



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327

EDN: RQQWJP

УДК 504.064.3

Научная статья / Research article

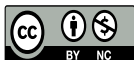
Некоторые аспекты адаптации средств измерений для инструментального контроля выбросов с использованием БПЛА

С.В. Симанович^{id}✉, И.И. Гаврилин

*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург,
Российская Федерация
✉rewriters@yandex.ru*

Аннотация. Исследование посвящено проблеме адаптации измерительных приборов, регламентированных для инвентаризации промышленных объектов в рамках экологического мониторинга, к использованию на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения замеров дистанционно в режиме реального времени. Рассматривается возможность модификации существующих средств измерений посредством технических и программных решений как альтернатива разработке новых специализированных приборов, интегрированных с конструкцией БПЛА. Особое внимание уделено влиянию внешних факторов и условий на точность измерений. В частности, проанализированы результаты эксперимента с целью изучения колебаний чувствительных элементов прибора «Метеоскоп-М» при различных уровнях вибрационного воздействия. Проанализированы ошибки измерений, вызванные динамическими нагрузками, и обоснована необходимость использования устройств механической стабилизации и демпфирования, а также алгоритмов цифровой коррекции данных. На основе сравнительного анализа выявлены преимущества и недостатки существующих подходов к реализации разработанной авторами технологии инвентаризации промышленных объектов с использованием измерительных приборов на базе БПЛА, рассмотрена эффективность их использования в различных условиях эксплуатации. Обоснован вывод о том, что адаптация серийных приборов посредством реализации инженерных решений с учетом условий полета БПЛА, в частности вибрационных воздействий, является наиболее рациональным решением на текущий момент, а накопленный опыт позволит в будущем разработать новое поколение средств измерений, интегрированных с несущей платформой БПЛА. Работа ориентирована на специалистов в области экологического мониторинга в части, касающейся инвентаризации промышленных объектов, загрязняющих атмосферный воздух.

© Симанович С.В., Гаврилин И.И., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: экологический мониторинг, выбросы загрязняющих веществ, инвентаризация промышленных объектов, источник загрязнений окружающей среды, ИЗАВ, беспилотный летательный аппарат, средства измерения, вибрационные воздействия, точность измерений.

Вклад авторов. *Гаврилин И.И.* – концептуализация статьи; ресурсы – предоставление учебных материалов и приборов; создание рукописи и ее редактирование – комментирование и пересмотр; администрирование проекта; *Симанович С.В.* – методология – разработка и создание экспериментального стенда; проведение исследования; администрирование данных; создание черновика рукописи; создание рукописи и ее редактирование. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 05.03.2025; доработана после рецензирования 11.04.2025; принята к публикации 20.04.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Симанович С.В., Гаврилин И.И.* Некоторые аспекты адаптации средств измерений для инструментального контроля выбросов с использованием БПЛА // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 312–327. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327>

Some aspects of adaptation of measuring instruments for instrumental emission control using UAVs

Semyon V. Simanovich  , Igor I. Gavrilin

Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

rewriters@yandex.ru

Abstract. The study is devoted to the problem of adapting measuring instruments regulated for inventory of industrial facilities within the framework of environmental monitoring to be used on the basis of unmanned aerial vehicles (UAVs) for making measurements remotely in real time. The research considers the possibility of modifying existing measuring instruments by means of technical and software solutions as an alternative to the development of new specialized instruments integrated with the UAV design. Special attention is paid to the influence of external factors and conditions on the accuracy of measurements. In particular, the results of the experiment to study the oscillations of the sensitive elements of the device “Meteoskop-M” at different levels of vibration impact are analyzed. The measurement errors caused by dynamic loads are analyzed, and the necessity of using mechanical stabilization and damping devices, as well as algorithms of digital data correction is justified. On the basis of comparative analysis the advantages and disadvantages of the existing approaches to the implementation of the technology of inventory of industrial facilities using UAV-based measuring devices developed by the authors are revealed, the efficiency of their use in different operating conditions is considered. The conclusion is substantiated that the adaptation of serial devices through the implementation of engineering solutions taking into account the UAV flight conditions, in particular – vibration effects, is the

most rational solution at the moment, and the accumulated experience will allow in the future to develop a new generation of measuring instruments integrated with the UAV carrier platform. The article is aimed at specialists in the field of environmental monitoring as it relates to the inventory of industrial facilities polluting the atmospheric air.

Keywords: environmental monitoring, pollutant emissions, inventory of industrial facilities, environmental pollution source, EPI, unmanned aerial vehicle, measurement tools, vibration effects, measurement accuracy

Authors' contribution. *I.I. Gavrilin* – conceptualization – ideas; resources – provision of educational materials and instruments; writing – review and editing – commentary and revision; project administration; *S.V. Simanovich* – methodology – development and construction of the experimental setup; investigation; data curation; writing – original draft; writing – review and editing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 05.03.2025; revised 11.04.2025; accepted 20.04.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Simanovich SV, Gavrilin II. Some aspects of adaptation of measuring instruments for instrumental emission control using UAVs. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(3):312–327. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327>

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время показали высокую эффективность применения в различных сферах деятельности человека – от картографирования и геодезии до экологического мониторинга и контроля за промышленными выбросами [1; 2].

Некоторыми авторами отмечается, что использование БПЛА дает возможность реализации методики измерений характеристик выбросов из источников, загрязняющих атмосферный воздух (ИЗАВ), расположенных в недоступных и опасных для человека местах, при этом – с применением сигнализирующих и аналитических измерений характеристик среды инструментальным методом, то есть с высокой достоверностью [3]. Использование БПЛА в качестве средства доставки измерительных приборов позволяет проводить оперативный мониторинг загрязнения среды на больших территориях и на различных горизонтах, определять интенсивность загрязнений выбросами конкретных ИЗАВ промышленных объектов. При этом оперативность получения информации позволяет значительно сократить время ее обработки, а точность измерений значительно повышает объективность функционирования системы экологического мониторинга, в том числе при определении зон загрязнений окружающей среды конкретными вредными и (или) опасными веществами.

Так, существует способ комплексного мониторинга окружающей среды региона, описанный в патенте RU 2778495 С1, МПК G01W 1/00, опубл. 22.08.2022 Бюл. № 24 [4], предполагающий использование приборного комплекса на базе БПЛА для измерений и оценки состояния и изменений

атмосферного воздуха региона с целью формирования базы данных для дальнейшего прогнозирования. Выполняются измерения текущих параметров источников выбросов как дистанционно, так и методом прямых измерений, что позволяет оценивать изменения характеристик окружающей среды в динамике. Данный метод дает возможность классифицировать объекты окружающей среды по их роли, но лишь в контексте круговорота углекислого газа: выделение или поглощение, включая техногенные и природные источники, а также антропогенные факторы.

Работы зарубежных исследователей в основном посвящены анализу эффективности использования БПЛА в сфере геомониторинга, например, при сборе данных для разработки систем управления рисками в нефтегазовой отрасли [5]. В этом контексте некоторые отечественные авторы рассматривают эффективность, объективность и перспективы использования технологии «роя» (группы БПЛА) для определения координат точечного ИЗАВ в случае аварийных выбросов [6], исключая проведение прямых измерений. Так, в работе Ю.С. Леговича проведен сравнительный анализ существующих решений, сделан акцент на использовании моделей управления группой БПЛА и разработке подходов, основанных на математической теории планирования и позволяющих совершенствовать алгоритмы координации и навигации БПЛА для точного обнаружения ИЗАВ.

Использование БПЛА для проведения измерений параметров окружающей среды отмечено в работе С.И. Ягельдина, предлагающего в целях экологического мониторинга в промышленных зонах использовать мультироторные БПЛА с интегрированными датчиками фиксации в реальном времени пороговых показателей температуры, давления, влажности и концентрации газов [7]. Предлагаемая технология позволяет оперативно и адресно реагировать на имеющие место зональные загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных объектов, но не предусматривает определение интенсивности выбросов вредных и (или) опасных веществ конкретными ИЗАВ.

Краткий анализ возможностей данных технологий позволяет сделать вывод о том, что своей основной целью они имеют определение картины уже состоявшегося загрязнения, а также позволяют прогнозировать ее изменения на значительных территориях, но с невысокой точностью, порой гипотетически, и не имеют превентивного потенциала в целях предотвращения возможных загрязнений.

При этом следует отметить, что правила отнесения приборов и устройств к средствам измерений и их применения регулируются федеральными органами исполнительной власти. Так, согласно положениям Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»¹ сред-

¹ Об обеспечении единства измерений. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 06.11.2024).

ством измерений признается лишь то техническое средство, которое позволяет производить измерения в строгом соответствии с регламентируемыми метрологическими и техническими требованиями. Эти требования распространяются на устройства, предназначенные для проведения и сигнализирующих, и аналитических измерений.

Однако в нашем случае следует принимать во внимание приборы, технически способные производить аналитические измерения параметров (температуры, скорости газовой воздушного потока и т.д. как исходных данных для определения концентрации) окружающей среды или, как частный случай окружающей среды, ограниченной сечением газопотока, – газовой воздушного потока выбросов из устья ИЗАВ. Очевидно, что только такие измерительные приборы позволяют производить количественную оценку и анализ аэродинамических характеристик газовой воздушного потока в достаточно широком диапазоне и с высокой точностью, в отличие от детекторов и датчиков, предназначенных для сигнализирующих измерений для последующего оповещения о критических (пороговых) значениях оценки состояния среды или анализа состояния вещества [8; 9].

Для применения в рамках государственного регулирования средство измерения должно пройти утверждение типа и поверку. В частности, конструкция средств измерений должна предотвращать несанкционированный доступ и вмешательства, которые могут исказить результаты измерений, иметь уникальные идентификационные номера.

Такие требования актуальны и объективны, так как эффективность выполнения задач экологического мониторинга напрямую зависит от достоверности получаемых результатов и точности измерений в процессе сбора первичных данных. Отсутствие точных, комплексных и своевременно полученных первичных данных приводит к искажению информации на последующих уровнях анализа, что может вызвать принятие неактуальных и неэффективных управленческих решений государственными органами [10].

Наряду с этим подавляющее большинство современных приборов, применяемых в сфере экологического мониторинга и инвентаризации промышленных объектов, изначально разработано для стационарного использования в условиях лабораторий или на объектах контроля. При этом управление приборами в процессе работы, а также считывание результатов замеров осуществляется непосредственно техническим работником (оператором).

Предлагаемая авторами статьи технология инвентаризации подразумевает возможность управления приборами оператором (экспертом) дистанционно с автоматическим считыванием полученных в ходе замеров данных с последующей их передачей оператору в режиме реального времени. Далее – выполнение ряда сопутствующих требований: массогабаритные параметры приборов, надежность и длительность их функционирования в режиме полета, управляемость, устойчивость и координация БПЛА в различных метеословиях.

Безусловно, существующие современные технологии и технические возможности позволяют разработать и использовать принципиально новую приборную базу, однако для этого требуются не только значительные материальные ресурсы и время, но и кардинальные изменения существующих технологий экологического мониторинга и инвентаризации, влекущие за собой, в свою очередь, изменения нормативно-правовой базы, регламентирующей сферу этой деятельности.

Альтернативным решением этой проблемы авторы считают адаптацию существующих стандартных измерительных приборов к использованию на подвесах БПЛА путем реализации отдельных инженерных решений, что позволит компенсировать указанные выше недостатки приборной базы и эффективно использовать регламентированные действующими технологиями приборы в новых условиях.

В целях решения этой проблемы авторами статьи проведено исследование технических аспектов адаптации стандартных измерительных приборов, размещенных в подвесах БПЛА, для дистанционного использования в режиме реального времени.

Цель исследования – разработка подходов к адаптации измерительных приборов для использования в условиях полета.

Для достижения этой цели авторами были поставлены следующие задачи:

- 1) провести анализ основных ограничений стандартных средств измерений при эксплуатации в подвесах БПЛА;
- 2) определить внешние факторы, потенциально способные оказывать воздействие на точность измерения приборов;
- 3) предложить технические решения для защиты приборов от внешних воздействий, включая демпфирование и стабилизацию;
- 4) изучить возможности применения программных методов для корректировки данных, таких как фильтрация и корректирующие коэффициенты;
- 5) предложить рекомендации по выбору подходов для адаптации или разработки новых средств измерений.

Выявлены имеющиеся проблемы технического характера, рассматриваются возможности физических модификаций, направленных на обеспечение функционирования измерительных приборов дистанционно, программных решений, обеспечивающих эффективность и надежность использования приборного комплекса на базе БПЛА, предлагаются пути реализации таких возможностей посредством инженерных решений.

Материалы и методы

Одной из проблем, выявленных при использовании стандартных измерительных приборов на платформе БПЛА, является малая изученность воздействия на них вибраций и динамических нагрузок, вызванных работой двигателей и перегрузками при изменениях траектории полета.

Для изучения влияния вибраций на точность измерений был проведен эксперимент с использованием прибора «Метеоскоп-М» на специальном стенде, имитирующем условия работы измерительных средств в условиях полета БПЛА. Исследование включало анализ изменения скорости воздушного потока при различных уровнях вибрационного воздействия, передаваемого через конструкцию подвеса. Результаты эксперимента представлены в следующем разделе.

Воздействие данных факторов может приводить к значительным отклонениям в показаниях приборов, ведущих, в свою очередь, к значительным погрешностям при дальнейшем использовании этих данных в расчетах. Кроме того, сложность заключается в обеспечении стабильности считывания получаемых данных при изменениях ориентации и высоты полета дрона, что также может влиять на качество и объективность получаемой оператором (экспертом) информации.

Другой важной и, по сути, ключевой проблемой является непригодность регламентированных измерительных приборов к дистанционному управлению экспертом (оператором). Стандартные приборы разработаны и ориентированы на непосредственное воздействие оператора на их органы управления в процессе эксплуатации. Используя медицинскую терминологию, можно сказать, что размещение прибора (его рабочих органов) относительно устья газовоздушного (газопылевого) потока ИЗАВ, управление им и считывание данных осуществляется вручную, что в условиях полета БПЛА становится невозможным и, соответственно, требует надлежащей адаптации средств измерения.

Для этого, а также для компенсации негативного воздействия внешних факторов на БПЛА и измерительные приборы в целях обеспечения точности измерений посредством дистанционного управления приборами, надежности получения и передачи данных замеров оператору (эксперту) предлагается:

- совмещение комплекса дополнительных приспособлений с измерительными приборами без конструктивного изменения последних;
- разработка и использование автоматизированных систем на основе современного программного обеспечения и ИКТ;
- использование математических методов коррекции данных, в частности корректирующих коэффициентов, позволяющих нивелировать негативное влияние внешних и антропогенных факторов на работу комплекса в целом.

В настоящее время существует нормативно регламентированный перечень средств измерений, которые по метрологическим и массогабаритным характеристикам могут быть использованы на базе БПЛА. Однако для того чтобы такие измерительные приборы могли штатно функционировать в условиях полета, необходим ряд технических модификаций [11], направленных:

- на оптимизацию конструкции приборного комплекса для его размещения на подвесе к платформе БПЛА;

- обеспечение возможности дистанционно воздействовать на органы управления приборами, считывать и передавать данные измерений;
- снижение воздействия вибраций, динамических нагрузок и других внешних факторов, которые могут существенно повлиять на точность измерений.

В этом контексте авторы предлагают следующие основные элементы модификаций.

1. Использование подвесов с системами стабилизации. Основным конструкторским решением является установка измерительных приборов на подвесы с использованием систем стабилизации и демпфирования, которые обеспечивают стабильное положение прибора в пространстве и позволяют нивелировать воздействие на него инерциальных сил и вибраций. Для этого целесообразно использовать в конструкции крепления прибора к подвесу амортизирующие манжеты или демпферные сочленения, гасящие воздействие мелких и частых вибраций, что особенно важно для измерительных приборов высокой чувствительности.

2. Экранирование и защита от метеорологических факторов. Измерительные приборы, устанавливаемые на БПЛА, могут подвергаться воздействию резких перепадов температуры, давления и влажности. Для обеспечения надежности работы приборов в таких условиях требуется их гидро- и термозащита с применением специальных материалов с частичной или полной герметизацией корпусов подвесов.

3. Накладки для манипуляции органами управления. Условия дистанционного управления измерительными приборами определяют необходимость механического воздействия на их органы управления – кнопки, переключатели, сенсоры. Для этого целесообразно использовать специальные накладки с радиоуправляемыми электромеханическими манипуляторами (соленоидами), позволяющими оказывать потребное механическое воздействие на органы управления и (или) элементы прибора. Такие накладки интегрированы с подвесом БПЛА и обеспечивают оператору возможность дистанционного управления и корректировки настроек прибора в процессе проведения замеров.

4. Система считывания показаний приборов и передачи данных. Размещение приборов в подвесе несущей платформы БПЛА предполагает наличие средства подсветки измерительных шкал с использованием миниатюрной видеокамеры как средства считывания результатов измерений и передач видео потока оператору радиосигналом.

Необходимо отметить, что отдельные элементы инженерных решений могут варьироваться в зависимости от типа, предназначения и конструктивных особенностей измерительных приборов в комбинации с оптимизацией программного обеспечения. Программная оптимизация является важным звеном в обеспечении точности измерений содержательных и аэродинамических параметров газоздушных потоков. Она позволяет не только нивелировать

ошибки, вызванные внешними факторами, но и адаптировать данные для анализа и последующего использования.

В процессе сбора данных в полете могут возникать аномалии, вызванные кратковременными изменениями ориентации вследствие порывов ветра, сильных осадков или резких маневров дрона. Программные решения, такие как фильтры Калмана, позволяют отслеживать и устранять такие аномалии, повышая точность и надежность получаемых данных.

Для повышения точности измерений и компенсации ошибок, вызванных динамическими факторами в сложных условиях полета, в программном обеспечении целесообразно использовать корректирующие коэффициенты, основанные на данных о полете (скорость, угол наклона, вибрации и др.).

В сочетании с техническими решениями по стабилизации и защите приборов программные методы обеспечивают комплексный подход к повышению точности измерений, стабильности считывания и передачи данных.

Результаты и обсуждение

В качестве образца для демонстрации внедрения представленных модификаций и создания прототипа приборного комплекса в части, касающейся системы дистанционного управления приборами, считывания и передачи данных измерений, авторами был выбран измерительный прибор «Метеоскоп-М». Данный прибор предназначен для измерения параметров микроклимата, таких как температура, влажность, атмосферное давление и скорость воздушного потока. Вместе с тем согласно положениям ГОСТ 17.2.4.07-90 «Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения» и ГОСТ 17.2.4.06-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения»², а также ГОСТ 17.2.4.07-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения»³ допускается использование средств измерений, аналогичных тем, что приведены в документе, но с обязательным соблюдением условия: выбранные средства измерения должны иметь аналогичные метрологические характеристики. В табл. 1 представлен анализ метрологических характеристик при измерении температуры и скорости газоздушного потока с помощью термометра ТЛ-1, трубкой Пито и прибором «Метеоскоп-М».

² ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007367?ysclid=mb9pqwd3dx987852665> (дата обращения: 06.01.2025).

³ ГОСТ 17.2.4.07-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007365> (дата обращения: 06.01.2025).

Таблица 1. Метрологические характеристики различных приборов при измерениях температур и скорости газовой воздушного потока

Средство измерения	Метеоскоп-М с сенсометрическим щупом	Трубка Пито	ТЛ-2	ТЛ-3
Температура, °C и погрешность	$-40...+85 \pm 0,2$	–	$0...100 \pm 1$	$0...200 \pm 2$
Скорость газовой воздушного потока, м/с и погрешность	$0,1...1 \text{ м/с} \pm (0,05 + 0,05V)$ $1...20 \text{ м/с} \pm (0,1 + 0,05V)$ где V – значение измеряемой скорости, м/с	Пито (исполнение В) $2...30 \pm 3$ Пито цилиндрическая (исполнение В) $4...30 \pm 5$ Пито (исполнение П) $2...60 \pm 3$	–	–

Источник: составлено С.В. Симановичем и И.И. Гаврилиным.

Измерения температуры и скорости критически важны при аналитических измерениях выбросов, где основной задачей является не просто регистрация параметров воздушного потока, а их учет при расчете концентраций загрязняющих веществ. Данные характеристики газовой воздушного потока влияют на процессы дисперсии загрязнителей, что необходимо учитывать при моделировании и прогнозировании экологической обстановки.

При полете БПЛА с полезной нагрузкой постоянным вибрационным воздействием подвергаются конструкция несущей платформы и установленное на ней навесное оборудование. Вибрационные воздействия возникают в результате работы двигателей, вращения пропеллеров в различных режимах и резонансных явлений рамы, а также, в меньшей мере, воздействия внешних факторов – турбулентности и порывов ветра.

По данным ряда исследований, установлено, что вибрации, возникающие на раме, в местах крепления подвесов и, соответственно, на корпусах установленного в подвесах оборудования мультикоптеров различных конфигураций охватывают широкий диапазон частот – от десятков до сотен герц, а возникающие при этом резонансные колебания – в пределах от 86 до 673 Гц [12]. В частности, в работах специалистов, анализировавших спектр магнитного шума, регистрируемого при взлете БПЛА, были зафиксированы выраженные низкочастотные компоненты. Такие спектральные изменения являются косвенным индикатором вибрационной активности, даже в случаях, когда прямое измерение ускорений не проводилось [13].

Дальнейшее изучение вибрационных воздействий на несущую платформу мультикоптеров, проводимое на специально разработанных стендах в условиях промышленных предприятий, показало, что величины виброскорости, виброускорения и вызываемые ими виброперемещения пропорциональны режимам тяги и вращения воздушных винтов, максимально проявляясь при высоких оборотах двигателей. Экспериментально установлено, что даже при максимальных режимах работы двигателей мультикоптеров линейные величины виброперемещений его несущей платформы не превышают десятых долей миллиметра [14].

В свою очередь, в соответствии с законами механики и основами теории виброзащиты величины виброперемещений, воздействующих на основу (несущую платформу), многократно снижаются (порой – полностью нивелируются) для оборудования, размещенного на подвижном двух-, трехосевом подвесе к этой платформе, особенно при наличии демпфирующих узлов крепления [15].

Следует отметить, что целью вышеуказанных исследований являлась оценка влияний вибрационных воздействий на раму мультикоптеров и корпуса оборудования, непосредственно размещенных на них. В случае же использования приборов для измерения аэродинамических показателей газозвдушного потока и концентрации в нем загрязняющих веществ следует учитывать воздействие вибраций на рабочий орган прибора – вынесенный датчик, щуп. Это требование наряду с имеющимися экспериментальными данными было учтено при моделировании условий вибрационного воздействия на рабочий орган прибора, вместе с тем в рамках настоящего эксперимента интенсивность вибрационного воздействия оценивалась в дБА, что отражает логарифмическую величину виброускорения по трем осям.

Для имитации вибрационных воздействий на рабочий орган измерительного прибора, размещенного на подвесе в условиях полета БПЛА, были собраны два стенда (рис. 1).

Эксперимент состоял из двух этапов.

1. Измерение контрольных значений без вибраций для определения фоновых значений скорости газозвдушного потока.
2. Воздействие вибрациями с различной амплитудой и частотой на платформу с закрепленным на ней щупом прибора.

Позатпно задавались режимы работы кулачкового механизма: 1 об/с (низкая частота); 1,5 об/с (средняя частота); 2 об/с (высокая частота).

Амплитуда смещения платформы с закрепленным на ней щупом прибора варьировалась: 0, 0,5 и 1 мм.

Для каждого сочетания параметров регистрировались: значения виброускорения (дБА), измеренная скорость движения воздуха (м/с).

Контрольные измерения без вибраций показали, что скорость воздуха при нагнетании потока в воздуховод составляет 0,48 м/с, а в окружающей среде (без нагнетания) – 0,07 м/с. Ниже приведены результаты эксперимента (табл. 2).

Эксперимент подтвердил влияние вибраций на точность измерений скорости звдушного потока прибором «Метеоскоп-М» в условиях, приближенных к эксплуатации на подвесе БПЛА. Несмотря на то что в эксперименте использовалась логарифмическая оценка интенсивности (в дБА) без частотного анализа, результаты подтверждают связь между уровнем вибрационного воздействия и стабильностью данных. Таким образом, вибрации следует учитывать как значимый фактор при эксплуатации приборов с выносными рабочими элементами на платформе БПЛА.

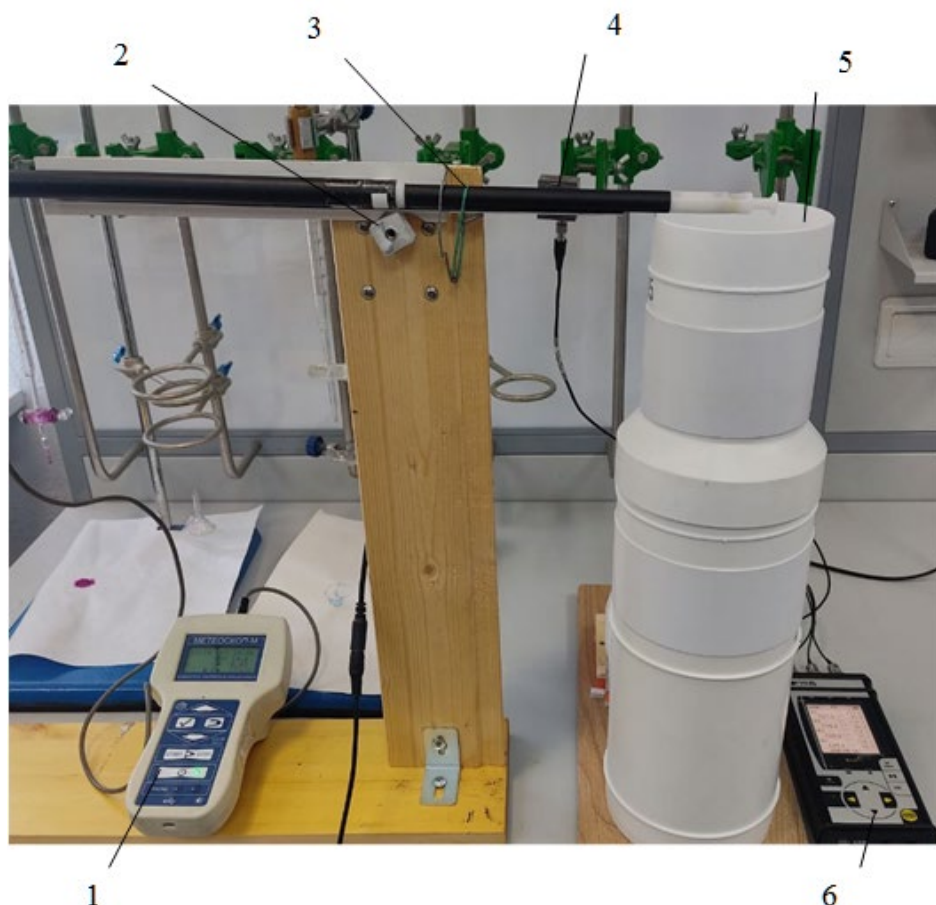


Рис. 1. Стенды для имитации поведения средства измерения в подвесе БПЛА и точечного источника загрязнения воздуха:

1 – блок управления прибора «Метеоскоп-М»; 2 – кулачковый механизм для создания периодических механических воздействий на платформу; 3 – платформа с сенсометрическим щупом (щуп зафиксирован таким образом, чтобы избежать проворачивания при воздействии вибрации; измерительная часть находится в геометрическом центре устья); 4 – акселерометр, установленный на щуп и подключенный к виброметру; 5 – макет ИЗАВ с диаметром воздуховода 95 мм и регулируемой тягой; 6 – виброметр «Экофизика-110В».

Источник: составлено С.В. Симановичем и И.И. Гаврилиным.

Таблица 2. Сводная таблица результатов эксперимента

Скорость мотора, об/с	Виброускорение, дБА, по трем осям	Результат измерений
Амплитуда 0 мм		
1,0	123,5; 120,3; 126,7	0,48
1,5	135,6; 126,3; 139,8	0,48
2,0	134,7; 121,1; 141,8	0,47
Амплитуда 0,5 мм		
1,0	121,6; 118,2; 128,2	0,48
1,5	131,8; 136,0; 138,5	0,48
2,0	127,9; 134,6; 138,9	0,49
Амплитуда 1 мм		
1,0	121,3; 125,9; 126,2	0,48
1,5	134,4; 135,1; 141,9	0,45
2,0	127,9; 134,6; 138,9	0,43

Источник: составлено С.В. Симановичем и И.И. Гаврилиным.

При малых амплитудах (0–0,5 мм) вибрации не оказали значительного влияния на результаты измерений – скорость потока оставалась стабильной (0,48–0,49 м/с).

При увеличении амплитуды до 1 мм зафиксировано систематическое снижение скорости потока до 0,43 м/с при 2 об/с, что может быть связано с дестабилизацией положения шупа относительно воздушного потока.

Наибольшие вибрации (до 137 дБА) зафиксированы при 1,5 об/с, что указывает на возможные резонансные эффекты в конструкции.

Полученные данные подтверждают необходимость механической стабилизации подвеса с прибором и его сенсометрического шупа, а также программной обработки результатов для компенсации вибрационного воздействия. Также следует отметить, что вибрации передавались на сам измерительный блок «Метеоскоп-М», однако их влияние на точность измерений принималось во внимание как второстепенный фактор.

Таким образом, для обеспечения корректности измерений при использовании прибора на беспилотных платформах требуется комплексный подход, включающий:

- механическую стабилизацию (демпфирующие элементы в конструкции подвеса);
- автоматизированную коррекцию измерений (фильтрация данных и использование корректирующих коэффициентов);
- специализированную накладку для дистанционного управления прибором (рис. 2), обеспечивающую считывание и передачу данных в режиме реального времени.

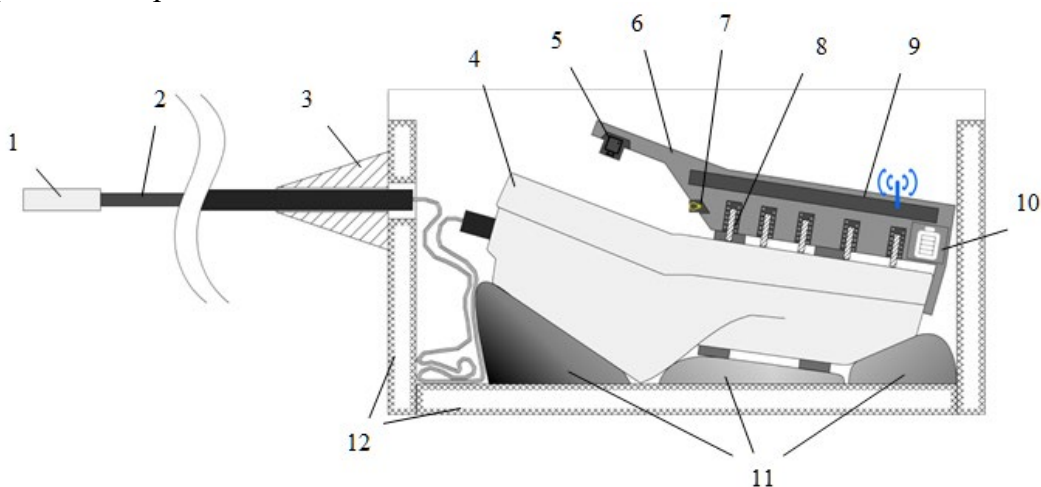


Рис. 2. Вариант компоновки и размещения прибора «Метеоскоп-М» в подвесе БПЛА:

1 – оконечность сенсометрического шупа с датчиками температуры, влажности, скорости движения воздуха и атмосферного давления; 2 – сенсометрический шуп, подключенный к прибору; 3 – штуцер с демпфирующим слоем, фиксирующий шуп; 4 – блок управления прибором «Метеоскоп-М»; 5 – камера, направленная на дисплей прибора; 6 – корпус накладки; 7 – лампочка для подсвечивания дисплея прибора; 8 – соленоиды, расположенные напротив органов управления прибора; 9 – плата с антенной для передачи данных; 10 – независимый источник питания накладки; 11 – демпфирующие подкладки под прибор; 12 – внутренняя обшивка корпуса подвеса из демпферного материала.

Источник: составлено С.В. Симановичем и И.И. Гаврилиным.

Использование данных решений в совокупности позволит существенно снизить влияние вибраций и других внешних факторов на результаты измерений, обеспечивая их стабильность и точность в реальных полетных условиях.

Заключение

Результаты проведенного исследования подтверждают возможность использования измерительных приборов в подвесах БПЛА двумя основными способами: адаптацией существующих приборов посредством технических и программных методов или созданием новых средств измерений, целевым образом разработанных для использования на платформе БПЛА в полетных условиях.

Адаптация серийно производящихся приборов дает экономические и логистические преимущества, так как использует сертифицированные устройства, уже апробированные практикой. Вместе с тем эксперимент показал, что вибрационные нагрузки, возникающие в ходе полета, оказывают негативное влияние на точность измерений, особенно при увеличении амплитуды колебаний. Представленные в работе технические модификации и предложенные варианты программной обработки данных позволяют минимизировать влияние вибраций, повысить точность измерений и обеспечить корректное функционирование приборов в подвесе БПЛА.

Предложенный подход универсален, так как использует возможность интеграции БПЛА с традиционными средствами экологического контроля, что, по мнению специалистов, позволяет взаимно дополнять данные и обеспечивать возможность сравнения показателей качества воздуха на различных высотах [16]. К тому же он гибок, поскольку позволяет адаптировать различные типы измерительных приборов для выполнения задач экологического мониторинга в части, касающейся инвентаризации промышленных объектов.

К недостаткам такого подхода можно отнести лишь незначительные затраты на изготовление дополнительного оборудования, влекущие допустимое увеличение массы комплекса и повышение энергопотребления системы, необходимость постоянного контроля и обновления корректирующих данных. Однако такой подход позволяет уже сегодня интегрировать БПЛА в систему экологического мониторинга, обеспечивая сбор объективных данных и позволяя предупреждать возможные загрязнения среды.

При этом важно отметить, что для обеспечения достоверности и стабильности результатов в условиях конкретной платформы и задачи адаптация приборов должна сопровождаться натурными испытаниями с учетом характеристик рамы, подвеса, двигательной установки и полетной динамики, что, в свою очередь, позволит скорректировать влияние внешних факторов и повысить точность результатов.

В дальнейшем накопленный опыт послужит основой для использования другого подхода – разработки и создания специализированных, дистанционно управляемых приборов, конструктивно интегрированных с несущей платформой БПЛА для работы в условиях полета. Благодаря оптимальной конструкции с учетом всех особенностей условий эксплуатации, органичному сочленению транспортной платформы БПЛА и измерительных приборов новый комплекс, безусловно, будет более эффективен и работоспособен. Однако в настоящее время нецелесообразность внедрения этого подхода в практику экологического мониторинга определяется его недостатками: высокими затратами на разработку и промышленное производство, потребностью в проведении серии испытаний и сертификаций, что значительно увеличивает сроки изготовления в промышленных масштабах и внедрения в эксплуатацию.

Список литературы

- [1] *Моисеева А.А.* Возможности современных инженерно-экологических изысканий // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы : материалы VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к Году педагога и наставника. Новокузнецк, 8 декабря 2023 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 265–267. EDN: UIVWFR
- [2] *Романова М.А., Трефилов П.М., Шевченко А.В., Исхаков А.Ю., Мамченко М.В., Ищук И.Н., Долгов А.А.* Мониторинг экологической обстановки окружающей среды с применением БПЛА // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019 : материалы двенадцатой международной конференции. Москва, 1–3 октября 2019 года / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 1072–1074. <https://doi.org/10.25728/mlsd.2019.1.1072> EDN: RVINFL
- [3] *Адамян Д.А., Ашихмина Т.В.* Применение БПЛА для экологического мониторинга // Студенческий научный форум 2024 : сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Пенза, 27 мая 2024 года. Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2024. С. 62–65.
- [4] *Каленский А.В., Звеков А.А., Боровикова А.П.* Патент № 2816093 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/00. Способ определения эмиссии диоксида углерода : № 2023119704 : заявл. 26.07.2023: опубл. 26.03.2024. Заявитель : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет».
- [5] *Haske B., Rudolph T., Bernsdorf B., Pawlik M.* Innovative Environmental Monitoring Methods Using Multispectral UAV and Satellite Data // First Break. 2024. No. 42. P. 4147.
- [6] *Легович Ю.С., Ефремов А.Ю., Фатеева Ю.Г.* Современные подходы к решению задачи обнаружения точечного источника загрязнения атмосферного воздуха с использованием беспилотных летательных аппаратов // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018 : труды одиннадцатой международной конференции : в 3 т. Москва, 01–03 октября 2018 года / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Том III. Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018. С. 276–284.

- [7] *Ягельдин С.И.* Автономная атмосферная станция на базе мультироторного БПЛА для экологического мониторинга // Новые информационные технологии : тезисы докладов XX Международной студенческой конференции-школы-семинара. Судак, 17–23 мая 2012 года. Судак : Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2012. С. 209–211.
- [8] *Пудалов А.Д.* Унифицированная измерительная схема приборов аналитического контроля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 3 (31). С. 220–223.
- [9] *Вавилов В.Д., Суконкин А.Н.* Обзор отечественных и зарубежных сигнализаторов обледенения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 297–310. EDN: SEZXGN
- [10] *Зязев Б.Ю., Гуторова Н.В., Любская О.Г.* Современные информационные технологии в общественном экологическом мониторинге // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2023. № 3 (89). С. 36–47. EDN: OOAGWS
- [11] *Кремчев Э.А., Данилов А.С., Смирнов Ю.Д.* Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 96–105. EDN: WABBWQ
- [12] *Verbeke J., Debruyne S.* Vibration analysis of a UAV multirotor frame // Proceedings of ISMA. 2016. URL: https://past.isma-isaac.be/downloads/isma2016/papers/isma2016_0797.pdf (accessed: 07.04.2025).
- [13] *Гончаренко Б.И., Кузьменков В.Ю., Котов А.Н.* Экспериментальное исследование особенностей формирования спектра шумов беспилотного летательного аппарата // Noise Theory and Practice. 2020. Т. 6, № 4 (22). С. 49–59. EDN: CАННFA
- [14] *Гу П., Авсиевич А.М., Лобатый А.А.* Математическая модель оценки влияния вибраций на элементы мультикоптера // Системный анализ и прикладная информатика. 2024. № 1. С. 37–42. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-1-37-42> EDN: TPPEKS
- [15] *Суконкина М.Л., Гайнов С.И.* Обзор методов и устройств виброзащиты приборных платформ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 311–319. EDN: SEZXGX
- [16] *Xiaoyu S, Yuanhang L, Ligang C, Xin Z.* Research and Design of UAV Environmental Monitoring System // Advanced Hybrid Information Processing. 4th EAI International Conference, ADHIP 2020, Binzhou, China, September 26-27, 2020, Proceedings, part I. 2021. P. 11–17.

Сведения об авторах:

Симанович Семён Васильевич, научный сотрудник, инженер по охране труда и промышленной безопасности; аспирант, УрМФ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт труда» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации, Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. Щорса, д. 15; Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66. ORCID: 0009-0005-7408-9858; SPIN-код: 5094-6745; AuthorID: 1203689. E-mail: rewriters@yandex.ru

Гаврилин Игорь Игоревич, кандидат биологических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66. SPIN-код: 2526-2048; AuthorID: 649940. E-mail: i.gavrilin@list.ru