

УДК 614.843

АСПЕКТЫ НАДЁЖНОСТИ И ВЫБОРА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

А. Г. БУБНОВ, И. В. САРАЕВ, А. Д. СЕМЕНОВ

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: bubag@mail.ru, saraev-i-v@mail.ru, sad8_3@mail.ru

В статье рассмотрены некоторые особенности обеспечения надёжности и выбора беспилотных летательных аппаратов для предупреждения и мониторинга пожаров в условиях низких температур. Констатируется, что пониженная температура ощутимо влияет на работоспособность и срок службы аккумуляторных батарей в т.ч. летательных аппаратов. При этом определено, что из-за таких явлений, как ветер, грозовые тучи, туман, экстремальные холода и осадки, могут возникнуть проблемы в функционировании системы управления полётом беспилотных летательных аппаратов. Наряду с этим, осадки в виде снега и льда могут привести к блокировке чувствительных датчиков, что негативно влияет на стабильность полёта беспилотного летательного аппарата. Показано, что для обоснования выбора беспилотных летательных аппаратов при техническом оснащении пожарно-спасательных подразделений можно применить комплексный критерий относительной общей пользы, который основан на анализе надёжностных, социальных, а также экономических показателей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БпЛА), надёжность, вероятность отказа, относительная общая польза.

ASPECTS OF RELIABILITY AND CHOICE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR FIRE PREVENTION AND MONITORING IN LOW TEMPERATURE CONDITIONS

A. G. BUBNOV, I. V. SARAEV, A. D. SEMENOV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: bubag@mail.ru, saraev-i-v@mail.ru, sad8_3@mail.ru

The article discusses some features of ensuring reliability and choice of unmanned aerial vehicles for fire prevention and monitoring at low temperatures. It is stated that the lowered temperature significantly affects the performance and service life of batteries, including aircraft. At the same time, it was determined that due to phenomena such as wind, thunderstorms, fog, extreme cold and precipitation, problems may arise in the functioning of the flight control system of unmanned aerial vehicles. Along with this, precipitation in the form of snow and ice can lead to blocking of sensitive sensors, which negatively affects the stability of the flight of an unmanned aerial vehicle. It is shown that to justify the choice of unmanned aerial vehicles for the technical equipment of fire and rescue units, a comprehensive criterion of relative overall benefit can be applied, which is based on an analysis of reliability, social, and economic indicators.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), reliability, probability of failure, relative overall benefit.

Беспилотные летательные аппараты – это не только удобное средство для решения различных задач, но и главный источник опасности на небе сегодня [1]. Беспилотные летательные аппараты (БпЛА) используются для различных задач, таких как съёмка видео и

фотографий, мониторинга окружающей среды, а также для разведки и инспекции зон бедствий. Однако гонки за престижем и крупными контрактами приводят к тому, что производители БпЛА не уделяют достаточного внимания надёжности и безопасности своих продуктов.

За последние годы количество инцидентов с БпЛА значительно возросло [2]. Они

становятся причиной авиакатастроф, нанося значительный ущерб не только инфраструктуре, но и жизни и здоровью людей. При этом ущерб от крупных авиакатастроф может измеряться миллиардами рублей. Поэтому важно понимать, какие причины вызывают подобные инциденты и как можно их предотвратить.

Вопросы безопасности использования БПЛА представляют собой серьёзную научно-техническую задачу [3]. Один из аспектов этой задачи – обеспечение безаварийной эксплуатации БПЛА, которая исключит неконтролируемое падение БПЛА на землю и, как следствие, непреднамеренное причинение вреда жизни, здоровью людей и имуществу.

Бурное развитие технологий привело к увеличению числа техногенных угроз, которые становятся причиной более частых и масштабных пожаров. Обеспечение безопасности становится всё более актуальной проблемой во многих регионах мира. При этом существует растущая потребность в эффективном и действенном мониторинге в рамках обеспечения техносферной безопасности. БПЛА становятся всё более востребованным инструментом для решения таких задач [1, 4].

БПЛА особенно полезны для мониторинга и управления противопожарными мероприятиями в чрезвычайных ситуациях благодаря своей способности быстро обследовать обширные территории и обрабатывать изображения с высоким разрешением [4].

Современные БПЛА выполняют следующие общие задачи [5]:

- поиск: включает в себя полёт над интересующей областью для поиска нескольких целей, охватывая каждую точку в этой области хотя бы один раз;
- наблюдение: включает в себя полёт над интересующей областью для обнаружения некоторых целей, многократное обследование каждой точки для получения обновленных данных;
- разведка: включает в себя полёт к списку точек для сбора данных;
- картографирование: включает в себя полёт над интересующей областью для построения карты, охватывающей каждую точку один раз для получения изображений или данных;
- мониторинг: включает в себя полёт над местом интересующего события для сбора данных;
- поддержка: включает в себя полёты над командами, работающими на земле, с целью предоставления им информации об окружающей обстановке;
- отслеживание: включает в себя отслеживание мобильной цели для получения информации или контроля над ней;

– транспорт: включает в себя доставку груза из одной точки в другую.

По мере того, как технологии в области БПЛА продолжают развиваться, меняются и варианты, доступные для беспилотного мониторинга пожаров. Отметим, что БПЛА широко применяются не только в подразделениях МЧС России при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ, но и другими ведомствами при осуществлении профессиональной деятельности. При этом стоит отметить, что в случае применения БПЛА, в рамках выполнения аварийно-спасательных работ особенно в условиях, которые угрожают жизни и здоровью участников тушения пожаров, значительно сокращается угроза для них [6].

Целью работы является рассмотрение аспектов, определяющих надёжность БПЛА для мониторинга аварийных ситуаций в условиях пониженных температур, а также разработка рекомендаций по оснащению пожарно-спасательных подразделений БПЛА.

Известно, что к разным типам задач могут быть адаптированы разные типы БПЛА, тем самым повышая эффективность выполнения поставленной задачи [7]. БПЛА с неподвижным крылом могут выполнять задачи, требующие покрытия больших территорий, такие как наблюдение и картографирование, тогда как БПЛА вертолетного типа могут выполнять задачи, требующие стационарных полётов для мониторинга и поддержки. Разнородные парки БПЛА могут оптимизировать выполнение задачи, распределяя разные ресурсы для разных действий. Мониторинг пожаров может происходить на больших и сложных ландшафтах, где отдельные БПЛА могут собирать только локальную информацию и выполнять простые действия.

БПЛА, рассматриваемые для мониторинга пожаров, должны иметь следующие характеристики [7]:

- габариты и вес: не более 1600×1600×800 мм в разложенном виде и 15 кг с учётом собственной массы и полезной нагрузки;
- автономность: минимум 30 минут полёта;
- навигация: объединение измерений IMU, визуальной одометрии и сигнала GPS/ГЛОНАСС/GALILEO, в том числе отслеживание местонахождения при аварийной посадке;
- управление: возможность достигать и зависать на путевых точках;
- связь: телеметрия и видеосвязь в радиусе 5 км;
- полезная нагрузка: обычные, тепловизионные и мультиспектральные камеры, а также датчики температуры, влажности и газа.

Размер и вес БПЛА подбираются так, чтобы найти компромисс между универсальностью и грузоподъёмностью. С одной стороны, БПЛА должны быть достаточно легкими, чтобы их можно было доставить к месту вызова на автомобиле и развернуть на месте 1 человеком. С другой стороны, они должны иметь камеры, датчики окружающей среды и устройства связи [7]. Исходя из особенностей применения летательных аппаратов для мониторинга пожаров, существуют различные технологии, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки [7]. Например, ИК-изображение полезно для определения масштабов пожара, в то время как LiDAR обеспечивает более точный мониторинг. При этом гиперспектральная визуализация полезна для определения интенсивности пожара, но может быть дорогостоящей и сложной для интерпретации. Таким образом, выбор технологии зависит от конкретных потребностей, где нужно учитывать влияние этих параметров на дальность полёта и маневренность. Более того, нельзя забывать про автономность, которая является важным аспектом системы: практически, чем дольше время полёта БПЛА, тем выше жизнеспособность системы для выполнения реальных задач. Современные высокопроизводительные БПЛА обеспечивают около 30 минут непрерывного полета, но в последующие годы эта цифра может увеличиться.

Навигационные возможности БПЛА – еще один важный аспект работы системы. Как правило, объединяют несколько источников, чтобы получить высокую точность и отказоустойчивость. В частности, рассматривают высокопроизводительные сенсорные системы IMU, обеспечивающие линейное ускорение, скорость вращения и ориентацию, а также приемник GNSS для получения положения, скорости и времени с высокой частотой. Кроме того, бортовые камеры могут получать данные о местности, которые позволяют оценить движение БПЛА. С помощью нескольких моделей можно интегрировать данные, предоставленные этими источниками, для получения точного местоположения БПЛА, например, модели Кальмана и фильтра частиц [8]. Таким образом, БПЛА могут сохранять достаточную автономность для выполнения своих задач даже в условиях отсутствия или ограниченности GNSS.

Наконец связь, часто является проблемой для применения БПЛА в сценариях с большими масштабами и отдалённым расположением. В рамках выполнения задач по управлению силами и средствами при тушении пожара должен происходить непрерывный обмен информацией между различными агентами: данные от БПЛА к базовой станции, команд

от базовой станции к БПЛА, информация от базовой станции к лицам, принимающим решения (ЛПР) или пожарным и т.д. БПЛА должны иметь дальность связи 5 км [9], чтобы эта система была работоспособна в рассматриваемых сценариях мониторинга.

Для обеспечения безопасности полётов БПЛА, необходимо учитывать погодные условия и принимать меры предосторожности в случае их ухудшения [10]. Понятно, что сильные ветры могут повлиять на стабильность БПЛА, особенно на небольших высотах. Это может привести к отклонению полётного маршрута и потере контроля над бортом. При этом грозовые облака могут вызвать помехи в работе бортовых систем и датчиков. Благодаря вспышкам молний создаются импульсы электромагнитных помех, которые могут привести к полной потере управления БПЛА. В свою очередь туман, также может сильно ограничить видимость, что затрудняет навигацию БПЛА. Если системы навигации не работают должным образом, это может привести к аварии или потере борта. Низкие температуры могут привести к замерзанию датчиков, что приведет к потере управления БПЛА. Это особенно важно для аппаратов, выполняющих миссии в Арктической зоне Российской Федерации [10].

Известно, что пониженная температура ощутимо влияет на работоспособность и срок службы аккумуляторных батарей БПЛА [10]. При этом нужно различать как минимум три температурных интервала. Даже в Арктике бывает лето, и наступает время положительной температуры. При температуре от 0 до -10 °C ухудшаются характеристики процессов зарядки и разрядки аккумуляторной батареи. На работе самой батареи это не сказывается. При температуре от -10 °C до -20 °C снижается поток энергии от источника, при этом серьезно нарушается процесс зарядки аккумулятора [11].

В условиях низких температур аккумуляторные батареи могут не только не обеспечить должный уровень заряда, но и привести к сбоям в работе БПЛА [12]. Кроме того, при пониженных температурах снижается разрядное напряжение на контактах аккумуляторных батарей. На основании этих фактов можно сделать вывод, что при низких температурах снижается мощность аккумуляторных батарей, что неизбежно приводит к нарушению надёжной работы БПЛА.

Во время полёта лёд может образовываться на поверхности БПЛА тремя способами. Два из них менее опасны и малоэффективны.

Первый способ – это сублимационное обледенение [12]. В этом случае происходит превращение водяных паров в лёд без пере-

хода в жидкое состояние. Это происходит, когда влажные воздушные массы контактируют с сильно охлаждёнными поверхностями в отсутствие облаков. Например, если на поверхности уже есть лёд или если летательный аппарат быстро теряет высоту, перемещаясь из более холодных верхних слоёв атмосферы в более тёплые нижние, сохраняя при этом низкую температуру обшивки. Образовавшиеся кристаллы льда не держатся прочно на поверхности и быстро сдуваются набегающим потоком.

Второй способ – это сухое обледенение. В этом случае уже сформировавшиеся кристаллы льда оседают на поверхности БПЛА при пролёте через кристаллические облака, которые настолько охлаждены, что влага в них находится в замороженном состоянии. Такой лёд обычно не удерживается на поверхности и не представляет опасности. Он может остаться на обшивке, если она имеет достаточно высокую температуру, чтобы кристалл успел растаять, а затем снова замёрзнуть при контакте с уже имеющимся льдом. Однако это уже частный случай другого, третьего типа возможного обледенения.

Третий способ – это замерзание на поверхности обшивки капель влаги, содержащихся в облаке или дожде. Вода в этих каплях находится в переохлаждённом состоянии. Образование центров кристаллизации и последующее превращение воды в лёд может произойти самопроизвольно при определённой температуре или при наличии примесей в воде.

Известны эксперименты по изучению обледенения БПЛА, проведённые на роторе беспилотника в режиме зависания [13]. Испытания проводились в условиях широкого диапазона параметров, таких как объёмный диаметр, температура воздуха, частота вращения ротора, скорость осаждения и содержание жидкой воды. Исследователи сосредоточились на изучении динамики обледенения лопасти несущего винта и эффектов, связанных с аэродинамической деградацией из-за скопления льда. Было проведено параметрическое исследование влияния каждого из тестируемых параметров обледенения.

Содержание влаги в воздухе оказалось более показательным для испытаний при вертикальном взлёте и посадке, чем интенсивность осадков [13]. Когда лопасти ротора вращаются, относительно статическая масса воды, присутствующая в определённом объёме воздуха перед ними, приходит в движение под воздействием результирующего воздушного потока, что приводит к обледенению в точке торможения лопасти вблизи передней кромки. Для других параметров ухудшение характери-

стик было связано со скоростью обледенения и формой лопасти.

Таким образом, вода, охлаждённая до определённой температуры, находится в метастабильном состоянии. В этом состоянии она может оставаться в течение длительного времени, пока не изменится температура или не произойдёт внешнее воздействие. Таким образом, ветра, грозовые облака, туман, сильный холод, снегопад могут привести к ошибкам системы управления полётом, достаточно часто снег и лёд блокируют чувствительные датчики и негативно влияют на стабильность полёта БПЛА.

С учётом вышеизложенного важным аспектом функционирования БПЛА является его аккумуляторная батарея. Методика подбора аккумуляторных батарей (как наиболее чувствительных к низкой температуре элементов БПЛА) различных производителей (аналогичных по габаритным размерам) для БПЛА была предложена и успешно апробирована П. С. Андреевым и А. И. Селиным [12]. Она заключается в сортировке энергоносителей по различным критериям: массе, скорости заряда, количеству циклов заряда, разряда, ёмкости и напряжению. Аккумуляторная батарея, отвечающая критерию, проходит на следующий уровень сортировки по другому критерию. Значимость критериев определяется требованиями к задачам, выполняемым БПЛА. Авторами [12] для анализа были выбраны аккумуляторы фирм: DJI; Shenzhen Grepow Battery; Okcell; CATL; Lifepo4; General Electronics Technology; Evlithium; Kokam; Turnigy; URUAV; CNHL; B-Grade; HЭТЕР (г. Казань) под брендом Li-Pol Systems. По результатам исследования [12], лучшими по соотношению энергоёмкости к массе, оказались литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы. Показано, что производительность батареи напрямую и в значительной степени определяет общую производительность БПЛА [12]. Различные литий-ионные аккумуляторы стали незаменимым кандидатом в силовую составляющую БПЛА благодаря таким их преимуществам, как высокая удельная мощность, длительный срок службы, надёжность, отсутствие выбросов загрязняющих веществ и т.д.

Немаловажным является экономическая составляющая работы аккумуляторов в группе [13, 14]. Так как аккумулятор совершает большое количество циклов заряда/разряда, то при выборе наиболее предпочтительного варианта, ЛПР заинтересованы в том, чтобы аккумулятор имел как можно больше циклов. А также имел низкую стоимость, потому что при расчёте экономической эффективности комплекса из нескольких БПЛА, стоимость и количество циклов заряда/разряда очень сильно

влияют на результат вычислений и отбора. Энергоемкость аккумулятора при проектировании отходит на задний план, так как при учёте всех факторов может получиться, что придётся собирать большой аккумулятор из нескольких ячеек меньшей ёмкости. В целях увеличения производительности и надежности БПЛА необходимо проводить больше исследований эксплуатации в экстремальных условиях [13].

Однако опубликованные исследования литий-ионных аккумуляторов в основном сосредоточены на экспериментальных и модельных работах по управлению тепловым режимом аккумуляторов [13, 14]. В работе [15] были исследованы возможные причины разрушения внутренней структуры литий-ионного аккумулятора, используемого в БПЛА. Здесь использовали тепловизионную инфракрасную камеру для измерения распределения температуры внутри литий-ионной батареи, а затем проанализировали механизмы разрушения. Результаты исследования показали, что перегрев и последующий взрыв происходили только в экстремальных условиях окружающей среды. Кроме того, вибрации окружающей среды могут повредить управляющую электронику литий-ионного аккумулятора и сформировать опасные точки перегрева в нём.

Не так давно в работе [16] были протестированы электрические характеристики промышленных литий-ионных батарей, используемых в БПЛА, при различных температурах, вибрации и условиях температурно-вибрационной связи. Высокая экспериментальная температура находилась в диапазоне 25–55 °C, а низкая экспериментальная температура находилась в диапазоне от -18 до 0 °C. Экспериментальные результаты показали, что разрядная ёмкость в низкотемпературном режиме составляет всего 85,9 % от ёмкости при высокой температуре. В условиях вибрации разрядная мощность значительно отличалась при 5, 10, 20 и 30 Гц по сравнению с отсутствием вибрации. В условиях температурно-вибрационной связи было обнаружено [16], что температура является основным влияющим параметром среди факторов воздействия (температура, частота и направление вибрации).

Экспериментально, группой авторов [17], было исследовано поведение литий-ионной батареи, работающей при температурах (например, от -15 до +25 °C), в отношении ее зарядного и разрядного поведения. Было замечено, что при отрицательных температурах (т.е. -5 °C, -10 °C и -15 °C) ёмкость литий-ионного аккумулятора снижается из-за эффекта импеданса, который затем увеличивает внутреннее сопротивление аккумулятора [17]. Систематические эксперименты с батареями

проводились для изучения влияния изменения температуры, как на характеристики ячеек, так и на несоответствия между ячейками [18]. Из них следует, что, в общем и целом, высокая температура может вызвать быстрое снижение ёмкости батареи с течением времени, при этом активность литий-ионной батареи увеличивается с повышением температуры, в то время как низкая температура может подавлять активность батареи из-за увеличения её внутреннего сопротивления [19].

В работе [20] описано экспериментальное исследование влияния температуры на зарядно-разрядные характеристики и характеристики тепловыделения литий-ионной батареи в двух различных тепловых условиях: при постоянной температуре и при почти адиабатическом режиме.

Авторами [21] было обнаружено, что влияние температуры разрядки на разрядную ёмкость было более значительным по сравнению с влиянием температуры зарядки на зарядную ёмкость.

При этом группа авторов [22] провела исследование по оценке влияния температуры на производительность литий-ионной батареи в автомобильном транспорте при трёх режимах (низкотемпературном, высокотемпературном и с различными уровнями перепада температур) которое показало, что контролировать температуры таких батарей необходимо при помощи жидкостного охлаждения. Для БПЛА, применяемых в условиях отрицательных температур, последнее требование труднореализуемо.

Ранее были предложены различные решения: системы управления температурой воздушных батарей [23], системы управления температурой жидкостных батарей [24], системы управления температурой батарей материалов с фазовым переходом [25], системы управления температурой батарей с тепловыми трубками [26] для повышения эффективности батареи и обеспечения её безопасности.

Тем не менее, исследованный диапазон температур очень ограничен, особенно при экстремальных температурах с учётом рабочей среды БПЛА [25]. Что говорит о необходимости увеличения количества исследований характеристик двигателей и аккумуляторов, используемых в БПЛА, особенно в экстремальных температурных условиях.

Следовательно, выбор (подбор) аккумулятора для БПЛА является многогранным вопросом, на который нет единого ответа. При этом необходимо учесть воздействие значительного количества факторов, ввиду того что от аккумулятора будет зависеть не только успешность выполнения поставленной перед БПЛА задачи, но и для обеспечения его без-

аварийного применения, исключая неконтролируемое падение на землю и связанного с этим непреднамеренного нанесения ущерба жизни, здоровью людей и имуществу.

Итак, низкие температуры могут оказать существенное влияние на производительность БПЛА [27]. Как указывалось выше, холод может привести к быстрому разряду аккумулятора, что сократит время полета БПЛА. Кроме того, могут снизиться обороты двигателя, что снизит подъёмную силу и маневренность БПЛА. Это может привести к неконтролируемой посадке или даже к аварии. Чтобы бороться с негативным воздействием холодной погоды на аккумуляторы БПЛА, некоторые производители разработали нагреватели и подогреватели аккумуляторов. Эти устройства предназначены для поддержания постоянной температуры аккумулятора, что может помочь сохранить его производительность и продлить срок службы. Некоторые аккумуляторы для БПЛА также оснащены встроенными нагревателями или обогревателями, которые можно активировать перед полётом, чтобы обеспечить оптимальную температуру аккумулятора.

Осуществлять фотосъёмку и видеонаблюдение с помощью БПЛА в холодную погоду может оказаться непростой задачей. Во-первых, низкие температуры могут повлиять на работу камеры БПЛА и привести к снижению качества изображения. Холодная погода может повлиять на качество изображений, снятых камерой БПЛА: низкие температуры могут привести к запотеванию объектива камеры, что приведёт к размытому и нечёткому изображению. Ещё одна проблема, которая может повлиять на качество изображения – это время автономной работы БПЛА. В холодную погоду аккумулятор может разряжаться быстрее, что приводит к сокращению времени полета и уменьшению возможностей для съёмки изоб-

ражений. Перед использованием рекомендуется держать батареи БПЛА в тепле и обеспечивать наличие дополнительных батарей для бесперебойной съёмки [27]. Снег и другие яркие поверхности могут привести к недоэкспонированию изображений камерой. Таким образом, холодная погода может повлиять на функциональность камеры БПЛА, но при правильных настройках и мерах предосторожности можно сохранять возможность делать качественные снимки с воздуха при минусовых температурах.

Таким образом, проблема надёжности БПЛА, как и другие проблемы обслуживания и безопасности, в последние годы стала чрезвычайно важной, несмотря на то, что двигатели стали более надёжными, улучшилась авионика и т.д. [28]. Исследования в области надёжности летательных аппаратов свидетельствуют о том, что исключение человеческого фактора из контура БПЛА не допускает применения менее жёстких стандартов проектирования и эксплуатации по сравнению с теми, которые применяются для самолетов. Частота отказов коммерческой авиации составляет около 10^{-5} летных ч, тогда как для БПЛА она находится примерно на уровне 10^{-3} летных ч, то есть на два порядка выше. С другой точки зрения, общая частота отказов сложных систем БПЛА, составляет 25 %. С учётом всех возможных основных систем и подсистем, образующих БПЛА, на рисунке изображена иерархия оценки надёжности БПЛА, показывающая распределение их отказов на каждую 1000 неисправностей [28]. Структура разделена на основные системы (жёлтый цвет) и подсистемы (синий), которые вместе представляют систему БПЛА (оранжевый). Рассмотрим, как классифицируются отказы с учетом функции каждой подсистемы.

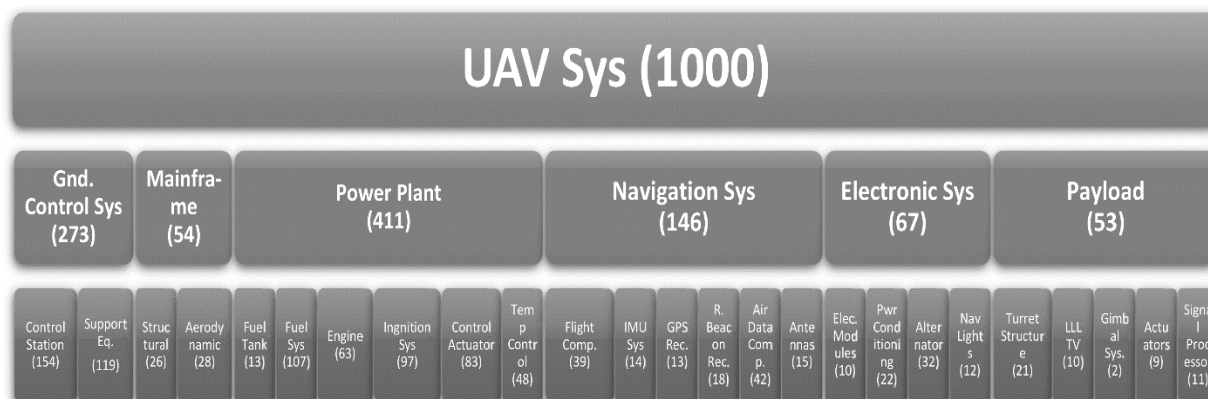


Рисунок. Иерархия оценки надёжности (каждые 1000 отказов системы) БПЛА [28]

Наземная система управления является частью всей системы БПЛА с самой высокой ремонтпригодностью. В основном она состоит из готовых коммерческих компонентов. Тот факт, что она является наземной, позволяет внедрять значительный процент резервных систем с конфигурациями горячего и холодного резерва, сокращая время автономной работы почти до нуля. Базовый блок БПЛА, является самой «сильной» частью всей системы – он разработан при помощи систем CAD, которые позволяют заранее изучать и оценивать нагрузки на конструкцию. В целом его размер достаточно велик – на самом деле, даже увеличение веса является небольшой ценой за более безопасную структурную систему. Как правило, наиболее распространённые отказы происходят из-за циклов усталости, пайки или необработанных заклёпок при сборке.

Силовая установка БПЛА сама по себе представляет собой достаточно надёжную механическую систему, даже если в подсистемах могут наблюдаться некоторые сбои. Например, при длительном выполнении задач плохое охлаждение может привести к перегреву двигателя или «усталости», что в конечном итоге может привести к его выходу из строя [28].

Навигационная система является наиболее важной частью аппарата – она характеризуется высокой интенсивностью отказов по сравнению с другими системами [28]. Тем не менее, она имеет наибольшее количество частей/подсистем с горячим резервированием.

Поэтому благодаря высокому уровню электронной миниатюризации возможно тиражирование большого количества подсистем, что делает её внутренне надёжной (посредством «горячего резервирования»: в случае отказа основной системы система горячего резерва немедленно вступает в силу, заменяя основную систему) [28]. Более того, благодаря тесной интеграции, полученной на основе опыта разработки автомобильных приложений, в аэрокосмической отрасли используются высоконадёжные электронные компоненты для навигации (такие как инерциальная навигационная система (INS) и система глобального позиционирования (GPS)) [28]. Кроме того, при возросшей вычислительной мощности процессоров в INS и GPS используется архитектура параллельных вычислений, что значительно повышает общую надёжность БПЛА.

В БПЛА принято разделять электронную систему от навигационной системы. Даже с чисто механической точки зрения может быть не так очевидно, как они разделены с функциональной точки зрения. Фактически, чтобы предотвратить возможные помехи, электронная система отделяет все электронные схемы,

которые не имеют тесного отношения к навигации, такие как электропитание и кондиционирование, для управления телекоммуникационной системой извне (спутниковая связь, данные наземного транспортного средства и др.). Даже в этом случае следует избегать избыточности (резервирования), поскольку, например, вес подвесной системы будет чрезмерно велик для такого небольшого транспортного средства.

Полезная нагрузка – комплекс наблюдения, не содержится в собственном кондиционируемом отсеке внутри фюзеляжа, а размещается снаружи в подвижной «башне», вставленной непосредственно в аэродинамический поток [28]. Башня содержит несколько электрооптических датчиков, таких как тепловизионная камера, визор для слабой освещённости, лазерный трассер и т.д. С механической точки зрения башня имеет шарнирный подвес, обеспечивает угол возвышения $\pm 90^\circ$ и непрерывного вращения на 360° ; система также содержит вспомогательную электронику датчиков и исполнительных механизмов движения.

Башня имеет термостатическое управление для обеспечения оптимальной работы электроники и предотвращения замерзания кинематических устройств в условиях полета на большой высоте. Для этих применений электроника выбирается с учетом её внутренней надёжности и рабочего диапазона при самых высоких температурах [28]. Поэтому геометрию компонентов корпусов подбирают, учитывая то, что БПЛА подвергается частым и резким изменениям высоты и, следовательно, давления, которые могут вызвать нагрузку на некоторые компоненты. Отметим, что количественные значения вероятности отказа на 1 ч полёта у БПЛА [28] колеблются в диапазоне от 1×10^{-4} до 1×10^{-2} . Почти 75 % аварий происходят по причине технических неисправностей в оборудовании [2]. В большинстве случаев это связано с отказом систем питания или недостатком материалов для изготовления компонентов БПЛА. Около 15 % несчастных случаев происходят из-за ошибок пилотов или нарушения правил эксплуатации.

Итак, факторы, влияющие на эффективность БПЛА в холодную погоду [2]:

- 1) высота над уровнем моря и сопротивление ветру;
- 2) время полёта и расстояние;
- 3) обращение и контроль;
- 4) функциональность камеры БПЛА в холодную погоду.

Основные причины инцидентов, связанных с БПЛА давно и хорошо известны [2]:

- 1) проблемы в функционировании электронных систем и некорректное управление;
- 2) нарушение правовых норм;
- 3) встречные полёты с другими воздушными судами;
- 4) погодные условия.

Здесь же [2] отмечается, что одним из аспектов, воздействующих на безопасность манёвров в вертикальной плоскости при обходе БПЛА рельефа местности, является турбулентность атмосферы в горных районах, для которых свойственна нестабильная погода, особенно в осенние и зимние месяцы. Вблизи горных склонов наблюдаются мощные восходящие и нисходящие потоки воздуха со скоростью от 10 до 20 м/с. Они вызывают сильную тряску летательного аппарата, что влияет на точность поддержания заданного режима полёта. В горных районах, где температура воздуха ниже, воздушные потоки могут вести себя непредсказуемо. Это происходит из-за того, что воздух обтекает возвышенности, и его движение меняется. Когда ветер дует с той стороны горы, где воздух поднимается вверх, летательный аппарат может неожиданно начать подниматься. Это явление называется термиками. С другой стороны горы, где воздух опускается вниз, тоже могут возникать опасные ситуации. Потоки воздуха там могут быть очень сильными, и летательный аппарат может резко упасть вниз.

Основываясь на анализе ключевых аспектов, которые определяют безопасность полёта БПЛА, можно составить перечень наиболее опасных, с точки зрения аварий, режимов их полёта в условиях пониженных температур. Вот некоторые из них [29]:

- полёт БПЛА на максимальное расстояние с минимальной высотой;
- полёт БПЛА с огибанием рельефа местности на минимальной безопасной высоте, при этом высота полёта регулируется с помощью информации от высотомера малых высот;
- полёт БПЛА на максимальное расстояние с минимальной безопасной высотой и огибанием рельефа местности, при этом высота полёта регулируется с помощью информации от высотомера малых высот.

Для предотвращения аварий БПЛА или минимизации их последствий необходимо [29]:

- резервировать контур управления БПЛА, то есть комплексировать системы ориентации и навигации разных типов (комплексироваться не только системы, но и отдельные датчики первичной информации, измеряющие

одни и те же параметры; это гарантирует, что отказ какой-либо системы ориентации и навигации БПЛА или датчиков первичной информации не приведёт к аварии или катастрофе);

- разработать рациональный алгоритм работы БПЛА, который не допускает превышения основных ограничений, связанных с эксплуатацией БПЛА (эти ограничения касаются угла или коэффициента подъёмной силы, максимальной скорости полёта и скоростного напора);

- ввести в действие парашютно-реактивную систему посадки в случае отказа основного (маршевого) двигателя или его систем, если динамический скоростной напор меньше нижнего эксплуатационного предела;

- учитывать комплекс случайных факторов, влияющих на практическую дальность полёта, при проведении инженерно-штурманского расчёта дальности и продолжительности полёта;

- принимать во внимание факторы, влияющие на безопасность манёвров в вертикальной плоскости при огибании БПЛА рельефа местности или искусственных сооружений, при определении безопасной высоты полёта.

В условиях пожара из-за дыма и огня видимость объектов может снижаться по сравнению с наблюдением в обычной обстановке [30]. В зависимости от плотности дыма, дальность видимости может меняться, что влияет на вероятность правильного распознавания объектов. Для достижения необходимой вероятности обнаружения необходимо правильно подобрать высоту полёта БПЛА. В [30] были предложены методика и алгоритм (как система с адаптивной структурой), позволяющие определить оптимальную высоту полёта. Она состоит из нескольких шагов [30]:

- 1) определение критерия эффективности мониторинга пожарной ситуации;
- 2) анализ критерия эффективности мониторинга в зависимости от высоты полёта и пожарной ситуации;
- 3) оценка пожарной ситуации (выделение участков пожара);
- 4) определение оптимальной высоты полёта для облёта каждой зоны пожара.

Первые два этапа включают в себя подготовительные мероприятия перед полётом. Последующие этапы выполняются в режиме реального времени в процессе приближения к местности, охваченной пожаром. Также стоит отметить, что 4 этап предполагает непрерывное выполнение на протяжении всей операции мониторинга. Основная трудность в применении адаптивного алгоритма [30] заключается в том, чтобы выбрать режим обработки в зависимости от условий видимости.

Предлагается адаптировать методы обработки изображений к визуальным характеристикам сцены, основываясь на анализе гистограммы изображения местности, получаемого с борта.

За последнее десятилетие развитие беспилотной авиации показало, что этот вид робототехнических систем востребован в труднодоступных регионах [1]. Использование БПЛА позволяет выполнять поисковые работы быстрее и с меньшими затратами. Арктическая зона Российской Федерации – идеальное место для опережающего внедрения беспилотных авиационных систем. Потребность в них растёт из-за активного развития Северного морского пути, добывающей промышленности и туризма в Арктике. В ближайшей перспективе беспилотные летательные аппараты будут использоваться в этом регионе для создания цифровых моделей местности, поиска и спасения людей, автоматизированной доставки грузов, мониторинга инфраструктуры и природной среды. Для улучшения применения беспилотных авиационных систем в Арктике необходимо интегрировать их в общее воздушное пространство. Одной из основных проблем при увеличении загруженности воздушного движения в Арктической зоне является одновременный полёт пилотируемых и беспилотных воздушных судов. Для решения этой проблемы необходимо тщательно продумать взаимодействие и наблюдение за всеми воздушными судами. Рациональное использование беспилотных авиационных технологий в Арктике сделает этот регион современным и оснащённым цифровой автоматизацией.

Однако применение БПЛА в высоких широтах также связано с техническими трудностями, такими как суровые погодные условия, влияние внешних помех на радионавигационное обеспечение, отсутствие наземной инфраструктуры и другие факторы. Продолжительность полёта и срок эксплуатации во многом зависят от характеристик силовых установок беспилотных аппаратов. У каждого типа элементов питания БПЛА есть свои преимущества и недостатки [20]. Рассматривая двигатель, работающий на бензине, можно с уверенностью утверждать, что он обеспечивает более длительный полёт, поскольку при сгорании топлива выделяется больше энергии, чем при использовании аккумулятора. Однако использование такого двигателя имеет и свои минусы. Например, его конструкция довольно сложна, а подготовка к полёту занимает много времени. Кроме того, работа бензинового двигателя негативно влияет на окружающую среду, так как при сгорании топлива в атмосферу выбрасывается углекислый газ, что приводит к загрязнению воздуха. В отличие от него, аккумуляторная батарея не наносит вреда окру-

жающей среде и гораздо удобнее в использовании. Однако у неё есть и минус: низкие температуры в Арктике могут негативно сказаться на её работе и сроке службы. В таких условиях мощность батареи снижается, что может привести к проблемам в работе беспилотника. Кроме того, аккумуляторные батареи довольно тяжёлые и занимают много места, что может помешать размещению необходимого пожарно-спасательного оборудования на борту летательного аппарата.

Исходя из имеющейся информации, а также из [20], радиоуправляемый БПЛА для целей мониторинга должен иметь следующие минимальные тактико-технические характеристики (ТТХ):

- время зарядки – не ниже 2 ч;
- скорость полета – 4-6 м/с;
- дальность полета – до 600 м;
- онлайн трансляция видео – 200-300 м;
- камера с панорамным обзором (110°);
- коллекторные моторы;
- бортовой аккумулятор Li-Po 3.8 V не ниже 1500 mAh;
- температура окружающего воздуха от -40 °C до +40 °C;
- двухсторонняя система радиоуправления 2.4G.

Для обоснования выбора наиболее подходящего для целей мониторинга БПЛА воспользуемся хорошо зарекомендовавшим себя методическим подходом [31-36] к расчёту критерия относительной общей пользы (W). Он основывается на использовании данных, заявленных производителями оборудования, при расчёте его вероятностей безотказной работы ($P(t)$) и отказа ($Q(t)$) [36]. Здесь важно учитывать расходы на эксплуатацию и обслуживание оборудования, включая затраты на устранение неполадок (G). Также необходимо оценить надёжность оборудования, чтобы определить математическое ожидание техногенного риска его отказа (B). На основе этих данных можно выбрать подходящую для мониторинга тип и марку БПЛА, как отечественную, так и импортную, с учётом особенностей каждого региона России. Относительная общая польза рассчитывалась как отношение математического ожидания ущерба от внезапного прекращения работы (отказа) оборудования ($Y_{пр}$) к сумме величины уровня техногенного риска в стоимостном выражении (B) и затрат на снижение уровня техногенного риска ПТО (G) [31, 34, 36]. Полученные по результатам расчётов данные в рамках определения относительной общей пользы применения четырёх вариантов БПЛА приведены в табл. (с использованием данных о средней продолжительности жизни и валовом региональным продукте в 2023 г. по Новосибирской области (этот регион взят, как

наиболее характерный по погодным условиям: абсолютная минимальная температура¹ равна -50 °С (температура воздуха наиболее холод-

ных суток, обеспеченностью 0.98 равна -44 °С), а абсолютная максимальная температура воздуха равна 37 °С).

Таблица. Показатели относительной общей пользы БПЛА (по наработке на отказ, установленной производителем)

Показатель	Марка беспилотного летательного аппарата			
	X300S1W720P-D ²	DJI Phantom 4 RTK ³	Syma Z6 ⁴	MJX X104G [20]
$P(t)$	0,786	0,955	0,875	0,963
$Q(t)$	0.214	0.045	0.125	0.037
B , руб./год	1199644	251088	697467	195291
G , руб./год	25100	25100	25100	25100
Стоимость, руб.	4580	829000	10490	7 130
W , руб.	22	101	39	127
Место	4	2	3	1

Опираясь на данные табл. и положения Военной доктрины Российской Федерации⁵, рекомендуется при оснащении новыми образцами вооружения и специальной техники ориентироваться на продукцию отечественного производства (т.е. отечественные аналоги должны быть не хуже MJX X104G). Следовательно, в качестве рекомендации по оснаще-

нию пожарно-спасательных подразделений БПЛА стоит рассматривать вариант аналогичный MJX X104G. Учитывая Федеральный закон № 44-ФЗ⁶, следует в первую очередь обращать внимание на продукцию именно отечественных производителей, выпускающих БПЛА близкие по ТТХ (не хуже [20]), надёжности, стоимости и эксплуатационным затратам.

Список литературы

1. Корабейников Д. Н., Мнацаканов М. Г., Зебзеев А. В. Дроны и беспилотные летательные аппараты. Преимущества и перспективы развития // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 31. С. 138–146.

2. Анализ факторов, влияющих на безопасность полета беспилотных летательных аппаратов. Причины авиационных происшествий беспилотных летательных аппаратов и способы их предотвращения / С. П. Гулевич, Ю. Г. Веселов, С. П. Прядкин [и др.] // Пробле-

мы безопасности полетов. 2022. № 12. С. 21–23.

3. Вытовтов А. В., Калач А. В., Разиньков С. Ю. Современные беспилотные летательные аппараты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015. № 4. С. 70–74.

4. Применение беспилотных летательных аппаратов для поддержки управления противопожарными действиями в условиях чрезвычайных ситуаций / С. И. Мартемьянов, О. С. Маторина, О. В. Стрельцов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 1 (139). DOI 10.23670/IRJ.2024.139.5.

5. Ерицов А. М., Секерин И. М., Залесов С. В. Совершенствование беспилотных летательных аппаратов для обнаружения и мониторинга лесных пожаров // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). URL: <https://research-journal.org/archive/5-143-2024-may/10.60797/IRJ.2024.143.15> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.15.

6. Целесообразность применения беспилотных авиационных систем при тушении пожаров и ликвидации аварий на объектах защиты / А. А. Карапузиков, М. В. Дьяков, А. С. Горелик [и др.] // Техносферная безопасность. 2021. № 2 (31). С. 61–67.

7. Пивоваров А. В., Морозов А. А. Использование технологий БПЛА при пожаротушении // Мониторинг, моделирование и про-

¹ СП 131.13330.2020 Строительная климатология

² Радиоуправляемый квадрокоптер X300S1W720P-D [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rc-today.ru/product/radioupravlyaemii-kvadrokopter/> (дата обращения: 02.09.2024).

³ Phantom 4 RTK [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pro-aero.ru/phantom4rtk?yclid=13723429675554570239/> (дата обращения: 02.09.2024).

⁴ Радиоуправляемый квадрокоптер Syma Z6 с камерой 4K FPV. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rc-today.ru/product/radioupravlyaemii-kvadrokopter-syma-z6-s-kameroi-4k-fpv/> (дата обращения: 02.09.2024).

⁵ Военная доктрина Российской Федерации, утв. Президентом Российской Федерации 25.12.2014 № Пр-2976

⁶ Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»

гнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий», 2019. С. 284–286.

8. Амелин К. С., Миллер А. Б. Алгоритм уточнения местонахождения легкого БПЛА на основе Калмановской фильтрации измерений пеленгационного типа // Информационные процессы. 2013. Том 13. № 4. С. 338–352.

9. Каштанов В. В., Немтинов В. А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Том 28. № 4. С. 606–614. DOI 10.17277/vestnik.2022.04.

10. Чепусов П. А., Малая Е. В. Применение беспилотной авиации в исследованиях Арктики // Научный Лидер. 2021. № 14(16). С. 41–47.

11. Кашкаров А. П. Аккумуляторы: справочное пособие. М.: РадиоСофт, 2014, 187 с.

12. Андреев, П. С., Селин А. И. К вопросу выбора аккумуляторных батарей БПЛА при условии групповой работы // Universum: технические науки: электронный научный журнал. 2023. № 6 (111). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15693> (дата обращения: 29.08.2024).

13. Innocente M. S., Grasso P. Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. *Journal of computational science*, 2019, vol. 34. pp. 80–101. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jocs.2019.04.009.

14. A review of the estimation and heating methods for lithium-ion batteries pack at the cold environment / X. Peng, S. Chen, A. Garg [et al.]. *Energy Science and Engineering*, 2019, vol. 7, issue 3, pp. 645–662 (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1002/ese3.279.

15. Swornowski P. J. Destruction mechanism of the internal structure in lithium-ion batteries used in aviation industry. *Energy*, 2017, vol. 122, pp. 779–786 (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.121.

16. Zhang L., Mu Z., Gao X. Coupling analysis and performance study of commercial 18650 lithium-ion batteries under conditions of temperature and vibration. *Energies*, 2018,

vol. 11, issue 10, pp. 2856. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.3390/en11102856.

17. Aris A. M., Shabani B. An experimental study of a lithium ion cell operation at low temperature conditions. In: Alam F, Jazar R, Chowdhury H, editors. 1st international conference on energy and power, Icep 2016–2017, pp. 128–135. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.117.

18. Cen J., Jiang F. Li-ion power battery temperature control by a battery thermal management and vehicle cabin air conditioning integrated system. *Energy for Sustainable Development*, 2020, vol. 57, pp. 141–148. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.esd.2020.06.004.

19. Lindgren J., Lund P. D. Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 328, pp. 37–45. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.038.

20. A comprehensive experimental study on temperature-dependent performance of lithium-ion battery / Z. Lu, X. Yu, L. Wei [et al.]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 158, pp. 113800. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113800.

21. Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries / L. Liao, P. Zuo, Y. Ma [et al.]. *Electrochimica Acta*, 2012, vol. 60, pp. 269–273. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.electacta.2011.11.041.

22. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management / W. Wu, S. Wang, W. Wu [et al.]. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 182, pp. 262–281. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051.

23. Giuliano M. R., Prasad A. K., Advani S. G. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium titanate batteries. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 216, pp. 345–352. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.05.074.

24. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface / Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang [et al.]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 1514–1522. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059.

25. Rao Z., Wang Q., Huang C. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system. *Applied Energy*, 2016, vol. 164, pp. 659–669. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.021.

26. Liang J., Gan Y., Li Y. Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 155, pp. 1–9. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.enconman.2017.10.063.

27. LiDAR remote sensing of the cryosphere: Present applications and future prospects / A. Bhardwaj, L. Sam, A. Bhardwaj [et al.]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 177, pp. 125–143. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.031.

28. Austin R. *Unmanned Aircraft Systems*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010; 332 p. DOI:10.1002/9780470664797.

29. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты. Минск: «Попурри», 2003. 272 с.

30. Картеничев А. Ю., Панфилова Е. В. Технологии тушения пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 149–152.

31. Бубнов А. Г., Бочкарев А. Н., Волков В. В. Возможность упрощения выбора пожарных стволов // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 25–32.

32. Бубнов А. Г., Курочкин В. Ю., Моисеев Ю. Н. К вопросу о критериях выбора пожарно-спасательного оборудования // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2014. № 1 (37). С. 89–94.

33. Сараев И. В., Бубнов А. Г., Моисеев Ю. Н. Сравнительный анализ методов поддержки управленческих решений по оснащению пожарно-спасательных подразделений МЧС России // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 1 (12). С. 40–51.

34. Относительная общая польза – дополнительный комплексный критерий выбора пожарных рукавов / И. В. Сараев, А. Г. Бубнов, В. Ю. Курочкин [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 4. С. 66–71.

35. Сараев И. В., Бубнов А. Г. Ранжирование предпочтительности выбора различного пожарно-технического оборудования для оснащения подразделений МЧС России на основе комплексного критерия относительной общей пользы // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2018. № 3. С. 9–16.

36. Сараев И. В., Бубнов А. Г. Комплексный критерий для выбора пожарно-технического оборудования при оснащении подразделений МЧС России // Проблемы

управления рисками в техносфере. 2018. № 3 (47). С. 86–93.

References

1. Korabejnikov D. N., Mnaczkakov M. G., Zebzeev A. V. Drony` i bespilotny`e letatel`ny`e apparaty`. Preimushhestva i perspektivy` razvitiya [Drones and unmanned aerial vehicles. Advantages and development prospects]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, issue 31, pp. 138–146.

2. Analiz faktorov, vliyayushhix na bezopasnost` poleta bespilotny`x letatel`ny`x apparatov. Prichiny` aviacionny`x proisshestvij bespilotny`x letatel`ny`x apparatov i sposoby` ix predotvrashheniya [Analysis of factors affecting the safety of unmanned aerial vehicles. Causes of unmanned aerial vehicle accidents and ways to prevent them] / S. P. Gulevich, Yu. G. Veselov, S. P. Pryadkin [et al.]. *Problemy` bezopasnosti poletov*, 2022, issue 12, pp. 21–23.

3. Vy`tovtov A. V., Kalach A. V., Razin`kov S. Yu. Sovremennyy`e bespilotny`e letatel`ny`e apparaty` [Modern unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova*, 2015, issue 4, pp. 70–74.

4. Primenenie bespilotny`x letatel`ny`x apparatov dlya podderzhki upravleniya protivopozharnymi` deystviyami v usloviyax chrezvy`chajny`x situacij [Use of unmanned aerial vehicles to support fire management in emergency situations] / S. I. Martem`yanov, O. S. Matorina, O. V. Strel`czov [et al.]. *Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal*, 2024, vol. 1 (139), DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.5.

5. Ericzov A. M., Sekerin I. M., Zalesov S. V. Sovershenstvovanie bespilotny`x letatel`ny`x apparatov dlya obnaruzheniya i monitoringa lesny`x pozharov [Improving drones for detecting and monitoring forest fires]. *Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal*, 2024, vol. 5 (143), URL: <https://research-journal.org/archive/5-143-2024-may/10.60797/IRJ.2024.143>. 15 (data obrashheniya: 29.08.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.15.

6. Celesoobraznost` primeneniya bespilotny`x aviacionny`x sistem pri tushenii pozharov i likvidacii avarij na ob`ektax zashhity` [The feasibility of using unmanned aerial systems in extinguishing fires and eliminating accidents at protected facilities] / A. A. Karapuzikov, M. V. D`yakov, A. S. Gorelik [et al.]. *Texnosfer-naya bezopasnost`*, 2021, vol. 2 (31), pp. 61–67.

7. Pivovarov A. V., Morozov A. A. Ispol`zovanie texnologij BPLA pri pozharotushenii [Use of UAV technologies in firefighting]. *Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasny`x prirodny`x yavlenij i chrezvy`chajny`x situacij*:

сbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Zheleznogorsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vy'sshego obrazovaniya "Sibirskaya pozharно-spasatel'naya akademiya" Gosudarstvennoy protivopozharной sluzhby Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvy'chajny'm situacijam i likvidacii stixijny'x bedstvij", 2019, pp. 284–286.

8. Amelin K. S., Miller A. B. Algoritm utochneniya mestonaxozhdeniya legkogo BPLA na osnove kalmanovskoj fil'tracii izmerenij pelengacionnogo tipa [Algorithm for refining the location of a light UAV based on Kalman filtering of direction-finding measurements]. *Informacionny'e processy*, 2013, vol. 13, issue 4, pp. 338–352.

9. Kashtanov V. V., Nemtinov V. A. Analiz organizacii svyazi s primeneniem bespilotny'x letatel'ny'x apparatov maloj dal'nosti [Analysis of the organization of communication using short-range unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, vol. 28, issue 4, pp. 606–614. DOI: 10.17277/vestnik.2022.04. pp.606-614.

10. Chepusov P. A., Malaya E. V. Prime-nenie bespilotnoj aviatsii v issledovaniyax Arktiki [The use of unmanned aircraft in Arctic research]. *Nauchny'j Lider*, 2021, issue 14 (16), pp. 41–47.

11. Kashkarov A. P. *Akkumulyatory*: *spravochnoe posobie* [On the issue of choosing UAV batteries under the condition of group work]. Moscow: RadioSoft, 2014, 187 p.

12. Andreev P. S., Selin A. I. K voprosu vy'bora akkumulyatorny'x batarej BpLA pri uslovii gruppovoj raboty [On the issue of choosing UAV batteries under the condition of group work]. *Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2023, vol. 6 (111). <https://universum.com/ru/tech/archive/item/15693> (data obrashheniya: 29.08.2024).

13. Innocente M. S., Grasso P. Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. *Journal of computational science*, 2019, vol. 34, pp. 80–101. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jocs.2019.04.009.

14. A review of the estimation and heating methods for lithium-ion batteries pack at the cold environment / X. Peng, S. Chen, A. Garg [et al.]. *Energy Science and Engineering*, 2019, vol. 7, issue 3, pp. 645–662 (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1002/ese3.279.

15. Swornowski P. J. Destruction mechanism of the internal structure in lithium-ion batteries used in aviation industry. *Energy*, 2017, vol. 122, pp. 779–786 (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.121.

16. Zhang L., Mu Z., Gao X. Coupling analysis and performance study of commercial 18650 lithium-ion batteries under conditions of temperature and vibration. *Energies*, 2018, vol. 11, issue 10, pp. 2856. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.3390/en11102856.

17. Aris A. M., Shabani B. An experimental study of a lithium ion cell operation at low temperature conditions. In: Alam F, Jazar R, Chowdhury H, editors. 1st international conference on energy and power, Icep 2016–2017, pp. 128–135. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.117.

18. Cen J., Jiang F. Li-ion power battery temperature control by a battery thermal management and vehicle cabin air conditioning integrated system. *Energy for Sustainable Development*, 2020, vol. 57, pp. 141–148. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.esd.2020.06.004.

19. Lindgren J., Lund P. D. Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 328, pp. 37–45. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.038.

20. A comprehensive experimental study on temperature-dependent performance of lithium-ion battery / Z. Lu, X. Yu, L. Wei [et al.]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 158, pp. 113800. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113800.

21. Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries / L. Liao, P. Zuo, Y. Ma [et al.]. *Electrochimica Acta*, 2012, vol. 60, pp. 269–273. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.electacta.2011.11.041.

22. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management / W. Wu, S. Wang, W. Wu [et al.]. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 182, pp. 262–281. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051.

23. Giuliano M. R., Prasad A. K., Advani S. G. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium titanate batteries. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 216, pp. 345–352. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.05.074.

24. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface / Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang [et al.]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 1514–1522. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059.

25. Rao Z., Wang Q., Huang C. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal

management system. *Applied Energy*, 2016, vol. 164, pp. 659–669. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.021.

26. Liang J., Gan Y., Li Y. Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 155, pp. 1–9. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.enconman.2017.10.063.

27. LiDAR remote sensing of the cryosphere: Present applications and future prospects / A. Bhardwaj, L. Sam, A. Bhardwaj [et al.]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 177, pp. 125–143. (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.031.

28. Austin R. *Unmanned Aircraft Systems*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010; 332 p. DOI:10.1002/9780470664797.

29. Vasilin N. Ya. *Bespilotny'e letatel'ny'e apparaty* [Unmanned aerial vehicles]. Minsk: «Popurri», 2003, 272 p.

30. Kartenichev A. Yu., Panfilova E. V. *Tekhnologii tusheniya pozharov s ispol'zovaniem bespilotny'x letatel'ny'x apparatov* [Firefighting technologies using unmanned aerial vehicles]. *Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvy'chajny'x situacij*, 2019, vol. 1 (10), pp. 149–152.

31. Bubnov A. G., Bochkarev A. N., Volkov V. V. *Vozmozhnost' uproshheniya vybora pozharny'x stvolov* [Possibility of simplifying the selection of fire nozzles]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 25–32.

32. Bubnov A. G., Kurochkin V. Yu., Moiseyev Yu. N. *K voprosu o kriteriyakh vybora pozharo-spasatel'nogo oborudovaniya* [On the issue of criteria for selecting fire and rescue

equipment]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Regional'noye prilozheniye*, 2014, vol. 1 (37), pp. 89–94.

33. Sarayev I. V., Bubnov A. G., Moiseyev Yu. N. *Sravnitel'nyy analiz metodov podderzhki upravlencheskikh resheniy po osnashcheniyu pozharo-spasatel'nykh podrazdeleniy MCHS Rossii* [Comparative analysis of methods for supporting management decisions on equipping fire and rescue units of the Russian Emergencies Ministry]. // *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'*, 2019, issue 1(12), pp. 40–51.

34. Otnositel'naya obshchaya pol'za – dopolnitel'nyy kompleksnyy kriteriy vybora pozharnykh rukavov [Relative overall benefit – an additional complex criterion for selecting fire hoses] / I. V. Sarayev, A. G. Bubnov, V. Yu. Kurochkin [et al.]. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 2015, vol. 24, issue 4, pp. 66–71.

35. Sarayev I. V., Bubnov A. G. *Ranzhirovaniye predpochtitel'nosti vybora razlichnogo pozharo-tekhnicheskogo oborudovaniya dlya osnashcheniya podrazdeleniy MCHS Rossii na osnove kompleksnogo kriteriya otnositel'noy obshchey pol'zy* [Ranking the preference of choosing various fire-fighting equipment for equipping the units of the Ministry of Emergency Situations of Russia based on a comprehensive criterion of relative overall benefit]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii»*, 2018, issue 3, pp. 9–16.

36. Sarayev I. V., Bubnov A. G. *Kompleksnyy kriteriy dlya vybora pozharo-tekhnicheskogo oborudovaniya pri osnashchenii podrazdeleniy MCHS Rossii* [Comprehensive criteria for selecting fire-fighting equipment when equipping units of the Russian Emergencies Ministry]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2018, vol. 3(47), pp. 86–93.

Бубнов Андрей Германович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

Доктор химических наук, доцент

E-mail: bubag@mail.ru

Bubnov Andrey Germanovitch

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Chemical Sciences, associate professor

E-mail: bubag@mail.ru

Сараев Иван Витальевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

Кандидат технических наук

E-mail: saraev-i-v@mail.ru

Saraev Ivan Vitalevitch

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy
of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences

E-mail: saraev-i-v@mail.ru

Семенов Андрей Дмитриевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук

E-mail: sad8_3@mail.ru,

Semenov Andrey Dmitrievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy
of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences

E-mail: sad8_3@mail.ru.