных судов. В этой связи логичны попытки разработчиков и пользователей оснастить беспилотные воздушные суда техническими средствами, позволяющими решать не только наблюдательные задачи, но и выполнять вполне конкретные измерения.

Известен опыт отечественных и зарубежных разработчиков по применению беспилотных воздушных судов для проведения экологического мониторинга, биогеографических исследований, решения инвентаризационных и кадастровых задач. Например, известной попыткой применения беспилотных воздушных судов для зоогеографической съемки является работа, проведенная на территории заповедника «Белогорье» (Белгородская область, Россия). Целью данного полевого эксперимента являлась оценка возможностей аппаратуры при решении задач учета диких животных. В результате исследований было выявлено, что такой подход применим только для примерной оценки. По таким признакам, как тропы, лежи и порывы, была оценена лишь часть учитываемых животных по видам и по численности. В сравнении с известной методикой зимних маршрутных учетов точность оценки численности популяции оказалась значительно ниже [1].

Оценивалась применимость беспилотных воздушных судов и при решении задач экологического мониторинга [2, 10-12]. В частности, в открытой печати имеются сведения об использовании беспилотных воздушных судов в целях экологического мониторинга устьев рек и пляжных зон. По полученным с помощью беспилотного воздушного судна данным были выявлены места несанкционированного складирования твердых коммунальных и промышленных отходов; проведена оценка масштаба загрязнения сточными водами акватории Черного моря и последствий схода селевых потоков, горных обвалов; обнаружены факты незаконной застройки и самозахвата земель [9].

Постановка проблемы. В литературе в настоящее время имеется значительный объем данных о применении беспилотных воздушных судов для решения наблюдательных задач, многие разработчики и исследователи предлагают оснащение судов измерительной техникой. Спрос на беспилотные воздушные суда для частного и коммерческого применения увеличивается. Веду-

щие позиции на мировом рынке занимают производители из Азии, Европы и Северной Америки (рис.1). По данным аналитиков, доля продаж беспилотных воздушных судов российского производства не превышает 2 %.

Лидеры мирового рынка – компании SenseFly, DJI и 3D Robotics. Наиболее известная китайская компания DJI Innovation (Шэньчжэнь) в основном занимается разработкой беспилотных воздушных судов, применяемых для коммерческой аэрофотосъемки, съемки недвижимости и картировании местности. Одна из ведущих компаний – 3D Robotics (Беркли, США), беспилотные воздушные судна этой компании применяются в сельском хозяйстве, инфраструктурных проектах, в топографической съемке и картографии. Швейцарская компания SenseFly (Лозанна, Швейцария) производит беспилотные воздушные суда с неподвижным крылом, позиционируя их как продукт с целевым применением в сельском хозяйстве и горно-добывающей промышленности при топографической съемке местности для последующего использования полученной информации в геоинформационных системах, а также при проведении инспекционного контроля. Популярной моделью этой фирмы является SenseFly-eBee, которая уже активно используется для «точного земледелия» (eBee AG) и наблюдательного мониторинга карьеров и рудников (eBee RTK).

Основным российским производителем на рынке беспилотных воздушных судов является компания «ZALA AERO GROUP Беспилотные системы» (Ижевск, Россия). Компания не ограничивает себя какой-либо одной схемой компоновки беспилотного воздушного судна и предлагает решения в виде вертолетов, самолетов, дирижаблей, мультикоптеров. Продукция компании используется при мониторинге, позволяющем обнаруживать нефтяные разливы, при проведении спасательных операций, в картографии и аэрофотосъемке для создания топографических карт, а также в научных целях и при испытаниях различного дополнительного специализированного оборудования.

На российском рынке беспилотных воздушных систем в последнее время появилась еще одна компания – научно-производственное предприятие АО «НПП «Радар ммс» (Санкт-Петербург), известное на мировом рынке разработками в области создания радиоэлектронных систем и комплексов специального и гражданского назначения. В настоящее время компания занимается производством беспилотного вертолета, предназначенного для оперативного воздушного мониторинга больших площадей и протяженных участков земной, водной и ледовой поверхности в труднодоступной местности. В структуру беспилотного воздушного судна разработчики включили комплекты сменных блок-модулей аппаратуры целевой нагрузки. Состав блок-модулей интересен тем, что там располагаются не только средства наблюдения, но и аппаратура, внесенная в государственный реестр средств измерений: многокомпонентный газоанализатор, анализатор пыли и дозиметр гамма-излучения.

Следует отметить, что несмотря на попытки включения в конструкцию беспилотных воздушных судов реестровых средств измерений, в настоящее время ни одна измерительная система на базе беспилотного воздушного судна не внесена в государственный реестр средств измерений, и аттестованных методик применения реестровых средств измерений в условиях эксплуатации на беспилотных воздушных судах нет. Очевидно, что в соответствии с действующим законодательством для получения легитимных результатов измерений требуется решение ряда вопросов методического и метрологического обеспечения измерительных комплексов и систем на базе беспилотных воздушных судов (создание новых специализированных средств измерений, адаптация конструкций известных средств измерений для применения в составе беспилотного воздушного судна, разработка методик измерений и их аттестация и пр.).

Рис.1. Количество компаний-производителей беспилотных воздушных судов в различных странах мира

В настоящем исследовании была поставлена задача систематизации информации в области действующих законодательных норм в России и в мире в сфере применения беспилотных воздушных судов, анализа перспективных подходов к разработке метрологического и методического обеспечения беспилотных воздушных судов, без которых область практического применения при решении мониторинговых задач ограничена.

Методология. Для решения поставленных в исследовании задач проведен системный анализ законодательных норм, метрологического и методического обеспечения измерений, базирующихся на применении беспилотных воздушных судов. Выполнена оценка в области совершенствования систем экологического мониторинга с внедрением приборного контроля с беспилотных воздушных судов.

Результаты. Сделан вывод, что законодательные нормы в области применения беспилотного воздушного судна с полезной нагрузкой и без нагрузки в Российской Федерации оформлены пока недостаточно полно.

В настоящее время для легализации использования беспилотных воздушных судов необходима их регистрация саморегулируемой отраслевой организацией. Беспилотные воздушные суда гражданского назначения с максимальной взлетной массой от 0,25 до 30 кг, ввезенные на территорию Российской Федерации или произведенные в нашей стране, подлежат учету в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. В настоящее время действует «Единая система учета беспилотных воздушных судов UAVREG.ru». Она функционирует с целью идентификации судов, учета их количества и накопления статистической информации о практике их применения. Эта система не является государственной. Отличить зарегистрированный аппарат можно по наличию специальной радиометки, несущей информацию о владельце и технических характеристиках беспилотного воздушного судна. Для судов с максимальной взлетной массой более 30 кг предусмотрена регистрация в системе Росавиации, так как их учет регулируется Федеральным законом от 30 декабря 2015 года № 462 «О внесении изменений в Воздушный кодекс Российской Федерации в части использования беспилотных воздушных судов». Характеристики некоторых беспилотных воздушных судов российского и зарубежного производства представлены в табл.1. Анализ мирового и отечественного рынка подобной продукции говорит о его зачаточном состоянии. Вопросы типизации и унификации не решались или решались в рамках частных производств, что объясняет высокую стоимость систем и определенные ограничения в применении унифицированного измерительного оборудования.

Законное использование беспилотных воздушных судов при решении народно-хозяйственных задач (в зависимости от района применения и спектра решаемых задач) требует получения разрешений от Военно-воздушных сил РФ; Федеральной службы безопасности; комитетов по дорожному хозяйству, благоустройству, транспорту и связи (администрации населенного пункта); зонального центра Единой системы организации воздушного движения РФ, гражданского сектора главного центра Единой системы организации воздушного движения РФ. Несмотря на то, что описанные меры предосторожности введены с целью повышения уровня безопасности воздушного пространства и предотвращения авиационных правонарушений, в ряде случаев они становятся серьезными ограничителями при необходимости оперативного применения беспилотных воздушных судов в системах мониторинга.

Оснащение беспилотного воздушного судна оптическим оборудованием и/или устройством детектирования, средством измерений накладывает дополнительные правовые ограничения на его применение. Например, установка производителем или пользователем на беспилотное воздушное судно устройства видеофиксации (курсовая камера, видеокамера, фотоаппарат) для негласного визуального наблюдения (а под такое наблюдение попадает практически любая съемка с беспилотного воздушного судна) четко ограничена законодательно (УК РФ, статья 138.1). Федеральный закон № 99 «О лицензировании отдельных видов деятельности», Постановление Правительства РФ № 526 «Об утверждении Положения о лицензировании деятельности по разработке, производству, реализации и приобретению в целях продажи специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, осуществляющими предпринимательскую деятельность», Постановление Правительства РФ № 214 «Об утверждении Положения о ввозе в РФ и вывозе из

РФ специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, и списка видов специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, ввоз и вывоз которых подлежат лицензированию» – определяют требования к лицензированию деятельности производителей, поставщиков и пользователей оборудования.

Таблица 1

Характеристики некоторых беспилотных воздушных судов доступных на рынке

Характеристики	Модель, форма, производитель					
	Phantom 3 Квадрокоптер DJI Innovation	eBee RTK Самолет SenseFly	ZALA 421-02X Вертолет «ZALA AERO GROUP Беспилотные системы»	мБПВ-37 Вертолет АО «НПП «Радар ммс»	Рубеж-20 Самолет АО «Аэрокон»	Орлан-10 Самолет ООО «Специальный технологический центр»
Масса, кг	1,2	0,7	90	35	20	14, (20)
Время полета, мин	25	40	90-120	60	480	600
Скорость горизонтального полета, км/ч	57	36-60	65	0-80	70-140	70-150
Дальность радиосвязи, км	0,5	3	25/50	18	100	500-1000
Способ управле- ния	Ручной	Автоматический, полуавтомати- ческий	Автоматический	Ручной, автома- тический, полу- автоматический	Автоматический	Автоматический
Рабочая температура окружающей среды, °С	От 0 до +40	–	От –30 до +40	От –20 до +35	–	От –30 до +40
Применение	Аэрофотосъемка: осмотр места пожара, съемки недвижимости и картирование местности	В сельском хозяйстве, разведке и мониторинге лесополос, заповедников, для составления ортофотопланов, для 3D модели- рования местно- сти и городской застройки	Экологический мониторинг, наблюдение зон ЧС, мониторинг магистральных нефтепроводов и газопроводов	Оперативный мониторинг с воздуха больших площадей и протяженных участков земной, водной и ледо- вой поверхности в труднодоступ- ной местности	Военная сфера: поисковые и наблюдательные работы, коорди- нация военных подразделений, оценка разруше- ний в местах ведения боевых действий	Целеуказание, панорамная и плановая фото- и видеосъемка, подавление радиосигналов, обнаружение источников радиоизлучения ОВЧ-УВЧ
Скорость ветра, м/с	–	–	–	Не более 10	–	Не более 10

При выполнении инструментальных измерений для получения легитимных результатов требуется соответствующее методическое и метрологическое обеспечение измерительных комплексов на базе беспилотных воздушных судов. Установленные измерительные приборы должны входить в государственный реестр средств измерений и иметь следующую документацию: сертификат об утверждении типа средства измерения; описание типа (приложение к сертификату), где указываются все метрологические характеристики, которые присвоены средству измерений данного типа; методику поверки средства измерения данного типа; методику измерений, аттестованную по ГОСТ Р 8.563-2009 «ГСИ. Методики (методы) измерений»; свидетельство о поверке средства измерений.

В качестве примера рассмотрим конфигурацию одного из мониторинговых комплексов на базе беспилотного воздушного судна, характеристики которого наиболее близки для идентификации его в качестве беспилотного измерительного комплекса (системы), применяемого для инструментальных измерений при мониторинговых исследованиях. Данная система произведена по техническому заданию Горного университета АО «НПП «Радар ммс». Базой мониторингового

комплекса является беспилотное воздушное судно вертолетного типа (БВС-ВТ) со следующими характеристиками: максимальная взлетная масса – 35 кг; масса полезной нагрузки (средства измерений, вспомогательное оборудование) – 12 кг; время полета – 60 мин (с дополнительным баком – 90 мин); рабочая высота 50-1000 м над постилающей поверхностью; максимальная воздушная скорость – 80 км/ч; дальность радиосвязи (между беспилотным воздушным судном и базой или ретранслятором) – 18 км. Заявленные характеристики достигаются при температуре окружающей среды от –20 до +35 °С и скорости ветра не более 10 м/с [8].

При компоновке комплекса была применена модульная архитектура с унифицированными разъемами для бортового аналого-цифрового преобразователя, что позволяет при необходимости оперативно менять состав аппаратуры полезной нагрузки и перевозить мониторинговый комплекс в разобранном виде [4].

В состав блок-модулей системы входят следующие средства измерений: газоанализатор многокомпонентный «Полар-2», предназначенный для измерений содержания кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, оксида азота, диоксида азота, диоксида серы, сероводорода, аммиака, метана, пропана (или гексана) в воздухе рабочей зоны; анализатор пыли DUSTTRAK 8533, предназначенный для измерений массовой концентрации аэрозольных частиц различного происхождения в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны; дозиметр гамма-излучения ДБГ-С11Д или устройство детектирования УДМГ-100, предназначенные для непрерывного измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения. Метрологические характеристики аппаратуры целевой нагрузки беспилотного воздушного судна представлены в табл.2. В составе полезной нагрузки также возможно использование лазерного течейскаателя метана Laser-MethaneMini (производства «TokyoGas Engineering Co., Ltd») и тепловизионной камеры.

Таблица 2

Характеристики средств измерений из состава аппаратуры целевой нагрузки БЛА-ВТ Горного университета (производитель АО «НПП «Радар ммс»)

Контролируемые параметры	Диапазон показаний содержания определяемого компонента	Диапазон измерений содержания определяемого компонента	Пределы допускаемой погрешности		Блок-модуль аппаратуры целевой нагрузки
			Абсолютной	Относительной, %	
Кислород O ₂	От 0 до 25 %	От 0 до 25 %	±0,2 % об.доля	–	АЦН-ГА-ВТ Базовое средство измерений – газоанализатор «Полар-2»
Оксид углерода CO	От 0 до 200 мг/м ³	От 0 до 20 мг/м ³ включ. Св. 20 до 200 мг/м ³	±1 мг/м ³	±5	
Оксид азота NO	От 0 до 50 мг/м ³	От 0 до 5 мг/м ³ включ. Св. 5 до 50 мг/м ³	±0,5 мг/м ³	±10	
Диоксид азота NO ₂	От 0 до 20 мг/м ³	От 0 до 2 мг/м ³ включ. Св. 2 до 20 мг/м ³	±0,2 мг/м ³	±10	
Сернистый ангидрид SO ₂	От 0 до 100 мг/м ³	От 0 до 10 мг/м ³ включ. Св. 10 до 100 мг/м ³	±1 мг/м ³	±10	
Сероводород H ₂ S	От 0 до 100 мг/м ³	От 0 до 10 мг/м ³ включ. Св. 10 до 100 мг/м ³	±1 мг/м ³	±10	
Аммиак NH ₃	От 0 до 100 мг/м ³	От 0 до 20 мг/м ³ включ. Св. 20 до 100 мг/м ³	±2 мг/м ³	±10	
	От 0 до 1000 мг/м ³	От 0 до 200 мг/м ³ включ. Св. 200 до 1000 мг/м ³	±20 мг/м ³	±10	
Диоксид углерода CO ₂	От 0 до 5 %	От 0 до 0,5 % включ. Св. 0,5 до 5 %	±0,05 % об.доля	±10	
Углеводороды по CH ₄	От 0 до 5 %	От 0 до 0,5 % включ. Св. 0,5 до 5 %	±0,05 % об.доля	±10	
	От 0 до 100%	От 0 до 10 % включ. Св. 10 до 100 %	±1 % об.доля	±10

Окончание табл.2

Контролируемые параметры	Диапазон показаний содержания определяемого компонента	Диапазон измерений содержания определяемого компонента	Пределы допускаемой погрешности		Блок-модуль аппаратуры целевой нагрузки
			Абсолютной	Относительной, %	
Углеводороды по C_3H_8	От 0 до 1 %	От 0 до 0,2 % включ. Св. 0,2 до 1 %	$\pm 0,02$ % об.доля	± 10	АЦН-ГА-ВТ Базовое средство измерений – газоанализатор «Поляр-2»
Углеводороды по C_6H_{14}	От 0 до 0,5 %	От 0 до 0,1 % включ. Св. 0,1 до 0,5 %	$\pm 0,01$ % об.доля	± 10	
МАЭД гамма-излучения	От 0,1 до 1 мкЗв·ч ⁻¹	От 0,1 мкЗв·ч ⁻¹ до 10 мЗв·ч ⁻¹	–	$\pm(15 + 1/N)$, где N – безразмерная величина, численно равная измеренному значению МАЭД, мкЗв·ч ⁻¹	АЦН-ГД-ВТ Базовое средство измерений – дозиметр ДБГ-С11Д
	От 1 мкЗв·ч ⁻¹ до 10 Зв·ч ⁻¹	От 0,1 мкЗв·ч ⁻¹ до 10 мЗв·ч ⁻¹	–	± 15	
	От 10 до 100 Зв·ч ⁻¹	От 0,1 мкЗв·ч ⁻¹ до 10 мЗв·ч ⁻¹	–	± 20	
МАЭД гамма-излучения	От $1 \cdot 10^{-7}$ до 10 Зв·ч ⁻¹	От $1 \cdot 10^{-7}$ до 10 Зв·ч ⁻¹	–	$\pm[20+3/P]$, где P – безразмерная величина, численно равная измеренному значению МАЭД, мкЗв·ч ⁻¹	АЦН-ГД-ВТ Базовое средство измерений – устройство детектирования УДМГ-100

Система создавалась для решения образовательных, научно-исследовательских и прикладных задач: проведение дистанционного воздушного мониторинга, видеосъемки и аэрофотосъемки местности и объектов с высот 50-600 м; проведение тепловизионного мониторинга; измерение радиационного загрязнения атмосферы; обнаружение утечек метана; количественное определение концентрации кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, оксида азота, диоксида азота, диоксида серы, сероводорода; измерение температуры и давления (разрежения) в зоне отбора пробы.

Несмотря на использование в составе аппаратуры целевой нагрузки приборов, включенных в государственный реестр средств измерений (табл.2), главной проблемой при выполнении исследований и обработке результатов измерений является отсутствие методического обеспечения выполнения измерений (аттестованных методик выполнения измерений), учитывающего новые условия эксплуатации средств измерений. Существует определенная специфика в применении измерительных приборов, предназначенных для выполнения измерений в статических условиях в составе беспилотного воздушного комплекса (системы). При применении в качестве базового беспилотного воздушного судна малогабаритного вертолета в процессе измерений технически не может быть обеспечено получение показаний в одной и той же точке пространства, что объясняется движением воздушных масс (движение воздушного потока в вертикальном направлении), показателями точности системы позиционирования, запаздыванием в подаче сигналов автопилотом и выполнении сигналов управления и пр. В частности, при газоаналитических измерениях методически производится усреднение 5-10 показаний. Таким образом, методика выполнения измерений должна учитывать факторы постоянного движения беспилотного воздушного судна, движения воздушных масс и обеспечивать получение результата измерения для заданной области в пространстве.

Санкт-Петербургский горный университет является единственным патентообладателем на методическое обеспечение измерений с применением беспилотных воздушных систем и комплексов [5-7].

Обсуждение. Опыт эксплуатации измерительной системы на базе беспилотного воздушного судна, накопленный на крупных промышленных испытаниях и при решении научно-

исследовательских задач на производственных объектах таких компаний как ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ЗАО «Прионежский габбро-диабаз», АО «Апатит», АО «Челябинская угольная компания», АО «Русская медная компания», показал, что базовое беспилотное воздушное судно характеризуется хорошей управляемостью, позволяет работать с ограниченных площадок и обеспечивает эксплуатацию мониторингового комплекса в широком диапазоне параметров окружающей среды. Пример представления результатов измерений концентраций оксида углерода на территории Коркинского угольного разреза с помощью БВС-ВТ при мониторинговых исследованиях, выполненных в ходе опытно-промышленных испытаний системы с блоком аппаратуры целевой нагрузки АЦН-ГА-ВТ, представлен на рис.2.

Испытания комплекса показали, что существенные различия в условиях проведения измерений для средств измерений, включенных в состав блок-модулей аппаратуры целевой нагрузки, требуют переработки методик выполнения измерений, в большей степени это касается разделов «Условия проведения измерений» и «Обработка результатов измерений». Кроме того, метрологические характеристики, заявленные в описаниях типа средств измерений блок-модулей аппаратуры целевой нагрузки, должны быть всесторонне проверены в новых условиях их эксплуатации в составе мониторингового комплекса на базе беспилотного воздушного судна.

При практически полном отсутствии средств измерений, использование которых возможно в составе малогабаритных беспилотных измерительных комплексов, целесообразно для каждого измерительного комплекса в отдельности проводить процедуру утверждения типа средства измерений. По мере развития приборной базы унифицированных средств измерений, предназначенных для применения на малогабаритных беспилотных воздушных судах, станет возможной свободная компоновка подобных измерительных комплексов и систем.

Описанный в работе БВС-ВТ производства АО «НПП «Радар ммс» проходит процедуру утверждения как измерительная система для мониторинговых исследований на базе беспилотного воздушного судна. На основании заявки АО «НПП «Радар ммс» ВНИИМ им. Д.И.Менделеева провел испытания для утверждения типа комплекса БВС-ВТ в комплекте с блок-модулями целевой нагрузки АЦН-ГД-ВТ, АЦН-ГА-ВТ. В ходе проведенных испытаний были подтверждены метрологические характеристики комплекса, что отражено в протоколах испытаний.

Методика поверки измерительной системы основывается на поверке блок-модуля, базовым средством измерений для которого является газоанализатор «Полар-2». Методики поверки на другие средства измерений, используемые в измерительном комплексе, существуют отдельно, и поверить эти средства измерений в составе комплекса не представляется возможным. Таким образом, измерительная система БВС-ВТ производства АО «НПП «Радар ММС» с подтвержденными метрологическими характеристиками может использоваться только при мониторинге атмосферного воздуха (табл.2).

Рис.2. Карта-схема превышений ПДК_{сс}, зафиксированных при использовании измерительной системы на базе БВС-ВТ

При выполнении измерений концентрации загрязняющего вещества в атмосферном воздухе относительная погрешность не должна превышать $\pm 25\%$ (ГОСТ 17.2.4.02-81). Пригодной признается методика измерений, позволяющая проводить измерения с относительной расширенной неопределенностью (границами относительной суммарной погрешности) не более 25% [3]. В условиях применения БВС-ВТ подтвердить соответствие этому требованию сложно, так как условия, в которых проводятся измерения, значительно отличаются от тех, в которых определяется основная погрешность, как одна из нормированных метрологических характеристик, указанных в методике поверки. Именно поэтому необходима оценка неопределенности измерений на основании информации нормированных метрологических характеристик средства измерений с учетом условий проведения измерений при его применении в составе измерительного комплекса на базе беспилотного воздушного судна.

Выделим источники неопределенности для газоанализатора модификации «Поляр-2» из состава целевой нагрузки АЦН-ГА-ВТ комплекса БВС-ВТ (с указанием обозначений их стандартных неопределенностей): неопределенность, связанная с разбросом показаний – статистическая обработка данных (u_{ai}); неопределенность, связанная с основной погрешностью газоанализатора (u_{ni}); возможная нестабильность показаний газоанализатора в период между корректировками (u_{ki}); вариация выходного сигнала по измерительным каналам (u_{ci}); влияние изменения температуры окружающей среды в рабочих условиях (u_{ti}); влияние изменения атмосферного давления в рабочих условиях (u_{di}); влияние изменения относительной влажности окружающей среды в рабочих условиях (u_{vi}); влияние изменения содержания неизмеримых компонентов анализируемой газовой смеси (u_{ni}); влияние изменения расхода анализируемого воздуха, проходящего через газоанализатор (u_{pi}).

Разброс показаний подчиняется нормальному закону распределения вероятностей и оценивается как неопределенность типа А:

$$u_{ai} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n(n-1)}},$$

где n – количество значений в области измерений; Q_i – значение параметра, зарегистрированное газоанализатором, связанное с i -м отсчетом; $\bar{Q}$ – значение средней величины среди n измерений.

Пределы допускаемой основной относительной погрешности газоанализатора для каждого измеряемого компонента приведены в табл.2. Выражения для расчета составляющих неопределенности для одного контролируемого компонента приведены в табл.3.

Таблица 3

Относительные неопределенности входных величин для АЦН-ГА-ВТ комплекса БВС-ВТ

Расчетное выражение	Расшифровка
$u_{ni} = \tau \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	δ_0 – предел допускаемой основной относительной погрешности газоанализатора, % Коэффициент $\sqrt{3}$ выбран из допущения равномерного закона распределения погрешности в интервале $(-\delta_0; +\delta_0)$ в период между корректировками показаний
$u_{ki} = \tau \frac{0,3\delta_0}{2\sqrt{3}}$	$0,3\delta_0$ – предел допускаемого изменения показаний в период между корректировками. Относительная стандартная неопределенность вычисляется для середины интервала $(0; +0,3\delta_0)$
$u_{ci} = \tau \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,5\delta_0$ – предел допускаемой вариации выходного сигнала по измерительным каналам
$u_{ti} = \tau \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}} \frac{(t_m - 20)}{10}$	t_m – наибольшая температура окружающей среды, при которой могут быть проведены измерения $0,5\delta_0$ – предел допускаемой дополнительной погрешности от изменения температуры окружающей среды в рабочих условиях (20 – температура определения основной погрешности, $^{\circ}\text{C}$) 10 – шаг изменения температуры, $^{\circ}\text{C}$
$u_{di} = \tau \frac{0,2\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,2\delta_0$ – предел допускаемой дополнительной погрешности от влияния изменения атмосферного давления в рабочих условиях

Окончание табл.3

Расчетное выражение	Расшифровка
$u_{vi} = \tau \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	δ_0 – предел допускаемой дополнительной погрешности от изменения относительной влажности окружающей среды в рабочих условиях
$u_{ni} = \tau \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	δ_0 – предел допускаемой суммарной дополнительной погрешности от изменения содержания неизмеримых компонентов анализируемой газовой смеси
$u_{pi} = \tau \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,5\delta_0$ – предел допускаемой дополнительной погрешности расхода анализируемого воздуха, проходящего через газоанализатор [3]

Распределение во всех случаях предполагается равномерным, τ – коэффициент влияния условий окружающей среды на результат, определяемый на основе статистических данных, полученных при измерениях.

Суммарная стандартная неопределенность определяется как

$$U_{\Sigma} = \sqrt{(u_{ai})^2 + (u_{ni})^2 + (u_{ki})^2 + (u_{ci})^2 + (u_{ti})^2 + (u_{di})^2 + (u_{vi})^2 + (u_{ni})^2 + (u_{pi})^2}.$$

Расширенная неопределенность получается путем умножения суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата

$$U = U_{\Sigma}k,$$

где для уровня доверия $P = 0,95$ коэффициент охвата $k = 2$, так как распределение принимается нормальным.

При расчете неопределенностей для других блок-модулей аппаратуры целевой нагрузки расчеты следует выполнять с применением аналогичного подхода с учетом пределов допускаемых погрешностей и статистических данных.

Заключение. Анализ современного состояния метрологического обеспечения измерительных комплексов (систем) на базе беспилотных воздушных судов и обзор нормативно-правового поля позволил сделать следующие выводы:

1. Для перехода к качественному анализу компонентов окружающей среды с применением измерительных комплексов (систем) на базе беспилотных воздушных судов необходимо выполнение обширного комплекса работ по их метрологическому и методическому обеспечению. В настоящее время существует широкий ассортимент средств измерений, которые при условии их методической и конструктивной адаптации по метрологическим и массогабаритным характеристикам подходят для установки на беспилотное воздушное судно. Множество сторонних факторов (в большей степени – условия проведения измерений), оказывающих влияние на измерительные способности комплекса, формирует повышенные требования к стабильности их метрологических характеристик. На современном уровне развития техники измерительные комплексы на базе беспилотных воздушных судов не могут использоваться для прецизионных измерений.

2. Отсутствие единого реестра регистрации беспилотных воздушных судов и неопределенность нормативно-правовой базы в области применения комплексов на базе беспилотных воздушных судов с полезной нагрузкой являются препятствием для развития подобных систем, их унификации и типизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Н.А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в биогеографических исследованиях на территории заповедника «Белогорье» / Н.А.Алексеев, А.А.Медведев, И.А.Карпенко // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2014. № 20. С. 70-81. DOI.org/10.24057/2414-9179-2014-1-20-70-81
2. Волкодаева М.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха / М.В.Волкодаева, А.В.Киселев // Записки Горного института. 2017. Т. 227.С. 589-596. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.589

3. Мкртычян Н.Б. Оценивание неопределенности измерений, выполняемых автоматическим анализатором атмосферного воздуха / Н.Б.Мкртычян, Г.Р.Нежиховский // Системы обработки информации. 2014. № 3. С. 61-65.
- 4 Патент № 173329 РФ. Автоматическое устройство для дистанционного мониторинга окружающей среды / А.С.Данилов, И.П.Сверчков, Ю.Д.Смирнов, Д.С.Корельский, Э.А.Кремчеев. Оpubл. 22.08.2017. Бюл. № 24.
5. Патент № 2471209 РФ. Способ мониторинга атмосферного воздуха / М.А.Пашкевич, Ю.Д.Смирнов, Э.А.Кремчеев, Д.С.Корельский. Оpubл. 27.12.2012. Бюл. № 36.
6. Патент № 2536789 РФ. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха горнопромышленной промагломерации / М.А.Пашкевич, Ю.Д.Смирнов, Э.А.Кремчеев, Т.А.Петрова, Д.С.Корельский. Оpubл. 27.12.2014. Бюл. № 36.
7. Патент № 2622721 РФ. Способ обнаружения разливов нефти или нефтепродуктов на поверхности водоема / М.А.Пашкевич, Ю.Д.Смирнов, А.С.Данилов, В.Г.Анцев. Оpubл. 19.06.2017. Бюл. № 17.
8. Пашкевич М.А. Оценка качества окружающей среды с применением малогабаритных беспилотных летательных аппаратов / М.А.Пашкевич, Ю.Д.Смирнов, А.С.Данилов // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 269-271.
9. Петров М.В. Практический опыт использования БПЛА Swinglet производства компании SenseFLY (Швейцария) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2013. № 8. С. 1-6.
10. A methodology to monitor airborne PM10 dust particles using a small unmanned aerial vehicle // Sensors (Switzerland). 2017. Vol. 17 (2). DOI: 10.3390/s17020343
11. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospective / T.Villa, F.Gonzalez, B.Miljjevic, Z.D.Ristovski, L.Morawska // Sensors (Switzerland). 2016. Vol. 16(7). DOI: 10.3390/s16071072
12. Measuring wind with Small Unmanned Aircraft Systems / M.Alvarado, G.Fonzalez, P.Erskine, D.Cliff, D.Heuff, S.Prudden, A.Fisher, M.Marino, A.Mohamed, S.Watkins, G.Wild // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. Vol. 176. P. 197-210. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.03.029

Авторы: **Э.А.Кремчеев**, *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, kremcheev@spmi.ru* (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.С.Данилов**, *ведущий инженер, danilov_as@pers.spmi.ru* (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Ю.Д.Смирнов**, *канд. техн. наук, доцент, skr@spmi.ru* (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 14.05.2018.

Статья принята к публикации 28.11.2018.