

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС»**

*На правах рукописи*

**КИМ МАКСИМ ЛЕНСОВИЧ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ  
РАБОТ В ШАХТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Темкин Игорь Олегович

Москва – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ГЛАВА 1. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ВОЗМОЖНЫЕ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ .....	14
1.1. Аспекты поставарийного мониторинга состояния шахтных выработок и ведения аварийно-спасательных работ .....	14
1.2. Робототехнические средства, возможные к использованию в угольных шахтах со средней водообильностью .....	15
1.3. Робототехнические средства, возможные к использованию в затопленных выработках угольных шахт .....	21
1.4. Летательные робототехнические средства, возможные к использованию в угольных шахтах.....	23
Выводы по главе 1 .....	25
ГЛАВА 2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВГСЧ.....	27
2.1. Предпосылки автоматизированного информационного обеспечения горноспасательной службы с использованием РТК .....	27
2.2. Структура автоматизированной информационной поддержки горноспасательной службы с использованием РТК .....	32
Выводы по главе 2 .....	38
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ .....	39
3.1. Формирование математической модели движения БПЛА в шахтных условиях.....	40
3.2. Разработка структуры системы автоматического управления маршрутным движением БПЛА .....	47
3.2.1. Управление угловым положением БПЛА .....	50
3.2.2. Управление пространственным положением БПЛА.....	52

3.2.3. Планирование траекторного маршрута движения БПЛА .....	53
Выводы по главе 3 .....	55
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ.....	57
4.1. Моделирование процесса автоматически управляемого движения по маршруту БПЛА в шахтных условиях .....	57
4.1.1. Условия и задачи моделирования .....	57
4.2. Результаты модельных исследований .....	61
4.2.1. Пролет по тестовому полигону без препятствий.....	61
4.2.2. Пролет по тестовому полигону при наличии препятствий .....	64
4.2.3. Пролет тестовому полигону при возмущении шахтным потоком воздуха.....	65
4.2.4. Экстренное торможение .....	66
4.2.5. Время полета и длина полетного пути.....	67
Выводы по главе 4 .....	68
ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВГСЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО- СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ .....	69
5.1. Анализ и обоснование выбора робототехнических средств доставки и приборов мониторинга.....	69
5.2. Анализ и обоснование выбора технических средств оценки состояния горных выработок.....	70
5.3. Анализ и выбор средств измерения параметров и характеристик состава рудничной атмосферы для БПЛА.....	77
5.4. Формирование сети передачи данных в автоматизированной системе шахтного робототехнического мониторинга.....	81
5.5. Технические предложения на создание шахтного БПЛА .....	84

Выводы по главе 5 .....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ.....	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	103
П. 1. Назначение, особенности и технические характеристики колесных, гусеничных, подводных и летательных робототехнических средств .....	103
П. 2. Список программных модулей, используемых при моделировании..	112
П. 3. Документы актуальности и внедрения .....	115

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Производственная деятельность в горнодобывающей промышленности сопряжена с наличием широкого спектра факторов риска, а аварии в шахтах являются одними из самых распространенных причин несчастных случаев со смертельным исходом на производстве. Современное состояние технологий разработки угольных месторождений подземным способом характеризуется тем, что добычу угля приходится вести из пластов глубокого залегания с использованием мощных и высокоэффективных добычных машин, с пока еще неизбежным присутствием шахтеров в забоях и прилегающих выработках.

Статистика частоты происходивших взрывов показывает, что за период с 1991-2020г. при эксплуатации и ведении горноспасательных работ в угольных шахтах России было зафиксировано 208 взрывов метана и угольной пыли, в том числе 28 взрывов при аварийно-спасательных работах [12; 16; 36]. Тренд частоты взрывов, вспышек метана и угольной пыли за тот же период не имел тенденции к снижению. От этих взрывов пострадало 1612 человек, в том числе 818 человек получили смертельные травмы; 95 человек из погибших – работники военнизированных горноспасательных частей (ВГСЧ).

Такого количества смертей можно было бы избежать, если бы мониторинг шахтной атмосферы осуществлялся не только в локальных пунктах размещения стационарных датчиков, а также, если бы сотрудники ВГСЧ располагали данными о состоянии аварийных выработок перед тем как туда выдвигаться после возникновения аварии. В настоящее время, одним из эффективных направлений применения роботизированных или полностью автономных интеллектуальных устройств и систем является мониторинг состояния объектов, находящихся в среде, исключая присутствие человека. Проблема получения достоверной информации об обстановке в горной выработке после возникновения в ней различных видов аварий с целью принятия рациональных и целесообраз-

ных решений ВГСЧ была и остается сегодня жизненно важной для предприятий горнодобывающей промышленности.

В рамках этой проблемы, задача получения информации о состоянии технологической среды и составе рудничной атмосферы в шахте с помощью роботизированных средств – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для принятия рациональных и целесообразных решений в аварийных условиях, является актуальной.

**Степень разработанности.** Решению задач проблемы информационного обеспечения службы ВГСЧ посвящены работы исследователей институтов и учреждений, среди которых Институт горного дела им. А.А. Скочинского, Институт угля и углехимии СО РАН, АО «НЦ ВостНИИ». Трудami многих ученых, среди которых Р.А. Абрамов, А.Т. Айруни, В.Б. Артемьев, Л.А. Бахвалов, В.А. Бойко, А.А. Волков, Ю.В. Горлов, И.Н. Засухин, В.Н. Захаров, Н.О. Каледина, Ф.С. Клебанов, С.С. Кубрин, Д.Ю. Палеев, Л.М. Петров, Ю.Ф. Руденко, В.А. Святный, Р.Б. Тянь, К.З. Ушаков, Л.П. Фельдман, С.В. Цой, С.З. Шкундин, созданы газодинамические модели, программы расчетов вентиляционных режимов в шахтах и рудниках, на основе которых создаются планы ликвидации аварий для реальных шахт и прочие регламентирующие документы, которые определяют действия и поведение сотрудников ВГСЧ. Задачи создания системы информационного обеспечения решались путем формирования сети автоматической газовой защиты и предупреждения аварийной опасности. Сегодня, с появлением робототехнических средств доставки приборов и средств анализа аварийной обстановки, появилась возможность создания автоматизированной системы информационного обеспечения аварийно-спасательных работ в шахтах

**Целью диссертационного исследования** является повышение безопасности и эффективности ведения горноспасательных работ за счет использования беспилотного летательного аппарата, обеспечивающего получение достоверной информации об обстановке в выработках шахты в аварийных условиях.

**Идея работы** – создание мобильного мониторингового комплекса на основе БПЛА, позволяющего в автономном управляемом полете измерять необходимые данные о составе рудничной атмосферы аварийной выработки и обеспечивать информационную поддержку службы ВГСЧ.

### **Задачи диссертационного исследования.**

Для достижения цели диссертационного исследования решаются следующие задачи:

1. Разработать структуру автоматизированной системы информационной поддержки горноспасательных частей с использованием беспилотного летательного аппарата.
2. Разработать математическую модель движения беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях, ориентированную на построение системы автоматического управления его автономным движением.
3. Разработать ситуационный алгоритм формирования гладкой траектории полета беспилотного летательного аппарата к заданной цели и обратно.
4. Разработать систему автоматического управления автономным движением беспилотного летательного аппарата по сформированной целевой траектории безопасного маршрута.
5. Выполнить компьютерное моделирование синтезированной автоматической системы управления автономным целевым движением беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях для исследования качества управления движением.
6. Разработать предложения по составу технических средств оснащения беспилотного летательного аппарата с целью выполнения задач сбора и передачи данных об обстановке в аварийной горной выработке.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы теоретической механики, теории автоматического управления, теории графов, теории интеллектуальных систем, методы компьютерного моделирования.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертационной работе научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлены корректным использованием теории автоматического управления, применяемого математического аппарата и методов моделирования сложных систем.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Структура автоматизированной системы информационной поддержки работы горноспасательных частей, обеспечивающая получение информации об аварийной обстановке в горной выработке после возникновения в ней различных видов аварий за счет использования беспилотных летательных аппаратов.

2. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата, построенная на основе метода кватернионов, использованная как объект управления, позволяет синтезировать систему автоматического управления движением с учетом пространственных ограничений аварийной выработки и ряда шахтных возмущений.

3. Интеллектуальная процедура оперативного формирования маршрута в соответствии с целевым заданием обеспечивает построение кратчайшей гладкой траектории для безопасного движения беспилотного летательного аппарата в шахтных выработках.

4. Система автоматического управления беспилотным летательным аппаратом позволяет выполнять с заданным качеством автономное движение по целевому маршруту, прокладываемому к аварийной выработке и обратно.

**Научная новизна исследования** состоит в том, что впервые для оценки поставарийного состава рудничной атмосферы в угольной шахте предложено использование автоматически управляемых беспилотных летательных аппаратов, оснащенных средствами сбора и передачи данных, выполняющих автономное или частично-автономное движение в шахте по рассчитанному целевому маршруту.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что полученные научные результаты позволяют разработать техническое задание на создание системы автоматизированного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных системой управления автономным движением по целевому маршруту, с аппаратным обеспечением, которое позволяет выполнить сбор и передачу данных, необходимых для ВГСЧ, чтобы иметь более полную и достоверную информацию об аварийной обстановке в горных выработках.

**Реализация результатов работы.** Разработанная автоматическая система управления автономным движением беспилотного летательного аппарата и оснащение БПЛА для сбора и передачи данных, составили основу проекта ООО «Финко» (Группа компаний «Беспилотные Системы», г. Ижевск – ГКБС) на создание специализированных беспилотных летательных аппаратов, ориентированных на использование их в угольных шахтах АО «СУЭК».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на:

1. Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» 2011-2014гг. Московского государственного горного университета (МГГУ).
2. Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» 2015-2018гг. Национального исследовательского технологического университета (МИСиС).

3. Совместном семинаре кафедр Автоматические системы и Проблемы управления Института кибернетики Российского технологического университета – МИРЭА, 2017 г.
4. Объединенном семинаре по робототехническим системам Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана и МИНОТ РГГУ, 2017, Москва.
5. Международной научно-практической конференции «Современные методы решения задач управления, автоматизации и переработки информации, 2018», Алушта, Республика Крым.
6. Международной конференции «Развитие транспортных средств и систем 2018», Волгоград, Россия.
7. Научном семинаре «Проблемы управления автономными робототехническими комплексами» Института проблем управления им. В.А Трапезникова РАН, 2019, Москва.

**Соответствие шифру специальности.** Работа соответствует шифру специальности 05.13.06 и охватывает следующие области исследований, входящие в специальность: п. 4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация; п. 15. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, представленные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе его научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

**Публикации:** Результаты диссертационных исследований нашли отражение в 10 научных трудах, в том числе 7 публикаций в изданиях из перечня ВАК РФ.

**Структура, объем и краткая характеристика содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Объем работы составляет 128 печатных страницы (включая 26 страниц приложений), 45 рисунков, 8 таблиц, библиографический список из 113 наименований.

**В первой главе** проведен анализ существующих подходов к исследованию роботизированных и автономных мобильных устройств для работы в различных агрессивных средах: на поверхности земли (колесные и гусеничные), в водной и воздушной средах. Более детально рассмотрены примеры решения различных функциональных задач с использованием БПЛА. Основное внимание уделено возможности использования БПЛА в горнодобывающей промышленности.

Характерная для БПЛА скорость и маневренность перемещения в пространстве позволяют сделать вывод о более перспективном их применении при ведении горноспасательных работ и обследовании горных выработок шахт.

**Вторая глава** посвящена вопросам поставарийного мониторинга состава рудничной атмосферы, состояния шахтных выработок, наличия пострадавших, наличия очагов горения на пути взрывной волны, а также за пределами аварийного участка. Представлена концепция автоматизированного информационного обеспечения горноспасательной службы с использованием робототехнических комплексов (РТК). Ввиду наибольшей проработанности вопросов эксплуатации и управления БПЛА относительно других видов робототехнических устройств, в исследовании рассмотрены вопросы именно их применения, при этом существуют технические проблемы, затрудняющие их применение (РВ-исполнение, использование в среде с плотностью, существенно отличной от воздуха – на 30-40 %). Определены шахтные условия эксплуатации БПЛА. В главе представлена

разработанная структура автоматизированной системы поддержки военизированных горноспасательных частей с использованием беспилотного летательного аппарата.

**Третья глава** посвящена разработке автоматической системы управления автономным маршрутным движением БПЛА по сформированному маршруту в выработках угольной шахты. Сформирована математическая модель движения БПЛА с использованием кватернионного подхода в шахтных условиях как объект управления в системе автоматического управления.

Выполнен, на основе методов классической теории автоматического управления, синтез алгоритма управления движением БПЛА по сформированной гладкой траектории выбранного кратчайшего маршрута.

**В четвертой главе** для проверки работоспособности системы и качества процессов управления движением по расчетной траектории маршрута в шахтных условиях выполнено моделирование процесса автоматически управляемого движения беспилотного летательного аппарата. В главе проведено исследование влияния различных возмущений в виде шахтных потоков воздуха, вариации массы полезной нагрузки и различных параметров движения на работоспособность алгоритма управления БПЛА.

**Пятая глава** посвящена результатам анализа средств аппаратного обеспечения автоматизированной системы шахтного робототехнического летательного аппарата. Представлены материалы экспериментальных исследований отдельных элементов аппаратного обеспечения летательного аппарата, в частности, энергетических характеристик навесного оборудования БПЛА и видеокамер в условиях шахты «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс», шахты «им. А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс». В главе рассмотрены дальнейшие перспективы развития системы шахтного мониторинга горных выработок с использованием БПЛА как в поставарийном, так и в штатном режимах.

В заключении резюмируются основные результаты диссертационного исследования.

В Приложениях диссертационного исследования представлены:

- особенности и технические характеристики специальных робототехнических средств;
- список программных модулей, используемых при моделировании;
- документы актуальности внедрения результатов диссертационного исследования.

## **ГЛАВА 1. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ВОЗМОЖНЫЕ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

### **1.1. Аспекты поставарийного мониторинга состояния шахтных выработок и ведения аварийно-спасательных работ**

На территории Российской Федерации во время возникновения аварийной ситуации в шахте, задачами ликвидации и спасением застигнутых аварией людей занимаются подразделения военизированных горноспасательных частей МЧС России (ВГСЧ). Представленные подразделения территориально расположены в 32 субъектах Российской Федерации и состоят из 17 военизированных горноспасательных отрядов (ВГСО), в составе которых действуют 42 военизированных горноспасательных взвода (ВГСВ) и 24 военизированных горноспасательных пункта (ВГСП). Количество горноспасательных отделений, оснащенных специальной техникой и оборудованием составляет 310. Для оказания помощи пострадавшим работникам обслуживаемых предприятий функционируют 9 медицинских бригад экстренного реагирования (МБЭР). Для выполнения анализов проб шахтного воздуха, воды и материалов, применяемых при ведении аварийно-спасательных работ, в состав военизированных горноспасательных частей входят 30 контрольно-испытательных лабораторий, и 8 служб депрессионных съемок для выполнения депрессионных тепловых съемок на подземных объектах ведения горных работ [50]. В соответствии с приказом МЧС России № 677 от 23.12.2010 «О мероприятиях по совершенствованию деятельности ВГСЧ МЧС России», в ведении МЧС России находятся 3 организации ВГСЧ центрального подчинения:

- Федеральное государственное унитарное предприятие «Военизированная горноспасательная часть»;
- Федеральное государственное казенное учреждение «Управление военизированных горноспасательных частей в строительстве.

– Федеральное государственное казенное учреждение дополнительного профессионального образования «Национальный аэромобильный спасательный учебно-тренировочный центр подготовки горноспасателей и шахтеров» (ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»).

## **1.2. Робототехнические средства, возможные к использованию в угольных шахтах со средней водообильностью**

На сегодняшний день в России и за рубежом практически отсутствуют робототехнические системы и комплексы, способные полноценно выполнять поисковые операции и заниматься ликвидацией аварии. Для решения различных функциональных задач в части горнопромышленного мониторинга постоянно увеличивается использование робототехнических средств в том числе летательных [3; 59; 60; 80]. Несколько иллюстрацией этому факту служат примеры достаточно эффективных средств, представленных в Приложении П.1, для повышения безопасности и эффективности ведения горноспасательных работ. Например, мобильный РТК (робототехнический комплекс) МРК-27Х, представленный на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Мобильный РТК МРК-27Х

РТК предназначен для выполнения специальных задач в условиях химического загрязнения и проведения аварийно-спасательных работ, инструмен-

тальной разведки, определения уровней загрязнения воздуха, отбора проб грунта, воды, а также выполнения технологических операций по локализации источников загрязнения [49]. У представленного РТК имеется гусеничное шасси с изменяемой геометрией и электромеханической трансмиссией. Масса РТК 190 кг, на борту установлены видеокамеры для теленаблюдения, манипулятор, грузоподъемностью до 45кг, время работы робототехнического комплекса составляет 4 часа, при этом передвижение происходит со скоростью 0,65 м/с.

В настоящее время существует достаточно много видов дистанционно управляемых гусеничных роботов. Рассмотрим два из них, способных в той или иной мере выполнять функции разведки в подземных условиях: *Gemini-Scout Mine Rescue* [108] и *Tamiya* [74], которые представлены на рисунках 1.2 а, б.



а



б

Рисунок 1.2. Мобильные роботы *Gemini-Scout Mine Rescue* и *Tamiya*

Робот *Tamiya* может перемещаться по очень сложным поверхностям за счет трех пар колес, также у него имеется возможность преодоления препятствий, которые непреодолимы для других робототехнических устройств. При дистанционном управлении в реальных спасательных операциях имеется возможность подбирать и перемещать объекты.

Робот *Gemini-Scout* имеет возможность преодоления различных препятствия, а также возможность перемещения по различному ландшафту как: щебень, вода, грязь и даже железнодорожные пути. Робот полностью оборудован

камерами и датчиками, позволяющими получать обратную связь об условиях окружающей среды и структурных условиях, и может использоваться в качестве устройства двусторонней связи с застигнутыми аварией шахтерами, предоставляя критически важную информацию для спасения и проведения эвакуации. Робот спроектирован во взрывобезопасном исполнении.

При тушении шахтных пожаров возможен к применению робот *Anna Konda* [110], представленный на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. Робот *Anna Konda*

Длина робота-шланга составляет 3 м, вес-70 кг. Робот подключается к традиционному пожарному шлангу и перемещается с ним на «хвосте» до труднодоступных мест в горящей выработке, имеется возможность преодоления небольших завалов, перемещение в аварийные выработки, доставка респираторов шахтерам, к которым отсутствует доступ.

РТК на колесном шасси [95], представленные на рисунке 1.4, имеет колесно – шагающую ходовую систему с приводами на каждом колесе. На борту РТК установлен манипулятор с шестью степенями свободы. Управление комплексом и передача сенсорной информации осуществляется дистанционно по оптоволоконному кабелю.



Рисунок 1.4. Робототехнический комплекс на колесном шасси

РТК на гусеничном шасси [39], представленный на рисунке 1.5, имеет четырехгусеничную систему шасси, которая способна осуществлять независимые ротационные движения.

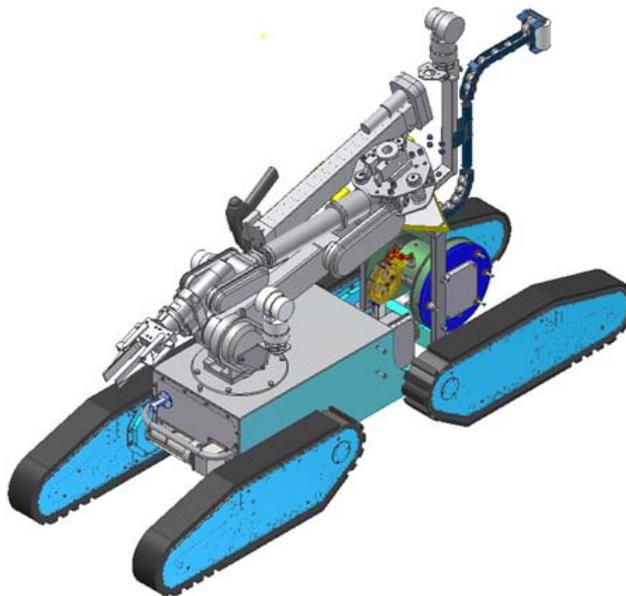


Рисунок 1.5. РТК на гусеничном шасси

На борту РТК установлен манипулятор с шестью степенями свободы. Управление комплексом и передача сенсорной информации осуществляется дистанционно по оптоволоконному кабелю.

Шахтный РТК на колесном шасси [39], представленный на рисунке 1.6, имеет «сочлененно-ломающуюся» схему шасси с индивидуальным приводом колес.



Рисунок 1.6. Шахтный робототехнический комплекс на колесном шасси

Комплекс располагает универсальным интерфейсным модулем для подключения навесного электромеханического оборудования. Управление комплексом и передача сенсорной информации осуществляется дистанционно по оптоволоконному кабелю. Комплекс спроектирован во взрывобезопасном исполнении.

Мобильный малогабаритный робот «ЮЛА-Н» [81], представленный на рисунке 1.7, предназначен для проведения дистанционного аудио-видео наблюдения в условиях городской и промышленной инфраструктуры.



Рисунок 1.7. Мобильный малогабаритный робот «ЮЛА-Н»

Представленный РТК имеет возможность перемещаться по воде, малогабаритен, имеет небольшой вес. Робот предназначен для доставки полезного гру-

за и проведения дистанционного аудио-видео наблюдения в условиях городской и промышленной инфраструктуры.

На рисунке 1.8 представлен шестигусеничный РТК мини класса [39]. Конструкция РТК позволяет выполнять независимые ротационные движения каждого сочленения, что дает возможность преодолевать различные препятствия при проведении аварийно-спасательных работ.



Рисунок 1.8. Шестигусеничный РТК мини класса

Представленный на рисунке 1.9 РТК «ЗМЕЕЛОК-2» [79] конструктивно имеет возможность перемещения по сложным поверхностям, а также, ввиду наличия видеокамер, выполняет аудио-видео наблюдение в труднодоступных для человека местах.



Рисунок 1.9. РТК «ЗМЕЕЛОК-2»

Для выполнения различных задач инженерной и химической разведки, выполнения маркшейдерской съемки, обнаружения пострадавших от аварии людей существует дистанционно управляемая робототехническая система «ДУС» [113], представленная на рисунке 1.10 «ДУС» обладает высокой скоростью перемещения, конструкция системы позволяет преодолевать всевозможные препятствия, возникающие при проведении аварийно-спасательных работ.

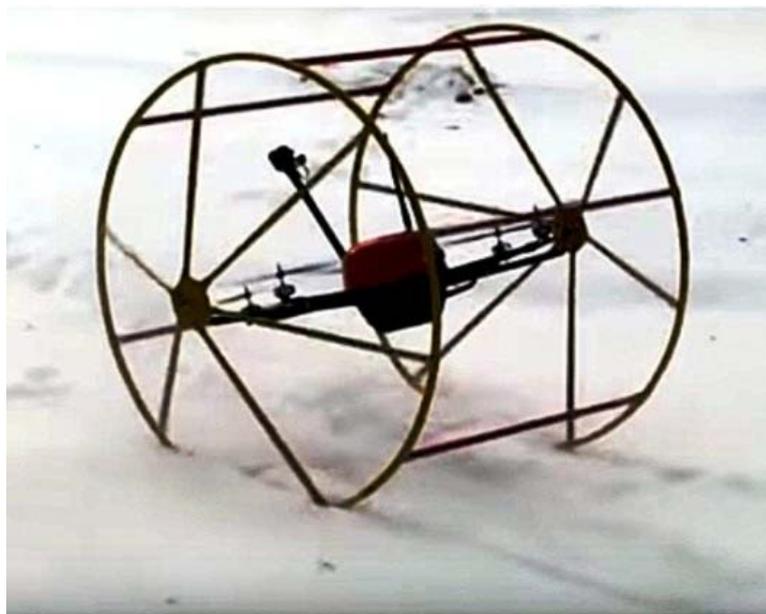


Рисунок 1.10. Дистанционно управляемая робототехническая система «ДУС»

### **1.3. Робототехнические средства, возможные к использованию в затопленных выработках угольных шахт**

Для выполнения задач под водой существуют различные автономные и телеуправляемые робототехнические средства. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) управляются оператором по кабелю, по нему же происходит и передача информации. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) перемещаются по заложенному изначально маршруту, передача информации при этом происходит после выполнения погружения [46].

ТНПА «Марлин-350», представленный на рисунке 1.11, предназначен для поиска подводных объектов и проведения аварийно-спасательных работ в прибрежных или внутренних водах на глубинах до 350 метров [47].



Рисунок 1.11. ТНПА «Марлин-350»

Малый автономный необитаемый подводный аппарат амфибия (АНПА-амфибия) конструктивно спроектированный для перемещения под водой, по водной поверхности и по суше, представлен на рисунке 1.12 [47].



Рисунок 1.12. АНПА-амфибия

Робот предназначен для проведения автоматического мониторинга исследуемых районов суши и акватории, а также для проведения аварийно-спасательных работ на суше и в водной среде.

В состав робота входят:

- процессор интеллектуального управления;
- силовые блоки двигателей;
- блок силового управления;
- подсистема погружения-всплытия.

#### **1.4. Летательные робототехнические средства, возможные к использованию в угольных шахтах**

Все чаще в различных сферах человеческой деятельности стали использоваться беспилотные летательные аппараты. Основная тенденция в решении задач горнопромышленного мониторинга – использование технологий БПЛА для контроля за развитием опасных природных процессов с целью обеспечения безопасности и минимизации риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также для аэровизуального наблюдения за техническим состоянием различной горнопромышленной инфраструктуры.

Использование беспилотных летательных аппаратов при ведении горно-спасательных работ и выполнении задач по обследованию горных выработок, согласно [30; 32; 33] обладает перспективой.

В настоящее время крупнейшие мировые нефтегазовые компании, такие как: *Shell*, *BP*, «Роснефть» «Газпромнефть» существенно продвинулись в области развития технологий с применением беспилотных летательных аппаратов, которые используются для оценки состояния нефтегазовой инфраструктуры, проведения начальной геологической разведки. Главная ценность развития таких заключается в инновационных программах по распознаванию и обработки данных, полученных с БПЛА. За один час подобные БПЛА способны облететь более 70 км коридоров трубопроводов. Ниже рассмотрены наиболее перспек-

тивные разработки радиоуправляемых БПЛА, способных с помощью человека-оператора перемещаться в ограниченных и замкнутых пространствах.

БПЛА *Elios* [62], представленный на рисунке 1.13, предназначен для обследования опасных зон и работы в ограниченных пространствах.



Рисунок 1.13. БПЛА *Elios*

БПЛА имеет видеочкамеру *HD 1080*, 30 кадров в секунду, инфракрасную камеру *FLIR 160x120*. Конструктивно БПЛА помещен в сферическую ударопрочную защитную решетку.

На рисунке 1.14 представлен БПЛА *TILL Ranger* [94], который способен ориентироваться в пространстве, конструктивно летать и передвигаться под землей



Рисунок 1.14. БПЛА *TILL Ranger*.

Предназначение БПЛА – 3D сканирование замкнутых пространств, который с помощью системы лазерных сканеров способен вычислять расстояния до окружающих предметов и оперативно создавать цифровую карту ближней местности.

Представленный на рисунке 1.15 БПЛА *Mavic Air* [92] также предназначен для инспекции опасных зон и обследования ограниченных пространств. На борту БПЛА установлена видеочкамера с трехосевым стабилизатором, предусмотрены амортизаторы подвеса для гашения вибрации. БПЛА имеет сенсоры для обнаружения препятствий во фронтальной плоскости, снизу и сзади.



Рисунок 1.15. БПЛА *Mavic Air*

Скорость обнаружения препятствий не более 8 м/с, дальность обнаружения препятствий от полуметра до 12 м. Поле обзора БПЛА *Mavic Air* составляет  $\pm 50^\circ$  в горизонтальной плоскости и  $\pm 19^\circ$  в вертикальной плоскости. Режим записи видео – 4К со скоростью 30 кадров/с при 100 Мбит/с, дальность передачи сигнала на открытом пространстве до 4000 м.

### **Выводы по главе 1**

Проведен анализ существующих, и возможных к применению в угольных шахтах робототехнических средств, предназначенных для ведения спасательных и разведывательных операций в различных агрессивных средах: на поверхности

земли (колесные и гусеничные), в водной и воздушной средах. Показана эффективность использования беспилотного летательного аппарата как робототехнического средства для решения разведывательных задач. Характерная для БПЛА скорость и маневренность перемещения в пространстве позволяют сделать вывод о более перспективном их применении при ведении горноспасательных работ и обследовании горных выработок шахт.

Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в горной промышленности, как показано в Приложении П.3., обусловлены заинтересованностью Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ, Министерства энергетики РФ, а также ведущими горнодобывающими компаниями и организациями не только в дистанционном обследовании подземных и открытых горных работ, а также для решения задач обследования выработанного пространства при подземной разработке месторождений, глубоких карьеров при инверсионных состояниях атмосферы, для работы на горящих отвалах и при проведении маркшейдерских замеров.

## **ГЛАВА 2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВГСЧ**

### **2.1. Предпосылки автоматизированного информационного обеспечения горноспасательной службы с использованием РТК**

Авария на шахте – это неуправляемое событие, которое нарушает ход технологического процесса, создает угрозу жизни и здоровью персонала, вызывает материальные потери. Причины возникновения шахтных аварий можно разделить на 2 типа: природные и техногенные. Природные аварии возникают вследствие непредсказуемых обрушений, взрывов, прорывов воды, самовозгораний горной массы, внезапных выбросов горных пород и газа. Техногенные аварии возникают вследствие нарушения технологического процесса – устраняются при ремонтных работах и, как правило, не требуют вмешательства сотрудников ВГСЧ, за исключением случаев, связанных со спасением людей в условиях непригодной для дыхания атмосферы. Шахтные пожары возникают либо от внешнего источника, либо от самонагревания и самовозгорания угля. Условия самовозгорания создаются при ведении горных работ, когда к скоплениям разрыхленных пород, склонных к возгоранию, поступает приток воздуха. Распространение пожара в выработке происходит навстречу вентиляционному потоку по схеме «нагрев – подготовка к горению – возгорание – горение». С повышением температуры в выработке происходит увеличение тепловой депрессии, вследствие чего происходит подсос воздуха в участок пожара.

Одним из способов изоляции самовозгорающихся углей при подземной разработке, является установка изолирующих перемычек, которые снижают содержание кислорода в воздухе изолированных выработок и предотвращают перекидывание пожара в соседние выработки [4].

В газовых шахтах, где скорость накопления метана до взрывчатой концентрации выше скорости снижения содержания кислорода до 12%, сначала устанавливают баррикадные перемычки для защиты персонала от взрывов метана, а затем устанавливают изолирующие перемычки, тем самым образуя взры-

воустойчивую перемычку. Тушение пожаров в таких шахтах, как правило, осложняется взрывом угольной пыли и метана.

Ответственным руководителем по ведению аварийно-спасательных работ является главный инженер шахты, а до его прибытия – горный диспетчер шахты. Руководителем горноспасательных работ является командир взвода, обслуживающего шахту. Спуск в шахту тщательно готовится: перед сотрудниками отделения ВГСЧ ставятся ясные, конкретные задачи с правильным учетом сложившейся в шахте обстановки. От тщательности, ясности поставленных задач, наличия достоверной информации об аварийной обстановке, продуманности подготовки к спуску в шахту, зависит результат действий ВГСЧ.

На основании анализа всех факторов риска для жизни и здоровья горноспасателей, принимается решение о посылке отделений в разведку для уточнения обстановки и на ликвидацию аварии. Работы по ликвидации аварии допускаются при обеспечении максимально возможных мер предотвращения вреда и жизни здоровью горноспасателей. Если есть угроза жизни и здоровью горноспасателей при выполнении работ, не связанных со спасением людей, то работы прекращаются, при этом необходимость постоянного мониторинга за газовыделением остается.

При выполнении аварийно-спасательных работ, одной из основных задач является поиск точки возникновения аварии. В настоящее время существуют программные средства, позволяющие на основе расчета распределения воздушных потоков в шахтной вентиляционной системе в аварийных ситуациях, а также при нормальных технологических процессах дать достаточно точный ответ о месте возникновения аварии. Программные средства позволяют:

- выполнять расчеты вариантов управления воздушными потоками для обеспечения аэрологической безопасности в ходе ведения аварийно-спасательных работ;
- выполнять проверку эффективности принятых в Плане ликвидации аварий (ПЛА) вентиляционных режимов;

- выполнять расчеты устойчивости проветривания подземных выработок при пожаре с учетом прогрева по пути их следования, с одновременным расчетом их остывания;
- определять рациональные пути выхода в безопасную зону людей, застигнутых аварией, и маршруты движения аварийно-спасательных формирований с учетом фактического распространения продуктов горения по сети горных выработок шахты.

Все перечисленные функции, тем не менее, не могут гарантировать безопасность проведения аварийно-спасательных работ службы ВГСЧ в местах, подвергшихся аварией, поскольку сотрудники ВГСЧ не располагают информацией о реальной картине разрушения и характеристиках состояния горных выработок. При возникновении различных видов аварий в шахте, взрывах, пожарах или обвалах, когда обрушены установленные сети передачи данных от датчиков, горный диспетчер не имеет полной информации о составе рудничной атмосферы на месте аварии, поэтому для задействования одного из видов плана ликвидации аварии диспетчеру необходимо быстро и качественно получить информацию о происшествии. Решение задач разведки и мониторинга состояния шахтных выработок и состава рудничной атмосферы после аварии возлагается на службу ВГСЧ. Среди оперативных заданий, выполняемых отделением ВГСЧ в загазованной атмосфере, информационная разведка горных выработок, где произошла авария, является наиболее важной, ответственной и первоочередной задачей.

Разведка аварии организуется как для спасения людей, так и для выяснения обстановки в горных выработках в связи с возникшей аварией. Цель разведки может быть различной и зависит от характера аварии, ожидаемых ее последствий, количества людей, нуждающихся в помощи [68; 69].

Выполним моделирование действий ВГСЧ по решению задач мониторинга состояния шахтных выработок и состава рудничной атмосферы после аварии в условиях шахты «им. В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс». Горному диспетчеру шахты поступила информация, что в путевом стволе шахты задым-

ление. Горный диспетчер вводит в действие план ликвидации аварии по виду аварии «Пожар» и вызывает ВГСЧ.

По результатам телефонного обзвона было выявлено, что без связи остался конвейерный штрек и сбойка между стволами, а также то, что кроме дыма ощущались еще и толчки. На основании этих данных сделано предположение, что в одной из этих выработок произошел взрыв. Прибывшие на шахту сотрудники ВГСЧ приступили к спуску по вентиляционному стволу, который можно видеть на схеме шахтных выработок, изображенных на рисунке 2.1.

Двигаясь по стволу сотрудники ВГСЧ обнаружили завал в районе сбойки, поэтому они осуществили переход по сбойке в конвейерный ствол. Спустившись по конвейерному стволу, отделения по сбойке перешли на путевой ствол. Далее отделение ВГСЧ приступило к спуску по путевому стволу.



Рисунок 2.1. Фрагмент плана горных выработок шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс».

Спустившись по путевому стволу до конвейерного штрека, прошли 200 метров в сторону тупика. Выполненные измерения показали, что содержание метана в выработке превышает 6%, кислорода меньше 13%, концентрация угарного газа превышает 3%, температура приближается к 30 градусам, видимость нулевая. Взрывоопасные условия атмосферы в аварийной выработке явились основанием для принятия руководством ВГСЧ решения, что для сохранения жизни сотрудников ВГСЧ, дальнейшее обследование выработки должно быть прекращено и сотрудники отделения ВГСЧ должны быть выведены на поверхность.

Задачи мониторинга и обследования оказались не решенными. Данные задачи возможно было бы решить, если бы служба ВГСЧ располагала мобильным робототехническим комплексом (РТК). Остановившись у сбойки между вентиляционным стволом ОПП и конвейерным стволом ОПП целесообразно было запустить РТК в сторону очага взрыва с целью анализа скорости повышения температуры и концентрации газа в выработках шахты.

На рисунке 2.2 представлен результат моделирования пожара в выработке в условиях шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс» в программе «Вентиляция» [56; 82].

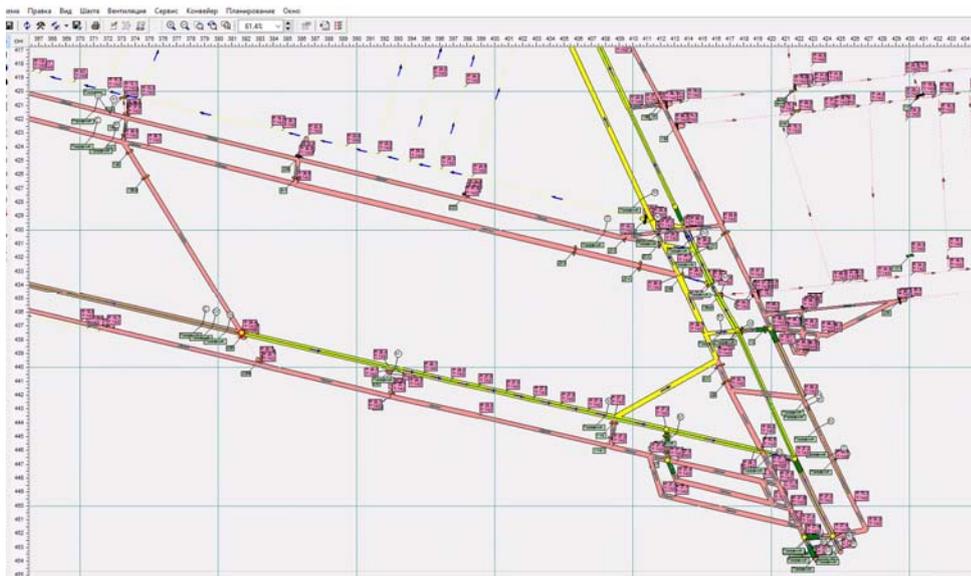


Рисунок 2.2. Результаты моделирования пожара в программе «Вентиляция»

Моделирование пожара в программе «Вентиляция» позволило определить направление и скорость распространения дыма и температуры по выработкам шахты.

## **2.2. Структура автоматизированной информационной поддержки горноспасательной службы с использованием РТК**

Автоматизированная система информационной поддержки горноспасательной службы с использованием РТК состоит из трех подсистем: доставки, измерения и передачи данных. Подсистема доставки средств до места назначения для видео-мониторинга состояния горных выработок и измерения состава рудничной атмосферы потенциально может использовать робототехнические средства на колесных или гусеничных шасси, однако, предпочтение отдается летательным аппаратам, в силу их лучшей оперативности, маневренности и лучшей возможностью обходить и преодолевать препятствия в виде завалов – следствия горных вывалов, взрывов и пожаров [63]. Информационная поддержка обусловлена получением информации о состоянии аварийной горной выработки, составе рудничной атмосферы, наличия пострадавших, наличия очагов горения при проведении аварийно-спасательных работ.

Анализ приведенного сценария использования РТК в виде беспилотного летательного аппарата в операционном окружении и условиях аварийной шахты, позволяет сделать основной вывод о целесообразности использования для целей информационного обеспечения служб ликвидации последствий аварии на угольных шахтах дистанционно и автономно управляемых летательных аппаратов, способных доставить в пределы разрушенной выработки средства для визуализации состояния выработки и измерения состава рудничной атмосферы.

Анализ литературных источников по эксплуатации БПЛА показал, что достаточно много научных трудов посвящено системам управления движением одиночного и группы БПЛА. Так в США известны труды аэрокосмической лаборатории Массачусетского технологического института [87], университета Пенсильвании [97; 101], Центрального Южного Университета КНР [111], техни-

ческого университета Дании [86], у нас в России – Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана [22; 23], Российского технологического университета-МИРЭА [41; 42; 43], Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН [37; 55] и др.

Для решения главной задачи – обеспечение сотрудников ВГСЧ информацией о составе рудничной атмосферы, физическом состоянии аварийных горных выработок и, возможно, живых или раненых людей, требуется, чтобы беспилотный летательный аппарат имел возможность выполнять автоматическое автономное движение по заданному маршруту к месту возникновения аварии в пределах допустимых конструкцией БПЛА температур. Такую возможность предоставляет система автоматического управления. Оценку эксплуатационных параметров и качество автономного движения БПЛА можно получить путем модельных исследований системы управления движением БПЛА по заданному маршруту в стесненном пространстве горных выработок при наличии возмущений в виде шахтных потоков воздуха и изменения температуры. Эти модельные испытания входят в число задач диссертационного исследования.

Основная задача, решаемая автоматизированной системой с помощью БПЛА, состоит в том, чтобы обеспечить службу ВГСЧ информацией, получаемой с помощью управляемого БПЛА, нагруженного датчиками, видеосредствами и другими атрибутами, необходимыми для определения газовых и температурных характеристик атмосферы выработок.

Шахтные условия характеризуются [13; 34; 38; 44; 45; 54; 84]:

1. Стесненностью и ограниченностью пространства подземных выработок:
  - 1.1. Диаметр клетьевых стволов не более 3 – 9 м.
  - 1.2. Сечение вентиляционных, путевых и конвейерных стволов не более 20 м<sup>2</sup>.
  - 1.3. Наличие технологических выступающих неровностей поверхности до 15 см.
2. Удаленностью объектов:

- 2.1. Максимальные расстояния свободного пути до забоя от горизонта шахтных стволов достигают 4000 м.
3. Сложностью маршрута:
  - 3.1. Число мест изменения направления пути от горизонта клетевых или вентиляционных шахтных стволов до забоя лежит в пределах от 2 до 10.
  - 3.2. Расстояния прямой видимости в штреках составляет около 50 м.
4. Наличием переменного по направлению и мощности свежего и исходящего воздушных потоков, скорости которых могут достигать величины 4 – 10 м/с.
5. Широким диапазоном изменения температуры воздуха и поверхности горных выработок вне аварийных выработок 10 – 15 °С.
6. Сложным химическим составом шахтной атмосферы, содержащей кислород, азот, углекислый газ, пары воды, окись углерода, оксиды азота, сернистый ангидрид, сероводород, акролеин, альдегиды, метан, водород и радиоактивные газы.
7. Изменчивостью давления шахтной атмосферы до 450 Па, влажностью до 60% для шахт, склонных к самовозгоранию.
8. Количеством пыли от 10 до 150 мг/м<sup>3</sup>.
9. Выделенными радиочастотами и специальными протоколами передачи данных и голосовой радиосвязи.

Представленные выше особенности шахтных условий следует учитывать при решении задач формирования автоматизированной системы информационной поддержки службы ВГСЧ на базе БПЛА.

На рисунке 2.3 представлена структура автоматизированной системы информационной поддержки горноспасательных частей с использованием РТК. Иерархическая структура системы содержит три уровня: на нижнем уровне происходит измерение параметров и характеристик состава рудничной атмосферы с помощью расположенных на борту робототехнического комплекса датчиков и чувствительных элементов, видеосъемка обстановки разрушений в горной вы-

работке производится с помощью видеокамеры. На втором уровне осуществляется преобразование данных, полученных на нижнем уровне, с помощью достаточно мощного вычислительного процессора, расположенного на борту РТК. Преобразованные данные, характеризующие обстановку в поставарийной выработке, состав рудничной атмосферы, аэродинамические условия, наличие или отсутствие живых людей передаются по шахтной системе передачи данных на верхний – третий уровень в систему мониторинга, где осуществляется оперативный анализ и интерпретация данных, получаемых с РТК, а также сохранение информации в базе данных. Потребителем этой информации является горный диспетчер шахты и ответственный руководитель ликвидации аварии, которые принимают решения о дальнейших действиях сотрудников горноспасательной службы. Руководитель горноспасательных работ может получать информацию напрямую со второго уровня, на котором осуществляется преобразование данных.

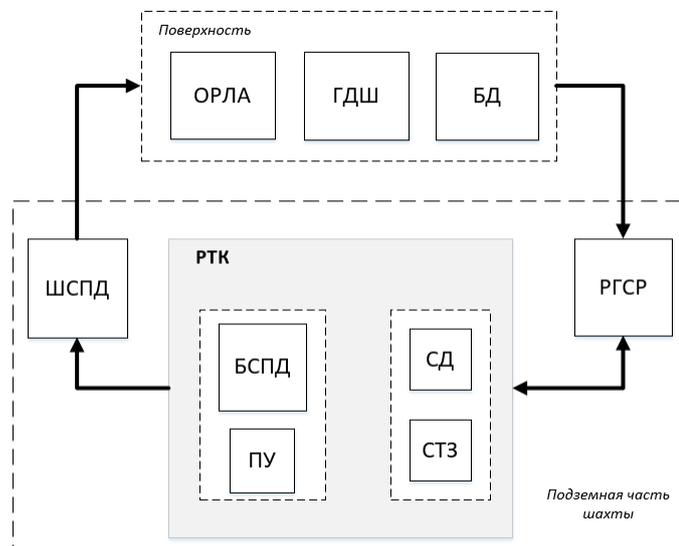


Рисунок 2.3. Структура автоматизированной системы информационной поддержки ВГСЧ с использованием РТК

Здесь ОРЛА – ответственный руководитель ликвидации аварии;

ГДШ – горный диспетчер шахты;

БД – база данных;

РГСР – руководитель горноспасательных работ;

ШСПД – шахтная система передачи данных;

РТК – робототехнический комплекс;

БСПД – бортовая система передачи данных;

ПУ – процессор управления;

СД – система датчиков;

СТЗ – система технического зрения.

Разработанная структура автоматизированной системы информационной поддержки горноспасательных служб для обследования, оценки состояния горных выработок, измерения параметров и состава рудничной атмосферы после аварии с использованием мобильных робототехнических комплексов приводит к необходимости решения научных задач исследования и практических рекомендаций технических предложений, направленных на создание робототехнических комплексов, способных доставить приборы измерения и видеозаписи поставарийной обстановки в горных выработках. Исходя из проведенного в главе 1 анализа существующих РТК для проведения аварийно-спасательных работ, наиболее перспективным, маневренным и технологичным является РТК в виде роботизированных летательных средств.

Роботизированные летательные средства в шахтных условиях могут выполнить свое предназначение только в том случае, если они вполне управляемы дистанционно или автономно. Для выполнения автономного движения шахтные летательные аппараты должны быть снабжены системой автоматического управления, обладающая достаточной адаптивностью в сложных и неопределенных рудничных условиях.

Для создания автоматической системы управления адаптивным полетом необходимо выполнить последовательную процедуру синтеза:

1. Составить математическую модель движения беспилотного летательного аппарата – БПЛА как объекта управления в стесненных шахтных условиях выработок;
2. Описать модель внешних возмущений в виде шахтного потока воздуха встречного, попутного или бокового;
3. Определить структуру системы и регулятора;
4. Синтезировать алгоритм управления;
5. Составить программу маршрутного движения БПЛА до допустимого аварийными обстоятельствами и конструкцией БПЛА места горной выработки;
6. Предусмотреть возможность изменения программы маршрутного движения в зависимости от сложившейся ситуации по пути следования.
7. Используя программные средства моделирования, выполнить исследовательские испытания моделированием процесса движения и работоспособности предлагаемого ситуационного адаптивного алгоритма управления.

Шахтный летательный аппарат ограничен как энергетически, так и по весовым характеристикам, поэтому задачей настоящего исследования является выбор приборов измерения, чувствительных элементов, средств видеосъемки и вычислительных средств достаточно маловесогабаритных и минимального потребления электроэнергии.

Наличие шахтных газов в угольных шахтах накладывают дополнительные требования к конструкции шахтного БПЛА, в частности, требования искро- и взрывобезопасности. В настоящее время электрическое оборудование БПЛА – двигатели и аккумуляторные батареи относятся к группе I – «оборудование, предназначенное для применения в подземных выработках шахт их наземных строениях, опасных по рудничному газу и (или) горячей пыли» [75; 76].

Развивающиеся технологии по минимизации размеров и повышению энергоэффективности аккумуляторных батарей и бесколлекторных двигателей непременно приведут в ближайшем будущем к тому, что электрическое оборудование БПЛА будут удовлетворять требованиям группы I. На этом основании вопросы изменения конструкции БПЛА для удовлетворения требованиям искро-

и взрывобезопасности группе I не включены в число задач исследований диссертации.

Для решения задач информационной поддержки в части определения состава рудничной атмосферы, получения видеоданных в поставарийной горной выработке следует выполнить анализ разработок существующих приборов, сенсорных средств измерения, связи и передачи данных и вычислительных средств бортового исполнения. Анализ должен содержать сравнительную оценку вариантов технических решений с учетом надежности, безопасности, ремонтпригодности и экономической эффективности.

Завершающей задачей исследования является разработка технических предложений на создание на основе шахтного БПЛА автоматизированной системы для мониторинга и обследования подземных выработок в соответствии с требованиями ГОСТ 2.118-2013, а также информационного обеспечения горноспасательных частей.

## **Выводы по главе 2**

Разработана структура автоматизированной системы информационной поддержки ВГСЧ с использованием РТК для мониторинга поставарийного состояния горных выработок и состава рудничной атмосферы, иерархическая структура которой содержит: уровень измерения параметров и характеристик состава рудничной атмосферы, видеосъемка обстановки разрушений в горной выработке; уровень процессорного преобразования данных, на борту РТК и уровень интерпретации данных, мониторинга, оперативного анализа и руководства аварийно-спасательными работами. В качестве перспективного вида РТК выбран беспилотный летательный аппарат.

Сформулирована последовательность основных задач синтеза системы управления автономным маршрутным движением беспилотного летательного аппарата в стесненных шахтных условиях выработок с учетом внешних возмущений в виде шахтного потока воздуха.

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

За последние десять лет прогресс в материаловедении, электронике, сенсорах и электропитании позволил осуществить создание микро беспилотных летательных аппаратов, способных решать задачи поиска в специальных условиях и в пространствах с нетривиальной геометрической конфигурацией. Средние размеры таких летательных устройств колеблются в диапазонах от 0,1 до 0,8 м, а вес порядка 0,1 – 1,5 кг. Наименьшим массово производимым БПЛА недавно являлся БПЛА проекта *Picoflyer* размером 60мм и весом 3,3 г. Наибольшие представители БПЛА мультироторного типа с возможностью вертикального взлета и посадки достигают размера пять и более метров, весом до и более 600кг.

В настоящей работе создается математическая модель и синтезируется система автоматического управления маршрутным движением четырехмоторного беспилотного летательного аппарата с физическими характеристиками, представленными в таблице 3.1. [32].

Таблица 3.1.  
Физические характеристики БПЛА

Характеристики составляющих БПЛА	Значения
Масса неоснащенного БПЛА	650 г
Масса БПЛА с системами контроля параметров окр.среды	800 г
Полная масса БПЛА с противопожарным обвесом	1200 г
Размеры БПЛА	360x240x120 мм
Максимальная скорость набора/сброса высоты	4 / 3 м/с
Максимальная горизонтальная скорость	20 м/с
Максимальная сила ветра при управляемом полете	6 м/с
Максимальная мощность	330Ватт
Максимальный рабочий ток	20А в течении 30с
Батарея: Вес / емкость	300 г / 4000 мАч
Рабочее напряжение/ Энергоемкость	15,4 В / 62 Ватт*ч
Время полного заряда	90 мин

### 3.1. Формирование математической модели движения БПЛА в шахтных условиях

Математическая модель движения БПЛА, как объект управления, формируется на основе расчетной схемы, изображенной на рисунке 3.1, в которой четырехмоторный беспилотный летательный аппарат рассматривается как твердое тело с известными аэродинамическими свойствами и допущениями [5; 6; 7; 70]:

- БПЛА симметричен относительно осей  $x$  и  $y$ ;
- несущая часть аппарата является твердым телом, рама БПЛА и его винты абсолютно жесткие;
- двигатели располагаются на концах стержней; тяга  $F_i$ , создаваемая  $i$ -м винтом перпендикулярна поверхности каркаса – плоскости  $XOY$ ;
- все двигатели идентичные;
- изменение вектора подъемных сил за счет эффекта биения лопастей незначительно и не учитывается;
- не учитываются ввиду малости гироскопические моменты двигателей и пропеллеров;
- эффект отражения потока воздуха от земли при посадке и взлете незначителен и не учитывается;
- воздействие потока воздуха в выработке учитывается как внешнее возмущение.

БПЛА рассматривается как твердое тело в аффинной системе координат, которая представлена вектором смещения  $\vec{V} = (x, y, z)$  и ортогональной матрицей поворота  $A$ . Пространственное позиционирование БПЛА осуществляется в неподвижной  $W = (O_0, X_0, Y_0, Z_0)$  – инерциальной системе координат, связанной с Землей.

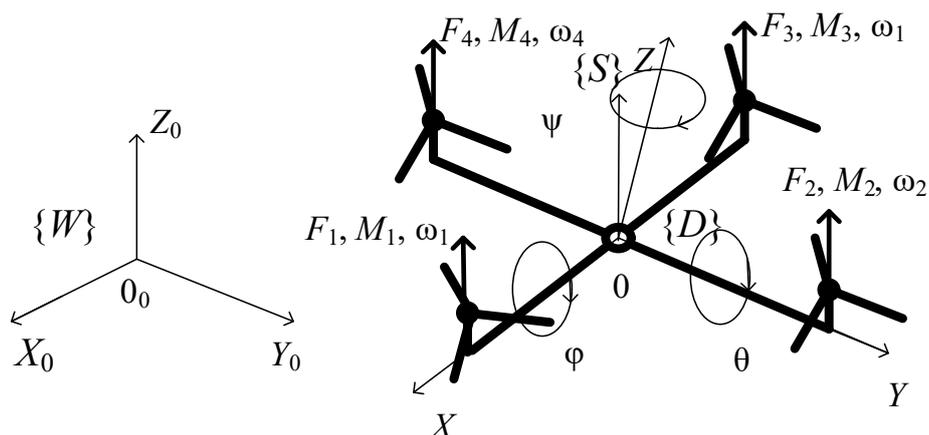


Рисунок 3.1 Расчетная схема БПЛА

Система координат  $W$  привязана к некоторой фиксированной точке шахтных выработок. Система отсчета  $S$ , представлена сдвинутой на вектор  $\vec{V}$  глобальной системы координат, при этом начало координат системы  $S$  совпадает с центром масс БПЛА.

Система координат  $D = \{O, X, Y, Z\}$  – это система с центром в центре масс БПЛА и с осями, направленными вдоль главных осей БПЛА как твердого тела. Эта система координат удобна для моделирования, поскольку в ней тензор инерции представляется диагональной матрицей.

Для описания перемещения БПЛА в пространстве используется координаты  $\{x, y, z\}$  в неподвижной системе координат и в подвижной системе координат углы Эйлера  $\{\varphi, \theta, \psi\}$  – крена, тангажа и рыскания соответственно.

Каждый двигатель БПЛА, вращая вал воздушного винта – пропеллера с частотой  $\omega_i, i = \overline{1,4}$ , создает подъемную силу  $F_i, i = \overline{1,4}$  и моменты сопротивления  $M_i, i = \overline{1,4}$  вращения конструкции.

Описание модели движения твердого тела производится в системе отсчета связанной с телом, а не в глобальной системе [40; 64]. Таким образом, уравнения Эйлера в системе отсчета, связанной с БПЛА, принимают вид [24; 25].

$$\begin{pmatrix} J_1 \dot{\omega}_1 \\ J_2 \dot{\omega}_2 \\ J_3 \dot{\omega}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (J_2 - J_3) \omega_2 \omega_3 + M_1 \\ (J_3 - J_1) \omega_1 \omega_3 + M_2 \\ (J_1 - J_2) \omega_2 \omega_1 + M_3 \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

в котором  $M_i$  – момент сил, действующий на БПЛА вдоль оси  $i$ ,

$\omega_i$  – угловая скорость в вдоль оси  $i$ ,  $i = \overline{1, 4}$ , системе отсчета БПЛА.

Вертикальное перемещение БПЛА осуществляется синхронным изменением скоростей вращения всех пропеллеров, для горизонтального перемещения необходимо наклонять БПЛА, что достигается соответствующим изменением скоростей вращения разных пропеллеров, создающих необходимые для наклона моменты. Для того чтобы скомпенсировать моменты вращения, пара двигателей 1 и 3 вращаются по часовой стрелке, а роторы 2 и 4 – против часовой стрелки. Тем самым моменты, создаваемые парой двигателей 1 и 3, компенсируются моментами второй пары двигателей – 2, 4. Вращение БПЛА производится путем изменения скоростей вращения двигателей.

Для изменения угла крена  $\varphi$  необходимо увеличить угловую скорость вращения двигателя 2 и уменьшить скорость вращения двигателя 4. Аналогичным образом осуществляется изменение тангажа  $\theta$ . Изменения рысканья  $\psi$  производится сложнее: увеличивается скорость вращения двигателей 1,3 и уменьшается скорость вращения 2,4. Изменение угловой скорости пары винтов необходимо для того, чтобы сохранять общую тягу, создаваемую четырьмя винтами неизменной.

БПЛА имеет 6 степеней свободы: три угла ( $\varphi, \theta, \psi$ ) и три ( $x, y, z$ ) координаты центра масс, таким образом, движение БПЛА определяют 12 координат состояния

$$\{T = (x, y, z), Q = (\varphi, \theta, \psi), \dot{T} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}), \dot{Q} = (\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})\}.$$

Положение твердого тела описывается тремя способами: матрицей поворота, углами Эйлера или кватернионами.

Современные методы модельного представления движения твердого тела используют кватернионы, преимуществом которых является компактность: четыре параметра, вместо девяти, когда описание использует матрицы поворота, и в случае описания через углы Эйлера, отсутствие сингулярностей и тригонометрических функций при преобразовании векторов.

Кватернионы поворота представляются четырехмерными векторами единичной длины: такими, что

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1.$$

Кватернион описывает систему отсчета, связанную с БПЛА и задает ортогональное преобразование векторов, которое определяется в виде

$$x = qXq^T,$$

где  $x, X$  представлены чисто мнимыми кватернионами.

Угловая скорость БПЛА в глобальной системе координат и в системе координат, связанной с ним, определяются соотношениями

$$\omega = q^T \tilde{\omega} q, \quad \tilde{\omega} = q \omega q^T, \quad (3.2)$$

где  $\tilde{\omega}$  – мгновенная угловая скорость в системе отсчета  $S$ ,

$\omega$  – мгновенная угловая скорость в системе отсчета БПЛА, которую измеряют датчики угловой скорости, находящиеся на борту БПЛА.

Таким образом, кинематика угловых параметров БПЛА в терминах кватернионов описывается следующим уравнением:

$$\dot{q} = 0,5 \tilde{\omega} q = 0,5 q \omega = 0,5 \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 \\ \omega_1 & 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_3 & \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Поступательную динамику движения твердого тела описываем в глобальной системе координат  $W$ , в которой уравнения движения записываются в координатах вектора  $\vec{V} = (x, y, z)$ . В модели поступательное ускорение БПЛА определяется его положением, скоростью и общей тягой четырех винтов.

На БПЛА действуют подъемные силы  $F_i$  от каждого пропеллера, сила тяжести  $G=mg$ , вязкие силы трения, внешние силы сопротивления движению  $N = (N_x, N_y, N_z)^T$ . Уравнения движения по закону Ньютона для твердого тела в глобальной системе координат принимают вид:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = q \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} q^T + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{fr}x \\ k_{fr}y \\ k_{fr}z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \beta_y \\ \gamma_z \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

где  $m$  – масса летательного аппарата,  $g$  – ускорение свободного падения,  $k_{fr}$  – коэффициент пропорциональности силы вязкого трения,  $a$  – суммарная тяга от четырех винтов,  $[\alpha_x, \beta_y, \gamma_z]^T$  – приведенные силы сопротивления движению,  $\alpha_x = \frac{N_x}{m}$ ,  $\beta_y = \frac{N_y}{m}$ ,  $\gamma_z = \frac{N_z}{m}$ .

Четыре двигателя БПЛА создают аэродинамическую силу, которая согласно формуле Н. Е. Жуковского [1; 11; 71] определяется для каждого  $i$ -го пропеллера в виде

$$F_i = c_F \rho r^2 S \omega_i^2, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3.5)$$

в котором  $\omega_i$  – частота вращения  $i$ -го пропеллера,  $i = \overline{1,4}$ ;  $c_F$  – коэффициент тяги, зависящий от формы пропеллера;  $\rho$  – плотность воздуха;  $r, S$  – соответственно радиус ротора и площадь диска, который образует пропеллер.

При составлении модели движения БПЛА из всех возможных аэродинамических сил, воздействующих на БПЛА, оставлена только сила вязкого трения. Поскольку отношение инерционных сил БПЛА к силам вязкого трения в воздухе, определяющее числа Рейнольдса, обладают очень малыми значениями, то для моделирования силы вязкого трения можно использовать упрощенное соотношение силы трения

$$F_{fr} = -k_{fr} \tilde{S} v, \quad (3.6)$$

где  $\tilde{S}$  – площадь сечения БПЛА по направлению набегающего потока,  $v$  – скорость набегающего потока воздуха.

Главный вектор подъемной силы – суммарный вектор тяги равен

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^4 F_i \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Осевые моменты вращения – проекции главного момента на соответствующие оси подвижной системы координат определяются из выражений

$$\begin{aligned} M_x &= (F_2 - F_4)L, \\ M_y &= (F_3 - F_1)L, \\ M_z &= M_1 + M_3 - M_2 - M_4, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где  $L$  – расстояние между центром масс и осями пропеллеров.

Вектор тяги и осевые моменты являются управляющими воздействиями для формирования движения БПЛА

$$u_1 = F, u_2 = M_x, u_3 = M_y, u_4 = M_z. \quad (3.9)$$

Управляющие воздействия пропорциональны квадрату частоты вращения пропеллеров, которые формируются электроприводами. В приводах пропеллеров БПЛА используются бесщеточные электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения, схема замещения которого показана на рисунке 3.2.

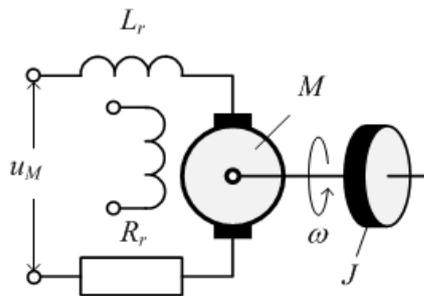


Рисунок 3.2. Схема замещения электропривода пропеллера

Переменными и параметрами модели электродвигателя являются:

$I(t)$  – ток в якорной цепи;

$\omega(t)$  – частота вращения вала двигателя;

$J$  – момент инерции ротора и нагрузки, приведенные к валу двигателя, кгм<sup>2</sup>;

$\xi$  – коэффициент вязкого трения, Нмс;

$k_E$  – коэффициент электродвижущей силы, Вс/рад;

$k_M$  – коэффициент момента, Нм/А;

$R_r$  – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом;

$L_r$  – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн.

В этих условиях и при учете малости вязкого трения в трансмиссии привода, ее математическая модель принимает вид

$$\begin{aligned} u_M &= L_r \dot{I} + R_r I + k_E \omega, \\ J \dot{\omega} &= k_M I, \end{aligned}$$

или в терминах передаточных функций

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{U_M(s)} = \frac{k_M}{JL_r s^2 + JRs + k_M k_E}. \quad (3.10)$$

Неотъемлемой частью математической модели движения БПЛА является модель внешней среды, основными факторами которой является ограниченность в пространственном перемещении БПЛА и внешние возмущающие воздействия. Для реализации пространственных ограничений используется метод штрафных функций в виде экспоненциального «барьера», который задает потенциал, действующий на объект, значение которого в области, где перемещения разрешены равен нулю, а в запретной зоне экспоненциально возрастает в зависимости от дистанции до границы

$$F_c(d) = F_0 (e^{\alpha d^2} - 1),$$

где  $d$  – расстояние от БПЛА до границы запрещенной области,  $\alpha$  – настраиваемый параметр.

При составлении модели движения беспилотного летательного аппарата предполагается, что достаточно точно известно его положение в пространстве. Задачу текущего позиционирования БПЛА можно решить, например, с помощью оптической одометрии, позиционирования по меткам, системы локального позиционирования, основанной на радиометках, позиционирования на аудиометках и *SLAM* – метода [109], используемого в мобильных автономных сред-

ствах для построения карты в неизвестном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.

В шахтных условиях особенно в поставарийной обстановке, когда существенно ухудшается видимость, применение визуальных методов становится невозможным. Позиционирование с использованием ультразвуковой триангуляции также не пригодны для данной задачи, так как шахтные выработки имеют нетривиальную топологию. Основным методом, позволяющим определять текущее положение летательного аппарата, принимается метод позиционирования с использованием радиомаяков путем триангуляции. Этот метод позволяет достичь точности до нескольких сантиметров, что на порядок меньше размера БПЛА. Таким образом, погрешностью измерения положения можно пренебречь и в процессе моделирования использовать точное положение БПЛА.

### **3.2. Разработка структуры системы автоматического управления маршрутным движением БПЛА**

Текущее положение БПЛА в пространстве определяется шестью координатами: три пространственных координаты перемещения центра масс  $(x(t), y(t), z(t))$  в неподвижной системе координат и три угловые координаты  $(\varphi(t), \theta(t), \psi(t))$  в подвижной системе координат. Задаваемая для предстоящего движения БПЛА траектория, формируется как функция времени в естественных переменных

$$r_d(t) = (x_d(t) \quad y_d(t) \quad z_d(t)). \quad (3.11)$$

Задачу синтеза системы автоматического управления движением беспилотного летательного аппарата, согласно [57; 58] предлагается с использованием иерархической многоконтурной системы управления со структурой, представленной на рисунке 3.3

В представленной системе блок 1 – планировщик маршрута, предназначен для того, чтобы в каждый текущий момент времени формировать траекто-

рию задания маршрута до цели и корректировать ее с учетом появления препятствий.

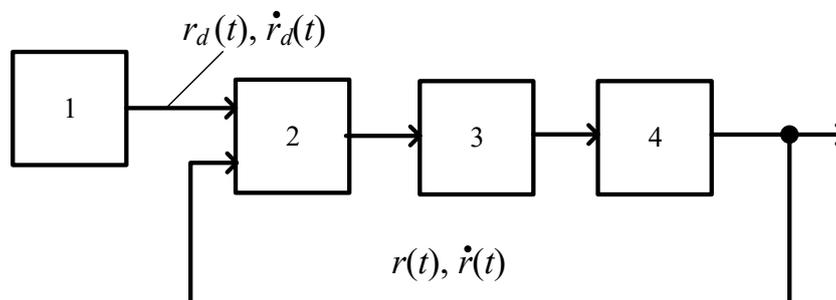


Рисунок 3.3. Структура системы автоматического управления траекторным движением БПЛА

Блок 2 структуры – блок управления положением БПЛА в пространстве контролирует линейные координаты БПЛА с целью удерживать его вдоль спланированной траектории движения.

Блок 3 структуры – блок управления угловым положением БПЛА, позволяет выдерживать требуемые значения кватернионов.

Блок 4 структуры – блок управления моторами, формирует управляющие воздействия на обмотки бесколлекторных двигателей, позволяющий формировать требуемую силу тяги моторов

Каждый блок структуры системы, за исключением блока планировщика, представляется линейным с контуром обратной связи и цифровым *PD* или *PID*-регулятором [96; 102; 107]. Структура системы управления оказывается в некотором смысле подобной структуре системы подчиненного регулирования.

Возникающие в реальных условиях шумы и задержки сигналов в «датчиках» определения угловой ориентации и местоположения в неподвижной системе координат, используемые для формирования обратных связей в системе управления, при моделировании не учитывались [10; 31].

Внешние возмущающие воздействия – силы сопротивления движению, порождаются воздушными потоками, вектор которых может быть направлен

встречно, ортогонально или попутно. В математической модели движения БПЛА эти возмущающие воздействия задаются в виде известных функций времени в правых частях уравнений движения.

Для проверки адекватности математической модели движения беспилотного летательного аппарата как объекта управления и работоспособности алгоритма управления траекторным движением БПЛА [88; 91; 99; 100], выполнялись экспериментальные исследования компьютерным моделированием процесса управления полетом по заданной траектории с учетом пространственных ограничений шахтных выработок и возмущений шахтными воздушными потоками. Экспериментальное компьютерное моделирование выполнялось с использованием специальных программных средств, отмеченных в Приложении П.2.

Для компьютерного моделирования использовались указанные в таблице 3.1 параметры БПЛА, с размахом в 0,36 м, массой 0,65 кг, матрицей осевых моментов инерции

$$J = \text{diag}(0.002352 \quad 0.002352 \quad 0.004704)$$

Привод воздушных винтов составляет электродвигатели постоянного тока X2212 KV980 с линейной характеристикой частоты вращения от величины питающего напряжения

$$\omega_i = 102,6 u_{M_i}, i = \overline{1,4}, \quad (3.12)$$

которое принимает значения в диапазоне 0 – 15,4 В.

Система управления, структура которой представлена на рисунке 3.3, отслеживает формируемую планировщиком маршрута траекторию задания так, что управление движением в вертикальном направлении обеспечивается изменением суммарной величины тяги, а горизонтальное перемещение БПЛА происходит под действием горизонтальной проекции суммарного вектора тяги, отклоненного от вертикали [27]. Отклонение вектора тяги происходит за счет изменения углов тангажа и крена при неизменном значении угла рыскания.

### 3.2.1. Управление угловым положением БПЛА

Необходимые изменения углового положения БПЛА достигаются путем изменения частоты вращения пропеллеров, и как следствие, изменением подъемных сил и моментов. Задача управления угловым положением БПЛА состоит в том, чтобы выдерживать требуемое угловое положение летательного аппарата. Структура блока 3, где решается задача управления угловым положением БПЛА, изображена на рисунке 3.4. Структура содержит: 3.1 – блок гироскопа; 3.2 – блок акселерометра; 3.3 – блок гиростабилизатора *IMU*; блок 3.4 – конвертер кватернионов в углы Эйлера; 3.5 – блок задания желаемых углов положения БПЛА с входом от блока 2; блок 3.6 – *PID* –регулятор; блок 3.7 – преобразователь угловых ускорений в частоту вращения моторов; 4 – блок управления моторами.

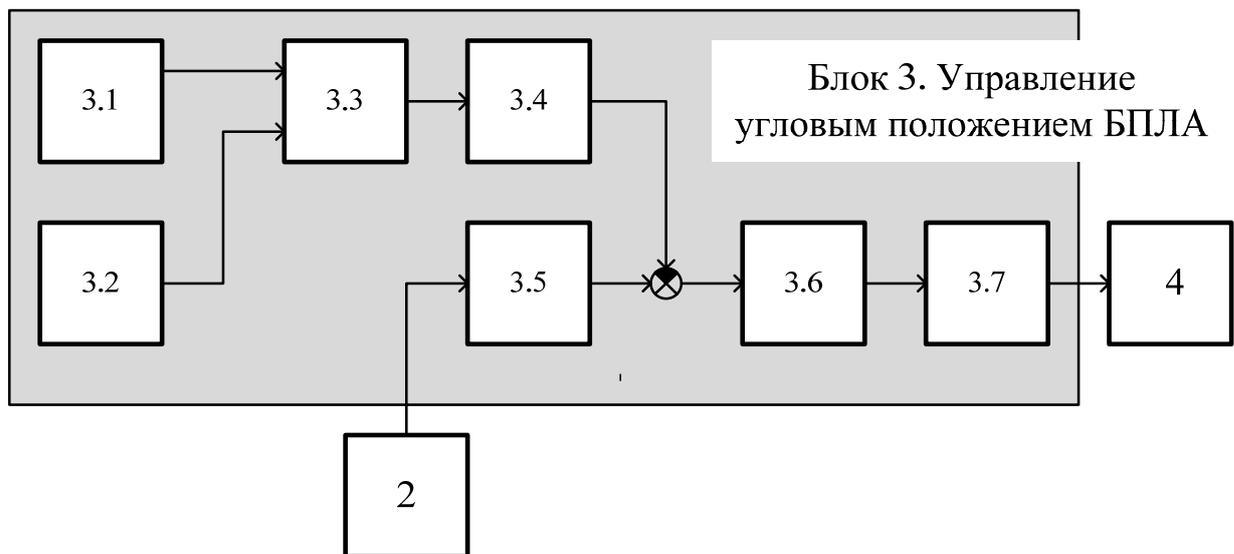


Рисунок 3.4. Структура блока управления угловым положением БПЛА

Для определения углового положения БПЛА используется программный модуль *IMU*. Известно, что описание работы гироскопа и акселерометра удобнее в кватернионном представлении. Модуль *IMU* позволяет БПЛА позиционировать себя в пространстве без использования внешних датчиков. Выходным сигналом из этого модуля является четырехмерный вектор углового положения

БПЛА в кватернионном представлении. В блоке 3.4 осуществляется преобразование кватернионов в углы Эйлера [15; 21].

Полученный трехмерный вектор, характеризующий текущее угловое положение БПЛА, позволяет определить угловую ошибку положения путем сравнения с требуемым угловым положением БПЛА, которое продиктовано планировщиком траектории из блока 1. Сигнал ошибки поступает в *PD*-регулятор, где формируется управляющий сигнал в блок преобразования 3.7, где формируются сигналы задания частоты вращения роторов моторов.

В блоке управления угловым положением БПЛА использовалась линеаризованная модель уравнений (3.1) в виде

$$\begin{pmatrix} J_1 \dot{\omega}_1 \\ J_2 \dot{\omega}_2 \\ J_3 \dot{\omega}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (F_2 - F_4)L \\ (F_3 - F_1)L \\ (F_1 - F_2 + F_3 - F_4)\gamma \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

где  $L$  – расстояние от центра масс БПЛА до осей моторов,

$\gamma$  – коэффициент преобразования силы мотора в угловой момент ротора.

Соотношения (3.8) представляют три уравнения относительно четырех неизвестных подъемных сил  $F_i$ , поэтому для однозначного определения всех компонент вектора тяги моторов следует воспользоваться уравнения динамики по оси  $z$

$$m\ddot{r}_{3,T} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mg \cos \alpha, \quad (3.14)$$

где  $\alpha$  – угол наклона БПЛА относительно вектора силы тяжести.

Обозначим

$$T_h = (m\ddot{r}_{3,T} + mg \cos \alpha) / 4$$

и, полагая что  $J_1 = J_2$ , получим путем преобразования уравнений (3.13) основные соотношения на требуемую тягу двигателей

$$\begin{aligned}
F_1 &= T_h + \dot{\omega}_{1d} + \dot{\omega}_{2d} + \dot{\omega}_{3d}, \\
F_2 &= T_h + \dot{\omega}_{1d} - \dot{\omega}_{2d} - \dot{\omega}_{3d}, \\
F_3 &= T_h - \dot{\omega}_{1d} - \dot{\omega}_{2d} + \dot{\omega}_{3d}, \\
F_4 &= T_h - \dot{\omega}_{1d} + \dot{\omega}_{2d} - \dot{\omega}_{3d}.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

### 3.2.2. Управление пространственным положением БПЛА

Задача управления положением БПЛА в пространстве решается путем определения требуемого угла наклона БПЛА. Поскольку БПЛА имеет шесть степеней свободы – три пространственных и три угловых координаты, но только четыре силы, создаваемые моторами, то невозможно напрямую осуществлять движение к требуемой точке, подавая сигналы на какие-либо из моторов. В этом случае для решения задачи контроля позиции следует сместить угловые координаты так, чтобы БПЛА обратился по направлению к требуемой точке. Требуемый угол определяется путем двойного интегрирования требуемого углового ускорения  $\ddot{r}_{i,d}(t)$ , которое определяется в виде:

$$\ddot{r}_{i,d} = \ddot{r}_{i,T} + k_{i,d}(r_{i,T} - r_i) + k_{i,d}(\dot{r}_{i,T} - \dot{r}_i), \quad i = \overline{1,4}. \tag{3.16}$$

С целью удержания высоты полета БПЛА на требуемом уровне тяга всех моторов должна быть равна, согласно (3.14)

$$mg \cos \alpha + m\ddot{r}_{3,T} = \sum_i F_i = F.$$

Для перемещения в горизонтальной плоскости необходимо выставить такие  $\varphi, \theta$  – углы тангажа и крена, чтобы проекция на горизонтальную плоскость вектора тяги  $F$  была направлена в целевую точку. Таким образом, в каждый момент времени, зная требуемое угловое ускорение  $\ddot{r}_{i,d}(t)$ , следует получить требуемые значения углов тангажа и крена  $\varphi_d(t), \theta_d(t)$ . Эти значения находятся из соотношений:

$$\begin{aligned}
\varphi_d &= 1/g \left( \ddot{r}_{1,d} \sin \psi_T - \ddot{r}_{2,d} \cos \psi_T \right), \\
\theta_d &= 1/g \left( \ddot{r}_{1,d} \cos \psi_T + \ddot{r}_{2,d} \sin \psi_T \right), \\
\psi_d &= \psi_T.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Для удержания положения БПЛА в окрестности желаемых углов синтезируем линейный *PD*-контроллер, который формирует управляющий вектор

$$U = J \begin{pmatrix} k_{P,\varphi} \varepsilon_\varphi + k_{D,\varphi} \dot{\varepsilon}_\varphi \\ k_{P,\theta} \varepsilon_\theta + k_{D,\theta} \dot{\varepsilon}_\theta \\ k_{P,\psi} \varepsilon_\psi + k_{D,\psi} \dot{\varepsilon}_\psi \end{pmatrix}, \tag{3.18}$$

где  $J$  – матрица моментов инерции в системе отсчета связанной с БПЛА;

$\varepsilon_\varphi, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\psi$  – текущие угловые ошибки положения БПЛА,

$\varepsilon_\varphi = \varphi_d - \varphi, \varepsilon_\theta = \theta_d - \theta, \varepsilon_\psi = \psi_d - \psi$  – отклонения текущих значений углов тангажа, крена и рыскания от требуемых значений согласно (3.17).

Параметры *PD*-регулятора определялись путем минимизации квадратичного функционала от угловых ошибок и их производных

$$J = \int_0^\infty G(t) dt, \quad G = A(x_d - x)^2 + B(\dot{x}_d - \dot{x})^2, \quad A = J_1 / L, \quad B = J_3 / \gamma. \tag{3.19}$$

Поскольку управление по углам после линеаризации декомпозируется в три линейных регулятора по трем угловым координатам, то задача определения параметров этих *PD*-регуляторов, которая сводится к решению уравнений Риккати [20; 22; 23], решалась программными средствами с помощью модуля *lqr*, отмеченного в Приложении П.2.

### 3.2.3. Планирование траекторного маршрута движения БПЛА

Алгоритм планирования маршрута, реализованного в блоке 1 – планировщике маршрута системы, представлен на рисунке 3.5. Блок «Нахождение 3D траектории» предусматривает эпизодическую работу видеокамеры и корректировки траектории в случае невозможности формирования и прокладывания траектории путем удаленного подключения сотрудника ВГСЧ (оператора) к БПЛА.

Для решения задачи планирования маршрута движения БПЛА был применен алгоритм Дейкстры [90], для этой цели выполняется дискретизация пространства будущего движения, строится помеченный связный граф, на котором весами дуг являются расстояния между точками маршрута. Алгоритм Дейкстры находит на построенном графе кратчайший путь от стартовой до финишной точки движения. Целевая точка задается мобильными станциями *SBGPS Master-06-WRM* (базовые станции «ГРАНЧ»), расположенными по маршруту движения БПЛА через каждые 100 м., при этом возможно наличие нескольких вариантов прокладывания маршрутов до целевой точки.

Недостатком метода является то, что найденный маршрут – совокупность линейных отрезков. Кусочно-линейные составляющие маршрута хоть и непрерывные, но не обладают в сопряжениях гладкостью, что необходимо требуется при обработке движения.

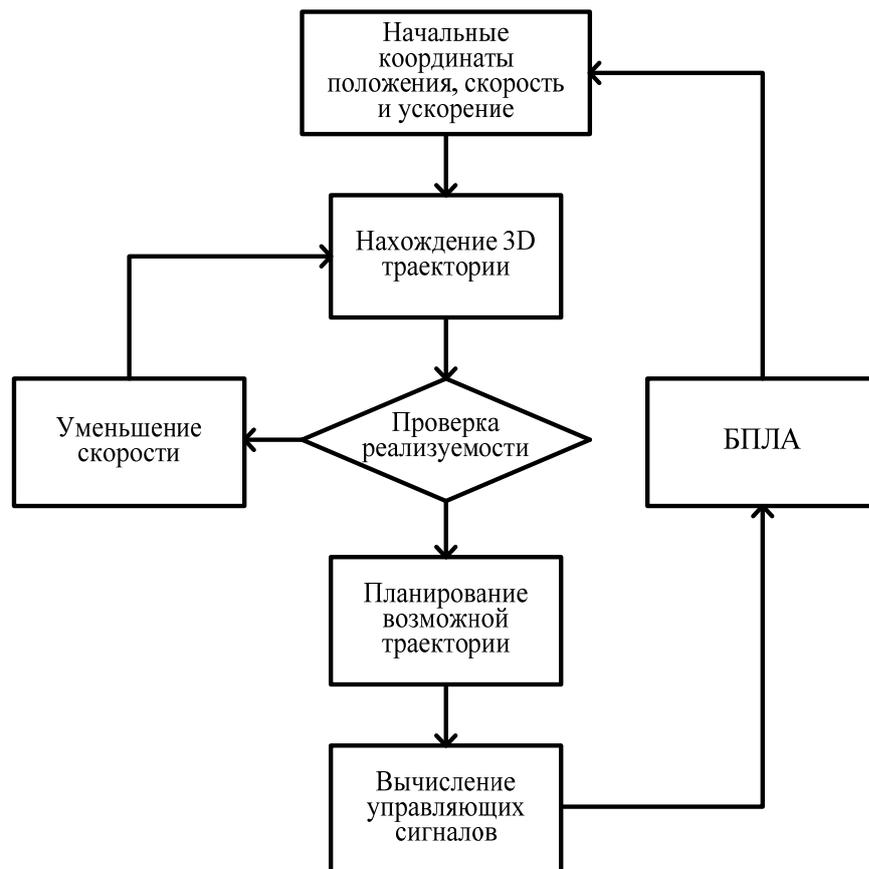


Рисунок 3.5 Алгоритм планирования маршрута движения БПЛА

Такая траектория не позволит БПЛА достаточно точно решать задачу следования по маршруту. Для преодоления этого недостатка произведена замена отрезков, соединяющих вершины, на сплайны полиномов седьмой степени [93]. Сплайны выбираются таким образом, чтобы значения их производных до пятого порядка совпадали в узловых точках.

После генерации сплайнов и задания скорости движения формируются функции, которые задают временные зависимости требуемых координат, скоростей и ускорений. Эти функции отправляются в контроллер координат, где реализуются соотношения (3.11).

### Выводы по главе 3

Сформирована с использованием кватернионной методологии математическая модель движения БПЛА, проверена адекватность этой модели моделированием программными средствами. В Приложении П.2. Представлен список программных модулей, использованных для формирования математической модели движения БПЛА.

Сформирована структура системы автоматического управления автономным движением по маршруту беспилотного летательного аппарата как следящей многоконтурной системы. Определена структура интеллектуального планировщика рациональной траектории движения на основе графового алгоритма кратчайшего пути Дейкстры.

Определены оптимальные в смысле минимума квадратичной ошибки и ее производной параметры  $PD$ -регуляторов системы.

Результаты исследований, выполненные во второй главе, легли в основу двух научных положений, выносимых на защиту:

- математическая модель движения беспилотного летательного аппарата, построенная на основе метода кватернионов, использованная как объект управления, позволяет синтезировать систему автоматического управления

движением с учетом пространственных ограничений аварийной выработки и ряда шахтных возмущений;

- интеллектуальная процедура оперативного формирования маршрута в соответствии с целевым заданием обеспечивает построение кратчайшей гладкой траектории для безопасного движения беспилотного летательного аппарата в шахтных выработках.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

### 4.1. Моделирование процесса автоматически управляемого движения по маршруту БПЛА в шахтных условиях

#### 4.1.1. Условия и задачи моделирования

Для реализации экспериментальных исследований синтезированной системы управления траекторным движением БПЛА в шахтных условиях использованы программные продукты *Matlab* и *SimInTech* [28; 67].

Математическая модель БПЛА, как объекта управления, описанная в главе 3, представлена системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений с ограничениями на допустимую область движения, что отражает пространственные ограничения движения в условиях шахтных выработок и возмущениями, отражающими воздействие шахтных воздушных потоков [29; 61]. Для решения такого рода уравнений использовался алгоритм *ode45 Matlab*, гарантирующий порядок сходимости четвертой или пятой степени.

На первом этапе численного моделирования был осуществлен подбор оптимальных коэффициентов  $PD$  – регулятора блока управления пространственным положением и блока управления угловым положением БПЛА. Поскольку в этих блоках используется линейный алгоритм, то для подбора коэффициентов алгоритма производилась линеаризация уравнений с последующим вычислением коэффициентов алгоритма регулятора, оптимальных в смысле квадратичного функционала от ошибки слежения и ее производной по времени, путем численного решения матричного уравнения Риккати [89].

Результат определения коэффициентов  $PD$  – контроллера блока управления угловым положением БПЛА, оптимального в смысле минимума квадрата линейной комбинации угловой ошибки и ее производной, представлен в таблице 4.1.

Коэффициенты  $PD$  – контроллера

Коэффициент/значение	$\varphi$	$\theta$	$\psi$
$k_p$	15,23	15,23	30,11
$k_D$	12,67	12,67	10,54

На втором этапе исследовательского эксперимента осуществлялось моделирование управляемого движения БПЛА с фиксированной весовой нагрузкой в условиях отсутствия возмущений в виде шахтных воздушных потоков и различных препятствий. В результате определялись настроечные коэффициенты контроллеров всех блоков системы. Дальнейшие эксперименты проводились с этими же коэффициентами с вариацией массы за счет полезной нагрузки и при наличии возмущений.

Основной целью комплексных модельных исследований является проверка маневренных характеристик БПЛА при автоматически управляемом полете в условиях шахтных выработок. Для чего проводилась серия численных экспериментов с вариацией нагрузки, возмущений и наличия препятствий [98; 106].

В основу реализации модельных экспериментов движения для формирования гипотетического маршрута был использован фрагмент виртуальных шахтных выработок, взятых в качестве прототипа из системы горных выработок шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс», изображенный на рисунке 4.1. На рисунке показаны основные точки предполагаемого маршрута БПЛА, направление движения, температура в узловых точках, а также расположение базовых станций «ГРАНЧ».

Не ограничивая общности постановки задачи, на основании маршрутного прототипа составлен тестовый полигон для планировщика траектории модельного маршрута, изображенный на рисунке 4.2, который содержит основные признаки реального фрагмента топологии шахтных выработок.

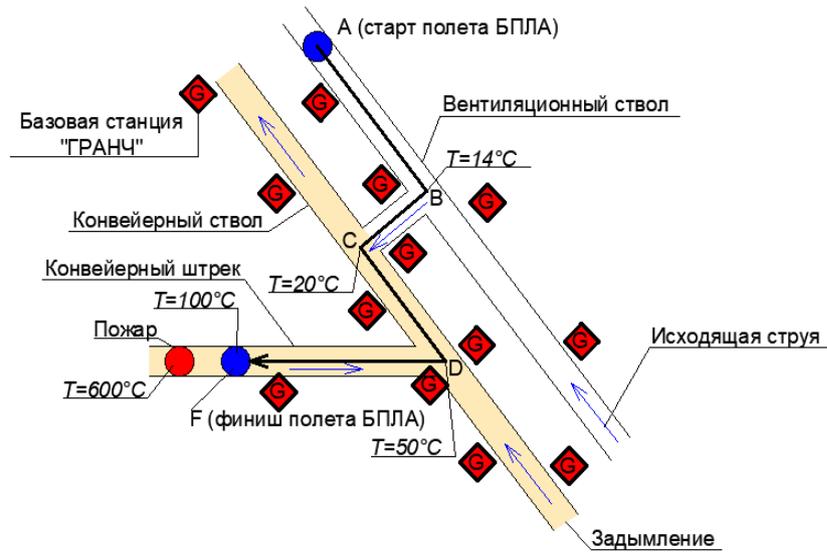


Рисунок 4.1. Фрагмент горных выработок шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс»

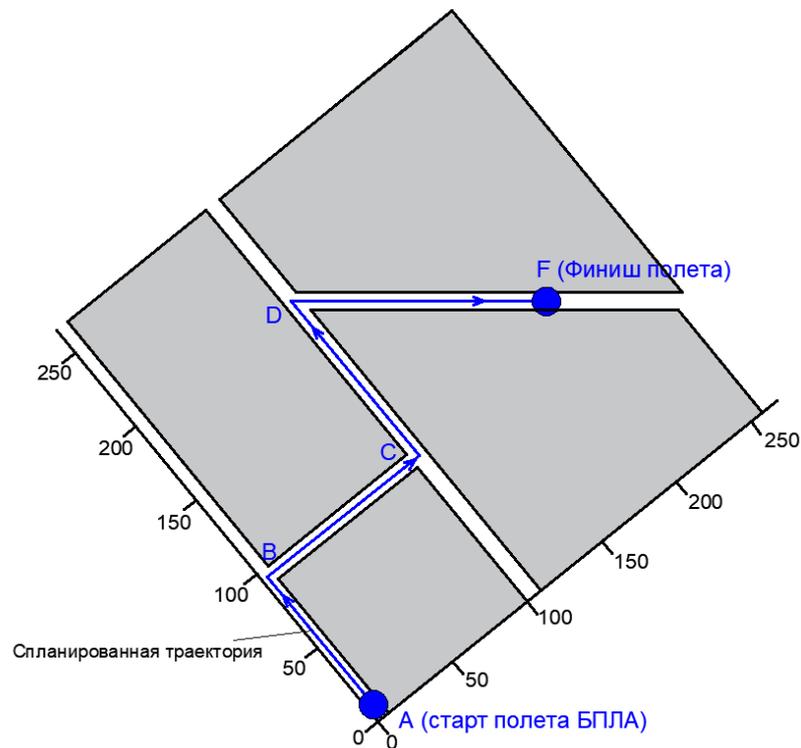


Рисунок 4.2 Тестовый полигон для планировщика траектории модельного маршрута.

При формировании траектории задания использовалась естественная прямоугольная система координат с началом в точке старта полета БПЛА. Все модельные эксперименты с системой управления движением осуществлялись по этому маршруту или по его фрагментам.

Скорость попутного и встречного шахтного воздушного потока варьировалась. Скорость полета БПЛА при отсутствии возмущающего воздушного потока принималась постоянной в двух вариантах 6 м/с и 10 м/с. В этих условиях были проведены следующие модельные эксперименты:

- Пролет по тестовому полигону без возмущений и препятствий.
- Пролет по тестовому полигону без возмущений, но с препятствиями.
- Пролет по тестовому полигону с наличием постоянного встречного потока воздуха.
- Пролет по тестовому полигону с наличием постоянного бокового потока воздуха.
- Пролет по тестовому полигону с наличием постоянного встречного и бокового потоков воздуха.
- Пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой без возмущений и препятствий.
- Пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой без возмущений, но с препятствием.
- Пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой с постоянным встречным потоком воздуха.
- Экстренное торможение полета с различными массами БПЛА.

В каждом из экспериментов исследовались следующие количественные характеристики качества управляемого движения:

- Отклонение реальной траектории движения от спланированной по всем трем осям.
- Среднее отклонение реальной траектории движения от спланированной.

- Максимальное отклонение реальной траектории от спланированной за время полета.

## 4.2. Результаты модельных исследований

### 4.2.1. Пролет по тестовому полигону без препятствий

В экспериментальном моделировании движения по спланированному маршруту исследовалось движение БПЛА на двух скоростях 6м/с и 10м/с. Эксперимент проводился при различных значениях массы БПЛА: 0,6кг; 1,2кг. Моделирование имело целью определить:

- максимальную массу полезной нагрузки;
- среднюю скорость, которую способен выдержать БПЛА с фиксированной массой полезной нагрузки;
- максимальную дальность полета при различных скоростях полета.

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены экспериментальные кривые, отражающие качество управления при прохождении маршрута для случаев, когда БПЛА нагружен или не нагружен, когда летит с максимальной скоростью или 60% от нее.

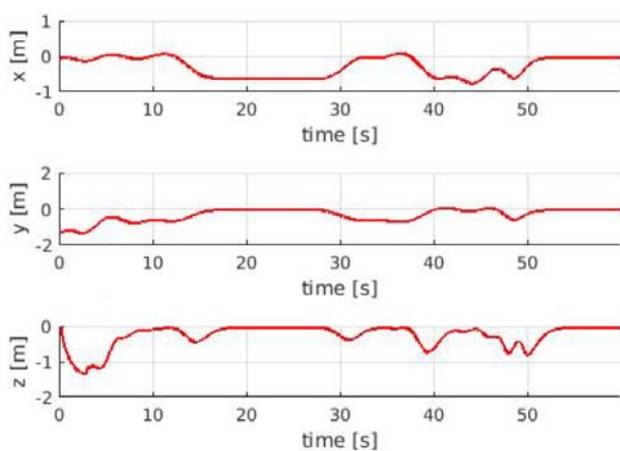


Рисунок 4.3. Координатные отклонения от траектории при движении со скоростью 10м/с без полезной нагрузки

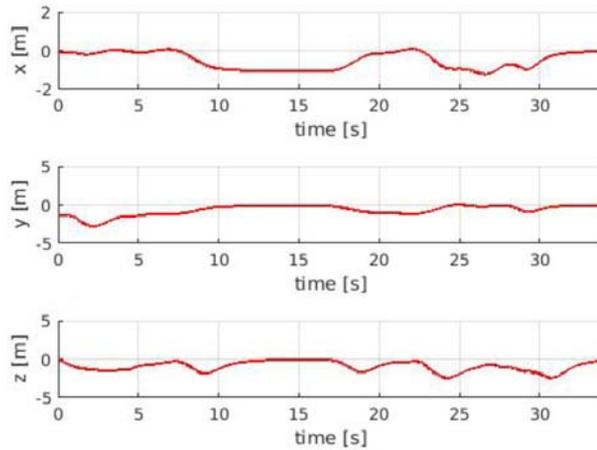


Рисунок 4.4. Координатные отклонения от траектории при движении со скоростью 6м/с с полезной нагрузкой.

Моделирование движения в проекции на горизонтальную плоскость обнаружило недолет по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

На рисунке 4.3. показано изменение величины текущего недолета по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  на скорости 10 м/с без полезной нагрузки. Максимальная величина отклонения чуть больше полуметра по координате  $x$ , до метра по координате  $y$ , до 1,2 метра по координате  $z$ .

На рисунке 4.4. показано изменение величины текущего недолета по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  на скорости 6 м/с с полезной нагрузкой. Максимальная величина отклонения не более метра по координате  $x$ , до 1,5 метров по координате  $y$ , до 1,3 метра по координате  $z$ .

На рисунке 4.5. показана величина модуля текущего вектора отклонения  $S = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  реальной траектории от задания на скорости 6 м/с с полезной нагрузкой.

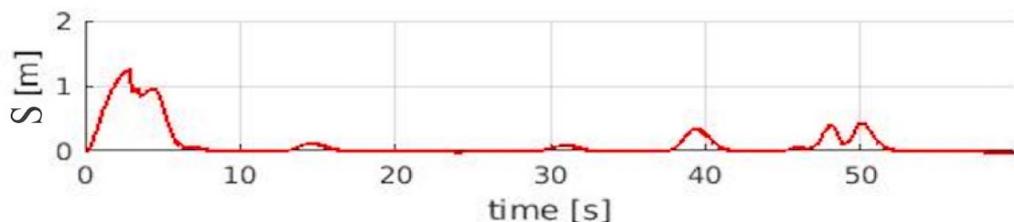


Рисунок 4.5. Величина модуля текущего вектора отклонения реальной траектории от задания на скорости 6 м/с с полезной нагрузкой.

Как видно из рисунка, максимальная величина отклонения чуть больше одного метра имела место на первых пяти секундах полета, в дальнейшем отклонение не превышало 30 см.

На рисунке 4.6. показана величина модуля текущего вектора отклонения  $S$  реальной траектории от задания на скорости 10 м/с без полезной нагрузки. Максимальная величина отклонения составила более 2 метров начиная с 23 секунды полета. Результат данного эксперимента характеризует полет БПЛА на третьем участке, где на него действует сила бокового ветра (дополнительно к встречному), что приводит к его сносу. Решением проблемы сноса занимается контур обработки ветра.



Рисунок 4.6. Величина модуля текущего вектора отклонения реальной траектории от задания на скорости 10 м/с без полезной нагрузки

На основании результатов модельных экспериментов получены числовые данные среднего и максимального отклонений от запланированной траектории при полете на скорости 10 м/с от массы полезной нагрузки БПЛА. Результаты экспериментов представлены на рисунке 4.7.

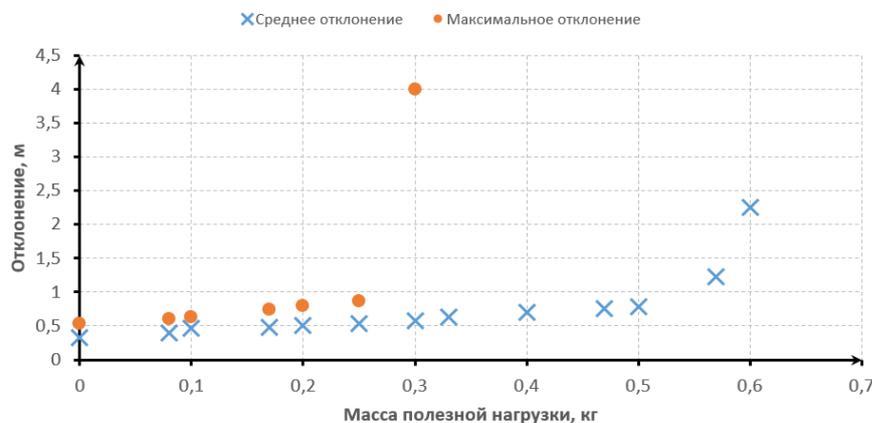


Рисунок 4.7. Отклонения от запланированной траектории при полете на скорости 10 м/с от массы полезной нагрузки.

При полете на меньшей скорости 6 м/с среднее отклонение от запланированной траектории при полете от массы полезной нагрузки БПЛА существенно меньше, что видно из рисунка 4.8. На том же рисунке 4.8 приведены числовые экспериментальные данные по максимальному отклонению от запланированной траектории при полете на скорости 6м/с от вариации массы полезной нагрузки БПЛА.

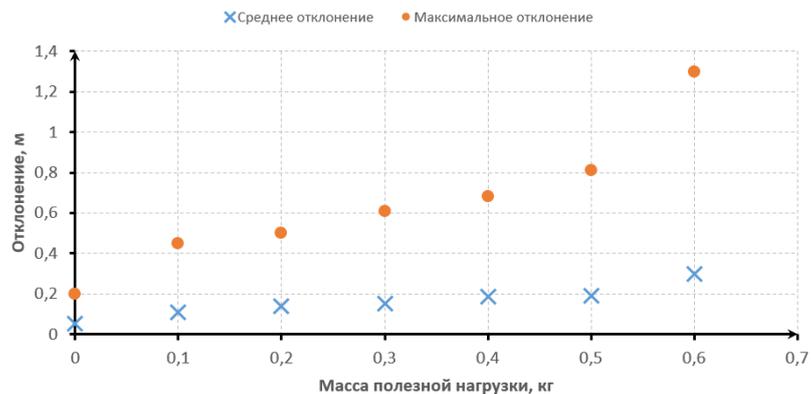


Рисунок 4.8. Отклонения от запланированной траектории при полете на скорости 6м/с от массы полезной нагрузки.

#### 4.2.2. Пролет по тестовому полигону при наличии препятствий

Для проверки маневренности системы управления движением БПЛА проведен эксперимент, в котором на маршруте устанавливались гипотетические препятствия по схеме, изображенной на рисунке 4.9. Препятствия располагались в вертикальной плоскости  $YZ$ , обходить препятствия возможно сверху и снизу.

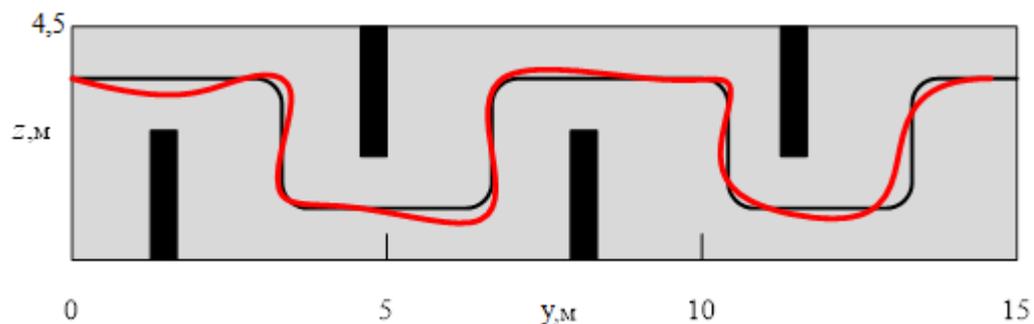


Рисунок 4.9. Схема расположения гипотетических препятствий. Спланированная траектория (черный цвет) и реальная траектория (красный цвет) прохождения.

Экспериментом выявлено, что наличие препятствий приводит к замедлению скорости прохождения трассы в области препятствия, так как указанные маневры невозможно пройти с максимально допустимым ускорением. Прохождение модельного участка БПЛА массой 0,6кг без нагрузки заняло 15,35 секунд, БПЛА с нагрузкой прошел этот участок за 20,10 секунд. Результатом эксперимента стало доказательство того, что синтезированная система автоматического управления позволяет решать задачи маневрирования в случае появления завалов.

#### 4.2.3. Пролет тестовому полигону при возмущении шахтным потоком воздуха

Одной из задач модельных экспериментов являлась задача на проверку чувствительности системы к внешнему возмущению в виде бокового или встречного шахтного воздушного потока. Определялось максимальное отклонение движения БПЛА от траектории в зависимости от скорости возмущающего воздушного потока. Определялась предельная величина скорости возмущающего потока, которая приводит к недопустимому отклонению от траектории движения для двух случаев – нагруженного и не нагруженного БПЛА.

На рисунке 4.10 приведены результаты эксперимента при возмущении боковым потоком – БПЛА без нагрузки (а), БПЛА с нагрузкой (б).

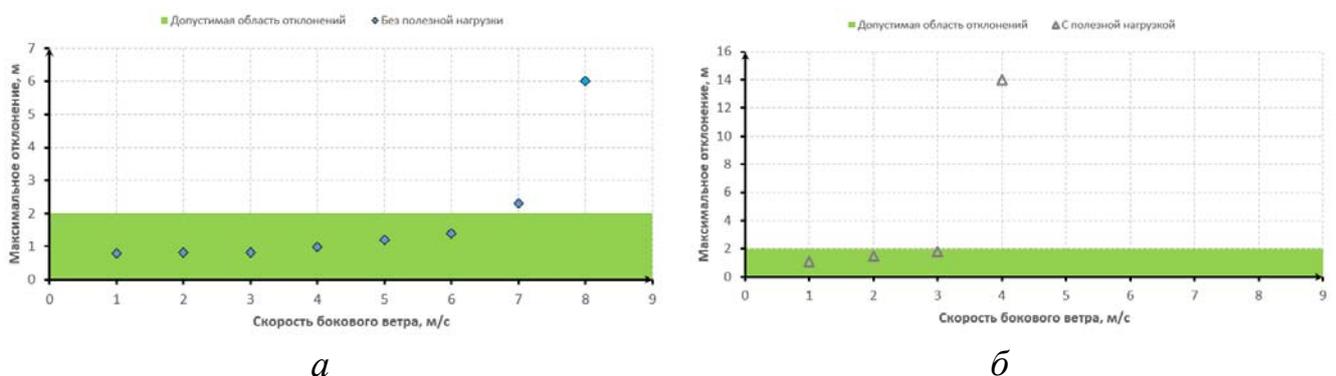


Рисунок 4.10. Максимальные отклонения от спланированной траектории при возмущении боковым потоком – БПЛА без нагрузки (а), БПЛА с нагрузкой (б).

Модельный эксперимент показал, что система управления позволяет БПЛА без полезной нагрузки выдерживать траекторию с допустимыми отклонениями при скорости потока до 6 м/с, а для БПЛА с полезной нагрузкой 0,6 кг скорость бокового воздушного потока в 4 м/с оказывается критической.

Результаты моделирования движения по маршруту навстречу возмущающего шахтного воздушного потока показали, что система управления позволяет БПЛА без полезной нагрузки выдержать с допустимыми отклонениями от траектории встречный ветер до 12 м/с и с полезной нагрузкой 0,6 кг выдерживать встречный поток до 8 м/с.

#### 4.2.4. Экстренное торможение

Исследования движения беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях поставарийного состояния выработок требуют проверки не только на маневренность при облете различных препятствий, но и при невозможности облета выполнить экстренное торможение. Модельный эксперимент экстренного торможения проводился со скоростями 6 м/с и 10 м/с при различных нагрузках.

Результатом экспериментов явились числовые показатели тормозного пути от массы полезной нагрузки. На рисунке 4.11. представлены экспериментальные показатели тормозного пути, полученные при изменении массы полезной нагрузки при скоростях 6 м/с и 10 м/с.

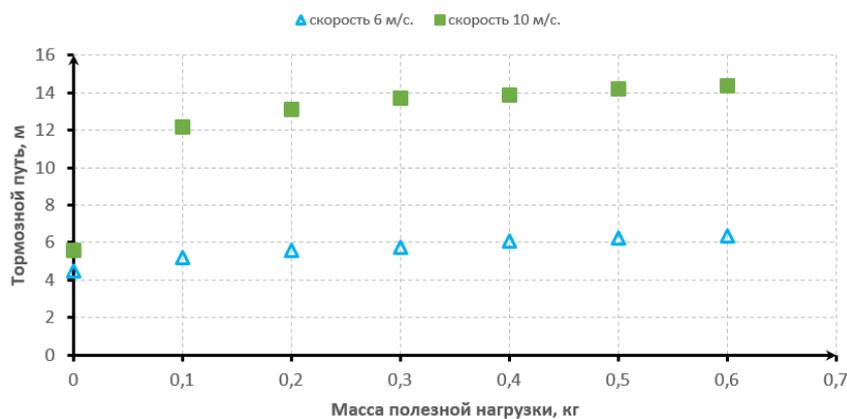


Рисунок 4.11. Зависимость тормозного пути от массы полезной нагрузки при скоростях 6м/с и 10м/с.

Вследствие наличия силы вязкого трения о воздух длина тормозного пути изменяется нелинейно в относительно небольшом диапазоне.

#### 4.2.5. Время полета и длина полетного пути

Экспериментальные показатели максимального времени полета и длина полетного пути беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях в зависимости от его нагруженности при скорости полета 10 м/с представлены на рисунках 4.12 и 4.13.

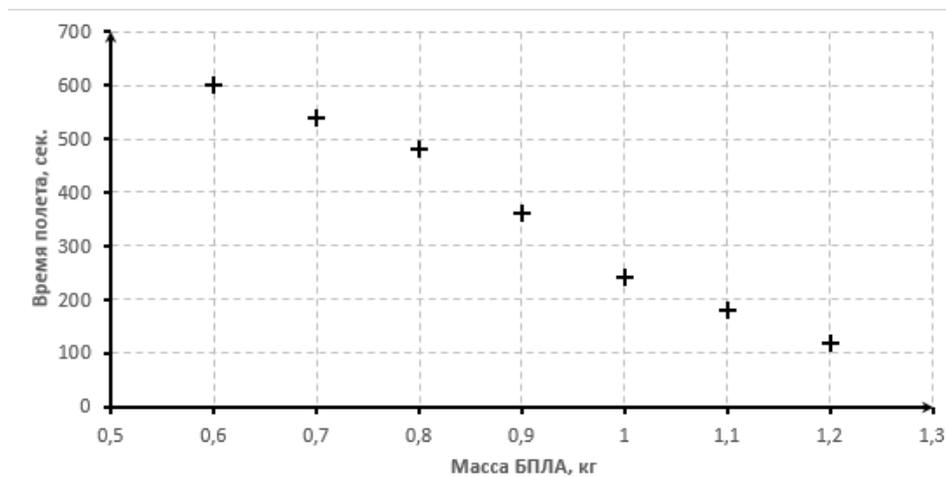


Рисунок 4.12. Максимальное время полета при скорости 10 м/с в зависимости от нагруженности БПЛА

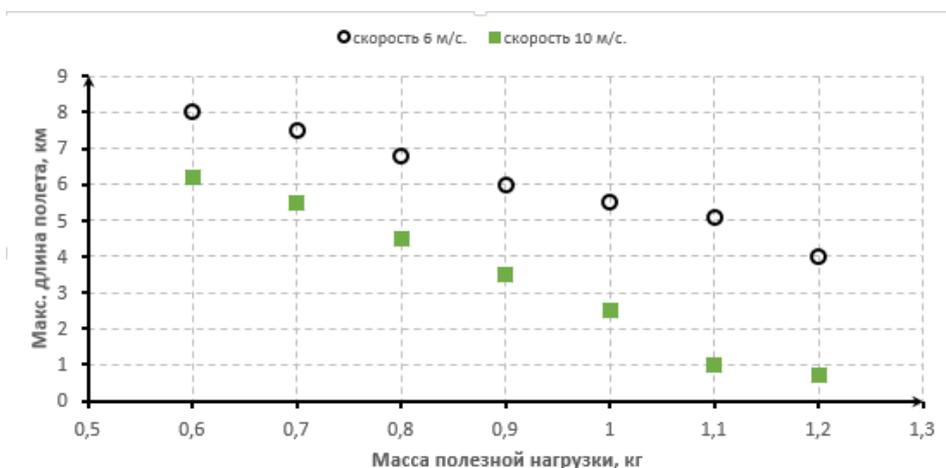


Рисунок 4.13. Максимальная длина полета при скорости 6 м/с и 10 м/с в зависимости от нагруженности БПЛА

## Выводы по главе 4

Выполнены серии модельных экспериментов, по которым сделаны следующие выводы:

- Определена, с учетом полезной нагрузки и нагрузки вызванной требованиями безопасности, целесообразная скорость прохождения трассы величиной 6м/с;
- Определена величина тормозного пути на рекомендованной скорости, позволяющая совершить безопасное экстренное торможение;
- Определено, что БПЛА с полезной нагрузкой может выдержать порывы встречного и бокового ветра соответственно 8 м/с и 4 м/с;
- Показано, что система управления позволяет успешно решать задачи маневрирования в шахте, преодолевая препятствия в виде не глухих завалов;
- Определено, что БПЛА с полезной нагрузкой может пролететь дистанцию до 4км.

Результаты моделирования показывают удовлетворительное качество процесса управления движением БПЛА, стабильность отслеживания заданных траекторий, что позволяет сформировать научное положение, выносимое на защиту:

«Разработанная структура системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом позволяет достаточно качественно выполнять в ограниченном пространстве шахтных выработок и наличии возмущений автономное движение по целевому маршруту, прокладываемому к аварийной выработке и обратно».

## ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВГСЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

### 5.1. Анализ и обоснование выбора робототехнических средств доставки и приборов мониторинга

Анализ литературных источников по вопросу мониторинга поставарийного состояния подземных выработок с помощью робототехнических средств позволил определить обобщенные, достаточно условные, требования к параметрам системы БПЛА для доставки приборов мониторинга. Результат анализа представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1.  
Требования к БПЛА

Наименование характеристик	Штатный режим	Поставарийная ситуация
Дальность передвижения не менее, м	100	1500
Мин. сечение выработки для прохождения, м <sup>2</sup>	5,2	0,03 – 9,0
Двигатель	во взрывобезопасном корпусе	
Максимальная температура использования, °С	120	
Аэрологическая обстановка		
Уровень метана, %	0,1 – 100	
Температура рудничной атмосферы, °С	В соответствии с ПБ	120
Уровень углекислого газа, %		0,1 – 20
Уровень запыленности		+
Связь в условиях радио поглощения стенок	Оптоволочно, радиоканал	

Состав робототехнического комплекса, предназначенного для работы в шахтных условиях, подразумевает наличие робототехнической платформы, обеспечивающей перемещение полезной нагрузки на значительные расстояния до 1500 м и имеющий на борту 5 – 10 аппаратов, способных перемещаться на расстояния от 100 м для осуществления функции мониторинга. Визуальное

представление и компоновка РТК показана на рисунке 5.1. Платформа и аппараты должны иметь возможность информационного взаимодействия для реализации задач мониторинга и управления. Допускается раздельное использование платформы и аппаратов для решения ограниченного круга задач.

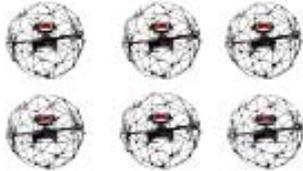
<b>Состав РТК</b>			
<b>Средний аппарат (2шт.)</b>		<b>Тяжелый аппарат (1шт. + 6шт.)</b>	
			

Рисунок 5.1. Состав разрабатываемого РТК

Платформа и аппараты должны иметь в своем составе устройство для перемещения полезной нагрузки в заданную точку, полезную нагрузку для решения задач мониторинга: сенсоры газа и температуры, техническое зрение, систему обработки и передачи данных. Аналогов робототехнических средств, способных обеспечивать выполнение перечисленных задач в шахтных условиях, не найдено.

## **5.2. Анализ и обоснование выбора технических средств оценки состояния горных выработок**

Визуальная оценка состояния подземной горной выработки осуществляется с использованием средств технического зрения. При выполнении анализа существующих аналогов технического зрения использовались сведения о законченных технических решениях гражданского назначения, преимущественно для БПЛА. Существуют БПЛА с достаточным набором компонентов системы технического зрения, предназначенной для навигации в открытом пространстве при наличии и отсутствии глобальной навигации [18; 65]. Существуют также откры-

тые платформы технического зрения, которые позволяют интегрировать их в системы, предназначенные для работы в подземных условиях. Такими платформами являются, например, *3DR IRIS*, и другие.

При выборе системы технического зрения для оценки состояния горных выработок необходимо учитывать две характеристики этой системы: достаточная компактность для размещения на летательном аппарате и ее производительность, достаточная при распознавании элементов пространства для принятия целевого решения. Одна из задач системы технического зрения при оценке состояния горных выработок – это построение 3D-карты окружающего пространства, предназначенной для ориентации БПЛА.

Оптические датчики, используемые для промышленного применения, имеют разрешение в зависимости от используемой камеры. Применяются однопиксельные камеры и с линейкой фототранзисторов. Двумерные датчики создаются с использованием технологий *CCD*, *CMOS*, *BSI* и *Foveon* [53].

Кремниевые датчики изображения имеют нелинейную кривую спектрального отклика, чувствительность к ближней инфракрасной части спектра высокая, в то время как для синего, фиолетового и ультрафиолетового чувствительность меньше.

Инфракрасные камеры работают в диапазоне излучения 760 нм и выше. Инфракрасная съемка показывает энергию излучения, которую объекты испускают в инфракрасном спектре, для чего снимаемые объекты освещаются источником инфракрасного излучения. Сенсор камеры гораздо более чувствительнее, чем на обычной камере. Фильтр убирает видимый диапазон, от его влияния на изображение.

Тепловизор – это устройство, которое позволяет вести наблюдение за распределением температуры исследуемой поверхности, его тепловые камеры измеряют абсолютную температуру объекта, могут работать в полной темноте, могут видеть до 1500 метров и гораздо чувствительнее, чем инфракрасные камеры.

Радар – это устройство, которое предназначено для определения местоположения и обнаружения объектов в пространстве по отраженным от них радиоволнам. Для восстановления изображения и геометрических характеристик объектов, попадающих в зону видимости радиозрения, требуется довольно большой объем вычислений.

Лазерный дальномер – это устройство, которое определяет расстояние до объектов с большой точностью. Конструктивно, импульсный лазерный дальномер представляет из себя совокупность импульсного лазера и детектора излучения. Производится измерение времени, которое затрачивает луч на расстояние до отражателя и обратно, далее производится расчет расстояния до объекта. Принцип работы фазового лазерного дальномера основан на методе сравнения фаз отправленного и отраженного сигналов. Фазовые дальномеры более точны по сравнению с импульсными дальномерами.

К системам радиолокации, которые работают в оптическом диапазоне и используют в качестве источника излучения лазер относится лидар. В мобильных БПЛА, а также наземных робототехнических комплексах лидар используется для пространственной ориентации аппарата и автоматического построения трехмерной карты окружающего пространства.

Ультразвуковой дальномер – это устройство, которое определяет расстояние до объектов, генерируя звуковые импульсы на частоте 40 кГц, и затем обрабатывает эхо. Расстояние до объекта однозначно определяется по времени распространения звуковой волны туда и обратно. Ультразвуковые датчики используются для ближнего видения 0,02 – 4 м.

При компоновке БПЛА средствами технического зрения, следует учитывать два противоположных аспекта – ее компактность и способность разместиться на борту БПЛА, а также достаточная производительность для распознавания деталей пространства и принятия решений процессором беспилотного устройства. Данные аспекты позволяют БПЛА перемещаться в ограниченном агрессивном пространстве с возможностью анализа ситуации, поэтому следует учитывать ограничение по весогабаритным показателям системы технического

зрения. Некоторые из существующих БПЛА промышленного назначения уже располагают встроенной системой технического зрения.

В таблице 5.2. представлены виды и характеристики современных средств технического зрения, которые позволяют строить 3D карты окружающего пространства, «сшивать» их и воссоздавать глубину изображения пространства. Все эти свойства могут быть использованы для управления автономным полетом БПЛА.

Основные виды технического зрения, представленные в таблице 5.2:

- пассивная система технического зрения без инфракрасной и лазерной подсветки, которая позволяет выполнить процесс взаимного или внешнего ориентирования, а также позволяет с высокой точностью вычислить пространственные координаты точки;
- активная система технического зрения с инфракрасной подсветкой чувствительна к ближнему инфракрасному диапазону. Чем ярче подсвечивается объект – тем он ближе к объективу камеры. Таким образом по яркости пикселей оценивается расстояние до конкретной точки объекта;
- активная система технического зрения с лазерной структурированной подсветкой, которая позволяет вычислять расстояние до точек объекта на изображении;
- активная система технического зрения со стробоскопической подсветкой и управляемым затвором позволяет формировать 3D карту активной зоны видения и исключить все, что находится за ее пределами. Особенность системы возможность формирования изображения в аэрозольной среде – тумане;
- система лидарного технического зрения, которая запускает 150 тысяч импульсов лазерного излучения в секунду на объект, что позволяет вычислять расстояние между ним и объектом с высокой точностью;
- радарная система технического зрения, которая позволяет с высокой точностью определять положение объектов в том числе скрытых, находящихся внутри других объектов и за объектами.

Таблица 5.2.

**Виды и характеристики современных средств технического зрения**

<b>Система технич. Зрения</b>	<b>Вычисл. сложность</b>	<b>Дальн.</b>	<b>Точность</b>	<b>Весогабаритхарактерист.</b>	<b>Явные недостатки</b>
Пассивная без подств. с одной камерой	Средняя	сотни метров	не высокая (до 50 см)	Маленькие	требуется движение для построения карты простр.
Пассивная без подств. с 2 камерами	Высокая	сотни метров	высокая (до 10 см)	Средние	чем шире база тем больше точность
Активная с инфракрасн. Подсветкой	Средняя	десятки метров	Высокая (десят. см)	Средние	в светлое время суток плохая работ.
Активная с лазерной структурированной подсветкой	Средняя	десятки-сотни метров	высокая (един. см)	Средние	плохая видимость подсветки против света
Активная со стрбоскоп. подсветкой с управляем. Затвором	Средняя	десятки метров	высокая (десят. см)	Плохие (прототип тяжелый и большой)	дорогая камера с управляемым затвором
Лидарная система	Средняя	десятки - сотни метров	высокая (един. см)	Средние, крупные	имеется движущаяся деталь
Радарная система	Средняя	сотни метров	высокая (един. см)	Большие размеры и вес	большая антенна
Ультразвук. система	Средняя	единицы метров	высокая (един. см)	Средние	использовать специальные сборки для построения 3D изображения

В таблице 5.3 представлены основные характеристики беспилотных платформ БПЛА которые могут быть использованы при проведении аварийно-спасательных операций, а в таблице 5.4 представлены основные характеристики бортовой полезной нагрузки.

Робототехнический комплекс предполагается использовать в штатном и аварийном (поставарийном) режимах работы горного предприятия. В аварийном режиме работы, робототехнический комплекс, может использоваться как инструмент ВГСЧ – «щуп», выполняя после возникновения аварий разведку и обследование состояния горных выработок в труднодоступных местах в условиях, превышающих предельно допустимые концентрации газа и высокой температуры рудничной атмосферы куда сотрудник ВГСЧ не может пройти.

Таблица 5.3.

## Основные характеристики летающих беспилотных платформ

Наименование параметра	Тип аппарата		
	тяжелый	средний	легкий
Количество в составе РТК	1	2	6
Масса, не более, кг	10	3	1
Габариты, не более, мм	600	500	200
Масса полезной нагрузки, не более, кг	5,0	0,3	0,05
Способ перемещения	качение, полет		
Тип привода	Независимый привод винтов. Качение средних и легких аппаратов, обеспечивается сферической формой корпуса и тягой винтов		Винты
Система управления	Автономное с системой позиционирования и элементами искусственного интеллекта		Дистанционное
Дальность автономного перемещения, не менее, м	1500	1500	100
Средняя скорость перемещения, км/ч	5		
Высота преодолеваемого препятствия, не более, м	50		
Поперечное сечение преодолеваемого пространства, не менее, м <sup>2</sup>	9,0	9,0	0,1

В штатных условиях работы горного предприятия робототехнический летательный комплекс может выполнять:

- мониторинг горных выработок для создания 3D модели сети горных выработок;

- обследования без присутствия людей: заперемыченных горных выработок, куполов, вертикальных горных выработок, завалов за секциями в лаве, необслуживаемых водоотливов, горных выработок после проведения БВР, оборудования в лавах, требующих применение аппаратов защиты органов дыхания.

Таблица 5.4.

## Основные характеристики полезной нагрузки

Наименование параметра	Тип полезной нагрузки			
	3D моделирование	Фото-видео съемка	Мониторинг атмосферы и температуры	Восстановление связи с шагом 30 м на расстоянии не более 750 м
Масса, кг	1,5 – 2,5	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3	0,3 – 0,5
Принцип работы технического зрения	Лазерное или ультразвук. сканирование, видео-фотометрия в оптическом и ИК диапазонах	видео- фотометрия в оптическом и ИК диапазонах	Штатные сенсоры	Установка маяков-ретрансляторов
Время непрерыв. работы не менее, мин	30		60	
Энергоснабжение	Автономное, с возможностью оперативной замены аккумуляторов по истечению предельного времени работы			
Система передачи данных	Совместимость с системой связи «ГРАНЧ»			
Особые требования	Точность 3D моделирования 50 мм в условиях присутствия в атмосфере CO; CH <sub>4</sub> ; влажности, запыленности, а также наличия воды на стенках выработок	Работа в условиях присутствия в атмосфере CO; CH <sub>4</sub> , влажности, запыленности, а также наличия воды на стенках выработок	Температура не более 120 °С, уровень CH <sub>4</sub> 0,1-100%, CO 0,1-20%,	Совместимость с системой связи «ГРАНЧ»

### 5.3. Анализ и выбор средств измерения параметров и характеристик состава рудничной атмосферы для БПЛА

По типам исполнения газоанализаторы рудничной атмосферы делятся на 2 типа: стационарные и переносные. При этом в них используются различные типы сенсоров: термокондуктометрический, ультразвуковой, термokatалитический, оптический, гальванический, электрохимический,

Для разрабатываемого БПЛА предпочтительно использование газоанализаторов переносного типа, предназначенных для непрерывного автоматического контроля объемной доли газов в атмосфере горных выработок, угольных шахт, опасных по газу и пыли и выдачи сигнала в систему управления при достижении измеряемым компонентом установленных пороговых значений. Необходимо постоянно измерять температуру рудничного воздуха и концентрацию газов: метана  $CH_4$ , оксида углерода  $CO$ , оксида и двуоксида азота  $NO + NO_2$ , углекислого газа  $CO_2$ , водорода и кислорода. По результатам проведенного анализа существующих предложений в части миниатюрных газоанализаторов возможны к установке на БПЛА [26; 83; 53] следующие датчики:

- Оптический газовый датчик *MIPEX-02* [103], изображенный на рисунке 5.2, который предназначен для определения процентного состава метана и углекислого газа. Датчик полностью цифровой и отказоустойчивый со сверхнизким энергопотреблением не более 3 мВт.



Рисунок 5.2. Газовый датчик *MIPEX-02*

Датчик имеет быстрое время отклика  $T_{90} < 6$  с, корпус из нержавеющей стали, линейризованный цифровой выход с температурной компенсацией  $-40...+60^{\circ}\text{C}$ , габариты—  $\varnothing 20,2$  мм  $\times$  16,6 мм, искробезопасная цепь *ia*.

- Миниатюрный оптический газовый датчик *MIPEX-03* [104], изображенный на рисунке 5.3, который обладает низким потреблением энергии не более 3 мВт, совместимый со стандартными термокаталитическими датчиками. Датчик имеет комбинированный аналоговый и цифровой интерфейсы, пластиковый корпус, линейризованный выход с температурной компенсацией от  $-20$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , искробезопасную цепь «*ia*», габаритный размер -  $\varnothing 20,2$  мм  $\times$  16,6 мм.



Рисунок 5.3. Газовый датчик *MIPEX-03*

- Оптический инфракрасный датчик горючих газов *MIPEX-04* [105], изображенный на рисунке 5.4, который обладает самым низким энергопотреблением в тысячу раз более энергоэффективный, чем его ближайшие конкуренты. Диапазон измерений метана ( $\text{CH}_4$ ): от 0 до 5% об.; Температурный диапазон от  $-40$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ;



Рисунок 5.4. Газовый датчик *MIPEX-04*

Выбрав средства для измерения параметров и характеристик рудничной атмосферы, необходимо сформировать алгоритм первичного анализа состава рудничной атмосферы на взрывоопасность, прописанный в систему управления БПЛА.

В соответствие с [2] взрывчатость метановоздушных смесей при атмосферном давлении определяется по диаграмме Говарда, изображенной на рисунке 5.5, в которой выделены области, где: I – неосуществимая смесь метана с воздухом; II и III – взрывчатая, невзрывчатая смеси соответственно; IV – смеси, которые могут стать взрывчатыми при добавлении свежего воздуха.

Все точки, ниже линии ABCD – смеси метана, воздуха и избыточного азота. BE, CE – линия нижнего и верхнего концентрационного предела взрывчатости метановоздушной смеси соответственно.

Точки B, C, E – образуют треугольник взрывчатости метановоздушной смеси. Все смеси метана с воздухом внутри треугольника BCE – взрывчатые. Поэтому, при первичном анализе состава рудничной атмосферы основной задачей является определение местоположения пары ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ) на диаграмме Говарда, чтобы ответить на вопрос не попадает ли эта метановоздушная пара в треугольник взрывчатости.

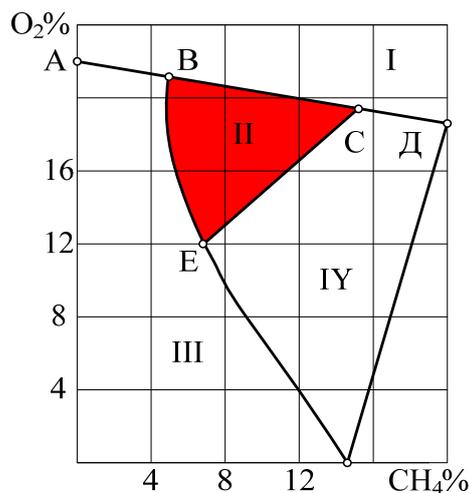


Рисунок 5.5. Диаграмма взрывчатости метановоздушных смесей.

На рисунке 5.6 представлена блок – схема алгоритма получения информации о составе рудничной атмосфере. В соответствии с алгоритмом, информация о составе атмосферы на основе опроса всех функционирующих на шахте систем, в случае работающей системы АГК шахты, выдается диспетчеру параллельно с информацией от БПЛА. Если система АГК [112] шахты не функционирует, то информация выдается только от БПЛА.

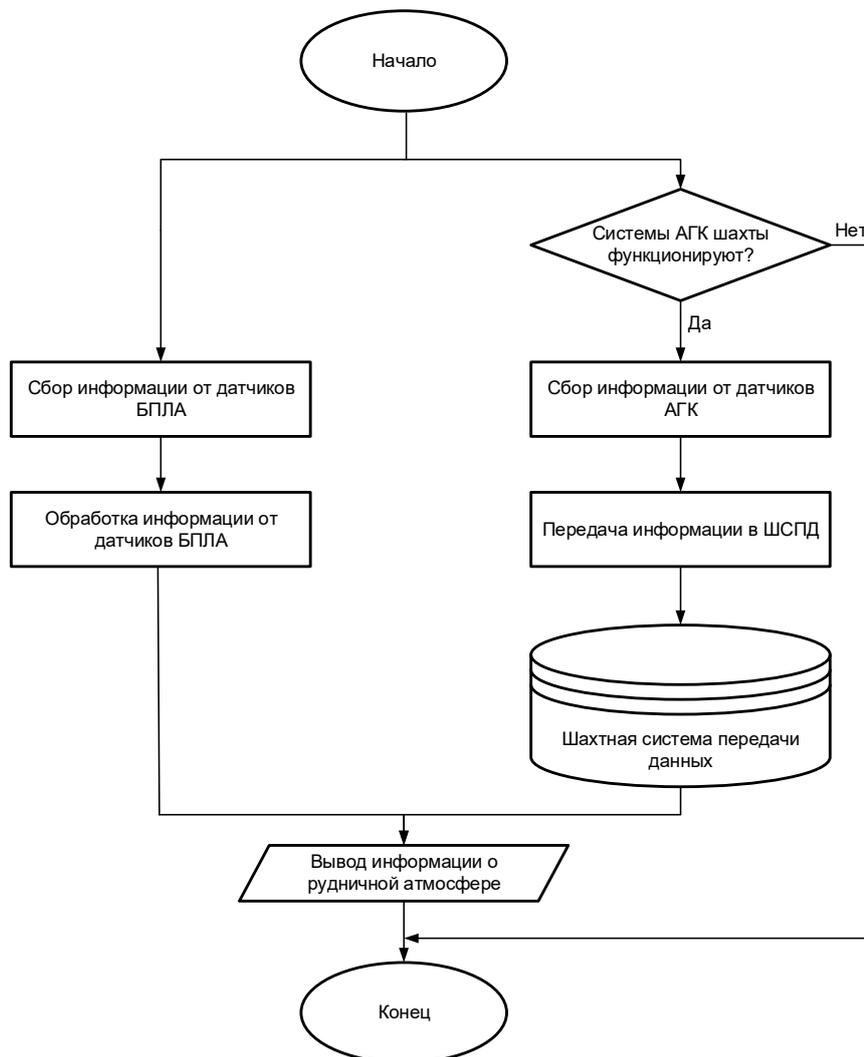


Рисунок 5.6. Блок-схема алгоритма получения информации о составе рудничной атмосферы

#### 5.4. Формирование сети передачи данных в автоматизированной системе шахтного робототехнического мониторинга

Сети передачи данных, построенные по технологии *Wi-Fi*, в классе *WLAN*-сетей [9; 14; 17; 48; 73], позволяют выполнять высокоскоростную передачу данных по беспроводному каналу связи с производительностью передачи данных не менее 30 Мбит/с.

*WLAN (Wireless Local Area Networks)* – беспроводные локальные сети, стандарт *IEEE 802.11*, основные технологии – *Wi-Fi*. Основная частота 2,4 или 5 ГГц, ширина канала - до 160 МГц, скорость передачи данных - от 11 Мбит/с до 6,77 Гбит/с, расстояние между узлами – до 200 м.

Сети *WLAN* на основе единой инфраструктуры связи позволяют увеличивать свои функциональные возможности, так, система «*SBGPS*» производства компании «ГРАНЧ» [72], используя эту технологию, обеспечивает кроме функций аварийного оповещения и позиционирования доступ в Интернет любых серийных мобильных взрывобезопасных устройств непосредственно из шахты [51; 52; 66]. Кроме того, согласно [34; 62; 70] позволяет обеспечить связь поверхности с любым оборудованием, работающим в шахте.

Зарубежные компании *CISCO* и *Becker GmbH* предлагают аналогичные решения систем связи для рудников и угольных шахт [78; 85; 101], с возможностью позиционирования по не менее чем 6 тысячам меток с частотой опроса не менее 6 Мбит/с.

В конце 2016 года ООО НПФ «Гранч» г. Новосибирск провело успешные испытания видеоустройства *SBGPS MPhone-2VIR*, которое позволяет обнаруживать и идентифицировать предметы и инфраструктурные объекты сквозь сильную задымленность, отсутствие света людей и других источников тепла, а также выполнять запись видеоизображения в инфракрасном спектре, воспроизводить и передавать эти видеозаписи на поверхность. Испытания признаны успешными, что позволяет надеяться на использование данного устройства при компоновке шахтного робототехнического комплекса.

В августе 2017 года в условиях шахтоуправления «Комсомолец» «Шахта Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс» при участии отделений Оперативного ВГСВ и специалистов ООО НПФ «Гранч» проводились испытания мобильного комплекса информационного обеспечения спасательных операций в составе:

- мобильный командный пункт в виде переносного вычислительного устройства;
- пять мобильных *SBGPS Master-06-WRM*;
- четыре переговорных устройства *SBGPS MPhone-2VIR*.

Для целей проверки работоспособности в шахтных условиях мобильного комплекса информационного обеспечения спасательных операций в горных выработках была проведена установка данного оборудования. На восходящей наклонной выработке – главном квершлага нулевого горизонта на расстоянии 10 – 15 метров от сопряжения с восточным полевым магистральным штреком горизонта был установлен командный мобильный пункт. Вдоль полевого штрека на расстоянии порядка 100 м друг от друга были установлены пять мобильных станций *SBGPS Master-06-WRM* для организации сети передачи данных и для организации голосовой связи установлены четыре переговорных устройства *SBGPS MPhone-2VIR*.

Испытаниями проверялось: качество голосовой связи между личным составом, находящимся в шахте и поверхностью, а также между собой; возможность качественной передачи на поверхность и командный пункт видеоматериалов с тепловизионной камеры в инфракрасном диапазоне и изображений с камеры видимого диапазона спектра.

Испытания в условиях, имитирующих максимальную задымленность, показали достаточное качество передачи данных и видеоизображения при скорости передачи данных порядка 10 Мбит/сек. Также удовлетворительным оказалось и качество связи с поверхностью. На рисунке 5.7 приведен видеокадр, полученный от тепловизионной камеры и переданный на поверхность по выстроенной в шахтных выработках сети передачи данных.

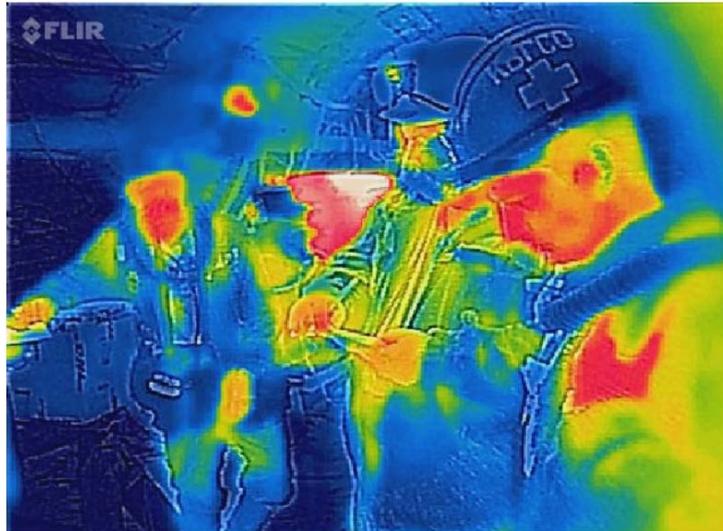


Рисунок 5.7. Видеокадр от тепловизионной камеры

Многофункциональная система связи, наблюдения, оповещения и поиска людей, застигнутых аварией «*SBGPS*», предназначена для:

- определения местоположения персонала, транспорта и доставляемых грузов;
- определения скорости и направления движения персонала и транспорта;
- оповещения с подтверждением доставки адресату и поиска людей, застигнутых аварией;
- обеспечения персонала мобильной телефонной связью, передачи видео и аудио данных и данных телеметрии от оборудования, совместимого с системой;
- сканирующего динамического контроля объемных долей опасных и/или вредных газов и кислорода в воздухе рабочей зоны и подачи сигнализации при выходе их значений за установленные пределы;
- применения элементов навигации при выводе людей из аварийных зон согласно плана ликвидации аварии; оперативного контроля соответствия технологических процессов заданным параметрам [72].

В апреле 2019 года в условиях нормального технологического процесса в горных выработках околоствольного двора шахты им «С.М. Кирова» АО «СУ-ЭК-Кузбасс» были проведены испытания технологии подземной навигации, созданной на основании интеграции программного комплекса «Вентиляция 2» и

системы позиционирования «*SBGPS*», осуществляющий непрерывно в реальном времени определение местоположение человека в шахте с точностью позиционирования  $\pm 4\text{м}$  и имеющей дублирующие каналы связи, реализуемые технологиями *Ethernet* (ВОЛС и/или *SBNI*) и *Wi-Fi* (протокол *IEEE 802. 11 b/g/n/i*). Порядок проведения эксперимента представлен в документе «Протокол проведения испытаний технологии подземной навигации от 15.05.2019г.» в Приложении П.3. Решением представленного Протокола п.3.4. было принято:

«Предусмотреть использование технологии подземной навигации для организации получения достоверной информации об аварийной обстановке в горных выработках с помощью технологий роботизированных автономных беспилотных авиационных систем (БАС) для управления траекторией движения БАС по заданному маршруту в шахтных условиях, оснащенных соответствующим приборным обеспечением для проведения контроля состава рудничной атмосферы и передачи данных на поверхность».

### **5.5. Технические предложения на создание шахтного БПЛА**

Проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые ограничительные требования к созданию шахтного БПЛА. Физически допустимые ограничения БПЛА [35] обусловлены тремя основными факторами:

- габаритный размер БПЛА ограничен «снизу» размером винтов, который в свою очередь связан с подъемной силой. Для недопущения перехлеста винтов БПЛА, отношение габаритного размера к мощности должно превышать  $1,2 \text{ мм/Вт}$ .
- подъемная сила, создаваемая винтами, однозначно связана с общей массой аппарата и мощностью двигателя; полет может быть обеспечен, если отношение общей массы аппарата к общей мощности двигателей более  $4 \text{ г/Вт}$ ;

- электропроводность медных проводников и плотность меди, что создает ограничение при создании двигателей и силовой части системы управления. Токи могут достигать от 2 до 200 А, для малых и больших аппаратов соответственно, при этом отношение массы двигателя к его мощности составляет 6 – 9 г/Вт, а отношение массы системы управления двигателями к мощности составляет 0,25 – 1,2 г/Вт для больших и малых аппаратов соответственно;

На рисунке 5.8 показаны размеры сечения типичной выработки в угольной шахте для пролета БПЛА.

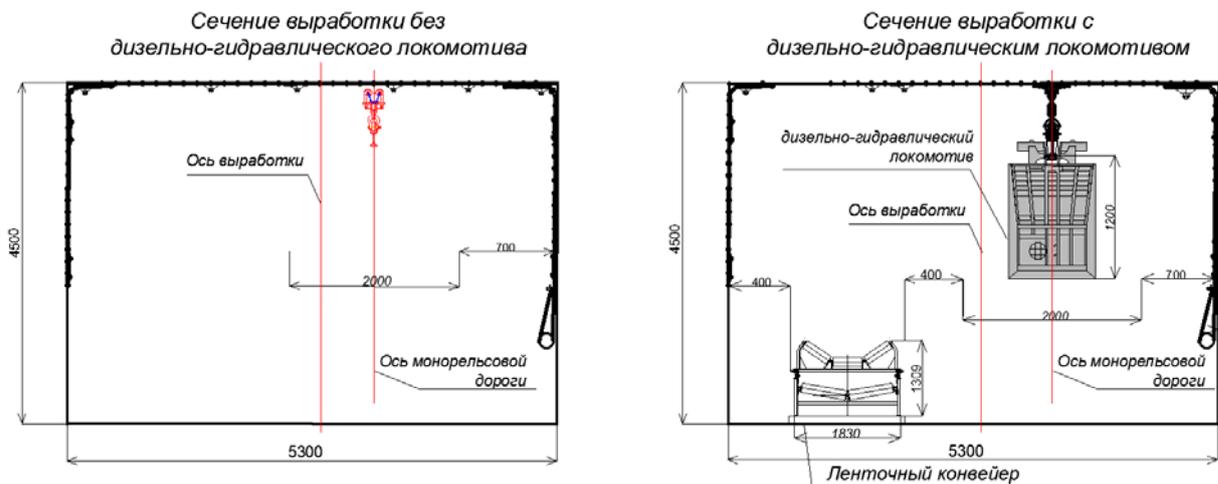


Рисунок 5.8. Размеры сечения выработки для пролета БПЛА

Распределение массы отдельных элементов БПЛА имеет различную структуру для больших и малых БПЛА. Так, для малых аппаратов основная доля в общей массе приходится на корпус и систему управления, включая силовой блок, а для больших аппаратов, основная доля в общей массе приходится на полезную нагрузку.

Анализ, основанный на физических и геометрических закономерностях, показывает, что:

1. Теоретически допустимый предел создания сферического БПЛА для угольных шахт (сферическая защита и искрозащищенность) лежит в области следующих ТТХ:

- диаметр БПЛА около 50 мм;
  - общая масса 1200 г;
  - потребляемая мощность 40 Вт;
  - масса полезной нагрузки 600 г.
2. Масса полезной нагрузки 600 г допускает использование микрокамер и датчиков температуры и сенсоров газоанализаторов.
3. При создании корпусных деталей с целью снижения их массы целесообразен подбор композитных материалов с высоким отношением их прочности к плотности, а при производстве внешней части корпуса - использование пространственно-ориентированных конструкций (ячейки, фермы, и т.п.), созданных на 3D принтерах.

Наличие в угольных шахтах монорельсовых подвесных и напочвенных реечных дорог позволяет использовать дизельно-гидравлический локомотив (ДГЛ), изображенный на рисунке 5.9, для оперативной доставки БПЛА до требуемой точки, а также осуществлять 3D съемку выработок перемещая многофункциональную нагрузку для мониторинга. Использование ДГЛ позволит быстро перемещать «тяжелую» многофункциональную нагрузку внутри шахты для мониторинга, обследования горных выработок, а также точно позиционировать свое расположение в шахте.



Рисунок 5.9. Дизельно-гидравлический локомотив

В главе 4 экспериментальным способом были получены данные тормозного пути БПЛА в зависимости от вариации массы полезной нагрузки при скоростях БПЛА 6 м/с и 10 м/с при массе самого БПЛА 0,6 кг. По данным таблиц 5.2, 5.3, 5.4 проведено сравнение тормозного пути и дальности зрения, установленного на борту технического зрения. Сравнение показателей представлено в таблицах 5.5 и 5.6

Таблица 5.5.  
Сравнение тормозного пути и дальности СТЗ при различных технических зрених (масса БПЛА 0,6 кг, скорость 10 м/с)

№	Средство технического зрения	Масса, кг, <i>m</i>	Дальность зрения, м, <i>S</i>	Тормозной путь из экп, м, <i>S*</i>
1.	Пассивная (без ИК и лазерной подств.) с 1 кам.	0,05	250	4,7
2.	Активная с инфракрасной подств.	0,08	100	5,1
3.	Активная с лазерной структурированной подств.	0,1	120	5,25
4.	Пассивная (без ИК и лазерной подсветки) с 2 кам.	0,1	300	5,25
5.	Лидарная сис.техн.зр, малая	0,1	300	5,25

Таблица 5.6.  
Сравнение тормозного пути и дальности СТЗ при различных технических зрених (масса БПЛА 0,6 кг, скорость 6 м/с)

№	Средство технического зрения	Масса, кг, <i>m</i>	Дальность зрения, м, <i>S</i>	Тормозной путь из экп, м, <i>S*</i>
1.	Пассивная (без ИК и лазерной подств.) с 1 кам.	0,05	250	4,6
2.	Активная с инфракрасной подств.	0,08	100	4,8
3.	Активная с лазерной структурированной подств.	0,1	120	5,1
4.	Пассивная (без ИК и лазерной подств.) с 2 кам.	0,1	300	5,1
5.	Лидарная сис.техн.зр, малая	0,1	300	5,1

Ввиду значительного различия величины тормозного пути от дальности зрения, БПЛА способен отреагировать на внезапное препятствие за доли секунды, таким образом обеспечены информационно-двигательные действия.

### **Выводы по главе 5**

В главе проведен анализ и обоснован выбор различных современных средств технического зрения, предназначенных для оценки состояния горных выработок, а также миниатюрных средств определения состава рудничной атмосферы. Представлено обоснование выбора робототехнических средств доставки приборов мониторинга.

На основании проведенного анализа существующих технических средств доставки, технического зрения и сенсоров газового состава сформулированы ограничения на создание шахтного БПЛА. Рассмотрены платформы БПЛА, такие как *3DR IRIS*, которые могут быть положены в основу создания шахтного летательного аппарата.

Задача проектирования и производства БПЛА для полета в шахтных условиях является реальной. Продолжительность полета при суммарном весе аппарата до 2,5 кг, с габаритами 500мм в диаметре и полезной нагрузкой до 0,6 кг равняется примерно 20 минутам, температура эксплуатации аппарата при длительном времени пребывания, не более 50 °С. Дальность полета в условиях затемненности и замкнутого пространства может достигать до 1500- 4000 метров. Имеется реальная возможность трансляции видео с места полета, а также фиксирование и анализ параметров окружающей обстановки, препятствий и местоположения людей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

В диссертационном исследовании представлена разработанная концепция использования беспилотных летательных аппаратов для создания автоматизированной системы информационной поддержки горноспасательных служб во время проведения аварийно-спасательных работ в шахтах, путем предоставления информации о наличии людей в аварийном пространстве шахтных выработок, поставарийном состоянии шахтных выработок и характеристик состава рудничной атмосферы, что является решением одной из задач научно-технической проблемы в области автоматизации и управления технологическими процессами горного производства. Оперативное получение информации о состоянии горных выработок на аварийном участке с помощью БПЛА позволит не только снизить риск для жизни и здоровья шахтеров и горноспасателей, но и качественно повысить эффективность ведения спасательной операции.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана структура автоматизированной системы мобильного мониторинга шахтной атмосферы и информационной поддержки горноспасательных частей с использованием БПЛА, которая позволяет более обоснованно принимать решение о выдвижении горноспасателей в зону аварийных выработок.

2. Разработана математическая модель движения БПЛА, которая использована как объект управления при синтезе автоматической системы автономного движения БПЛА в шахтных условиях по заданному маршруту.

3. Синтезирована структура системы автоматического управления автономным движением БПЛА, в которой алгоритмически формируется кратчайшая целевая траектория движения как функция задания, выполняются координатные преобразования и формируются управляющие воздействия на приводы БПЛА.

4. Выполнено компьютерное моделирование целевого траекторного движения БПЛА, определены рациональные параметры регуляторов системы,

определены показатели качества управления, подтверждена работоспособность разработанной системы автоматического управления движением;

5. Выполнен анализ современных средств оснащения БПЛА для решения задач сбора и передачи данных об обстановке в аварийной горной выработке, который позволил определить требования к аппаратному обеспечению шахтного беспилотного летательного аппарата, используемого в автоматизированной системе информационного обеспечения горноспасательных частей.

Идея и концепция создания автоматизированной системы информационной поддержки горноспасательных служб с использованием в качестве инструментального средства беспилотных летательных аппаратов с целью снижения риска при мониторинге и обследовании подземных выработок в штатных и аварийных ситуациях поддержаны АО «СУЭК» и Министерством РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий как актуальные и целесообразные, что подтверждается соответствующими документами, представленными в Приложении П.3. Работы, связанные с формированием автоматизированной системы информационной поддержки ВГСЧ, признаны перспективными в структуре многофункциональной системы безопасности угольных шахт [8; 19; 77].

Перспективным направлением развития данной работы является исследование возможности использования группы БПЛА для решения задач информационного обеспечения горноспасательных служб, а также более детальная проработка функционала системы для ее использования в штатных условиях и решения технологических задач по обследованию шахт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищев. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — 736 с.
2. Айруни А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с.: ил., табл. Серия «Библиотека горного инженера». Т.9 «Рудничная аэрология». Кн. 2.
3. Ананьев П.П., Мещеряков Р.В., Костеренко В. Н., Ким М.Л., Концевой А.С. Управление РТК для мониторинга и обследования подземных выработок// Прогресс транспортных средств и системы-2018: Материалы международной научно-практической конференции. Волгоград, 2018 г. – С. 164-165.
4. Артемьев В.Б., Колесниченко И.Е., Черечукин В.Г. Горноспасательное дело: Учеб. Пособие / Шахтинский ин-т ЮРГТУ, ОАО «СУЭК» - Ростов н/Д: Изд-во НМЦ «Логос», - 2008. – 186 с.
5. Белинская Ю.С., Четвериков В.Н. Управление четырехвинтовым вертолетом // Наука и образование. М.: Изд-во МГТУ. 2012, С. 157-171.
6. Белинская Ю.С. Реализация типовых маневров четырехвинтового вертолета. Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. №4. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/551872.html> (дата обращения 20.04.2014).
7. Белоконь С.А. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь [и др.]. Автометрия, № 5, 2012, С. 32-41.
8. Ваганов В.С. Многофункциональные системы безопасности, применяемые при производстве горных работ / В.С. Ваганов // Горная Промышленность. - 2014. - №3 (115). - с.25.
9. Ваганов В.С., Урусов Л.В. Анализ способов организации сетей передачи данных для построения современных МФСБ в угольных шахтах // Научно-технический журнал ВЕСТНИК Технологические вопросы безопасности горных работ, № 3-2016, с 72-81

10. *Величенко В.В., Волкова И.И.* Математическое моделирование движения сложных механических систем методом управляющих реакций связей // Динамика управляемых систем. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1979. С. 72-75.
11. *Волобуев М.Ф., Замыслов М.А., Михайленко С.Б., Орлов С.В.* Методика оценки точности автоматической системы посадки самолета в условиях воздействия случайных возмущений // Сборник докладов XII МНТК «К и ВТ XXI века», том 2. Воронеж, НПФ «САКВОЕЕ», 2011. 878 с.
12. *Воробьева О.В., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н.* Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. - №12 (специальный выпуск 61). – 16 с. – М.: Издательство «Горная книга»
13. *Вылегжанин В.Н., Мазикин В.П., Хомченко В.Н.* Проектирование шахт. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2000. – 112 с.
14. *Гайкович Г.Ф.* Стандартизация в области промышленных сетей. Развитие беспроводных стандартов для АСУ ТП / Г.Ф. Гайкович // Электронные компоненты. - 2009. - №1. - с. 48.
15. *Голубев Ю.Ф.* Основы теоретической механики, 2-е изд., М.: Изд-во МГУ. 2000. 720 с.
16. *Горлов Ю.В.* Анализ действующих в угольных шахтах систем локализации взрывов и оценка эффективности их применения, М – 2014. – 91 с.
17. ГОСТ Р ИСО 15745-4-2012. – «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Прикладная интеграционная среда открытых систем. Часть 4. Эталонное описание систем управления на основе стандарта Ethernet». – ОКС: 25.040.40. – Действует с 01.01.2012. – 503 с.
18. *Ефремов П.В., Попов К.А., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Слепцов О.И.* Обработка и анализ данных дрона для мониторинга линейных объектов, эксплуатирующихся на севере // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 10-2. – С. 238-239.
19. *Жуков М.О.* Система наблюдения и оповещения персонала угольных шахт. Состояние и перспективы развития. / М.О. Жуков А.Е. Иванов А.В.

- Мацко И.В. Меркулов Б.В. Нарымский // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. - 2013. - Т.18. - с.107.
20. *Зенкевич С.Л., Галустян Н.К.* Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №11. С. 774-782.
  21. *Зенкевич С. Л., Галустян Н. К.* Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 27-32.
  22. *Зенкевич С.Л., Галустян Н.К.* Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 8. С. 530-535.
  23. *Зенкевич С.Л., Галустян Н.К.* Угловая стабилизация квадрокоптера // Экстремальная робототехника: сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2012. С.164-171.
  24. *Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.* Основы управления манипуляционными роботами, М.: Изд-во МГТУ, 2004, 480 с.
  25. *Иванов В.А., Медведев В.С.* Математические основы теории оптимального и логического управления, М.: Изд-во МГТУ, 2011, 599 с.
  26. Ильма | Датчики для шахт и системы сбора данных [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://ilma-mk.ru/product-category/datchiki-i-apparatura-radiomonitoringa/>
  27. *Канатников А.Н., Крищенко А.П., Ткачев С.Б.* Допустимые пространственные траектории беспилотного летательного аппарата в вертикальной плоскости. Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/367724.html> (дата обращения 17.04.2014).
  28. *Карташов Б.А., Козлов О.С., Шабаетов Е.А., Щекатуров А.М.* Среда динамического моделирования технических систем SimInTech, М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2017, 424 с.
  29. *Ким М.Л.* Автоматизированная информационная система горноспасательных частей на основе беспилотных летательных аппара-

- тов//Экстремальная робототехника: Сборник тезисов 30-й Международной научно-технической конференции (13-15 июня 2019 г., г. Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург, 2019. – С. 287 – 288.
30. *Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д.* Особенности применения БАС в угольных шахтах // Горная промышленность. — 2019. — №3 (145). – С. 88 – 90.
  31. *Ким М. Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д., Ярыгин А.А.* Разработка системы автоматического управления маршрутным движением беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях. // Уголь. — 2020. — №10. — С. 22 – 27.
  32. *Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д., Мецзяков Р.В., Концевой А.С.* Система автоматического управления траекторным движением шахтного беспилотного летательного аппарата // Горная промышленность. –2019. – №3 (145). – С. 60-65.
  33. *Ким М.Л., Родичев А.С., Певзнер Л.Д., Платонов А.К.* О возможности использования мобильных робототехнических летательных аппаратов при выполнении оперативного плана ликвидации аварии на шахтах // Уголь. – 2018. - №1. – С. 34-38.
  34. *Клебанов В.Ф.* Воздух в шахте / под ред. А.Д. Рубана. – М. : Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011– 576 с.
  35. *Конурич А.И., Денисова Е.В., Хмелинин А.П.* Основные проблемы и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для обследования выработочного пространства при подземной разработке месторождений. Ж-л «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук», Изд-во: Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Том 1, № 3, 2016, С. 93- 97
  36. *Костеренко В.Н., Тимченко А.Н.* Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. - №7 – С368 – 377
  37. *Кочкаров А.А.* Современная инженерия малых беспилотных летательных аппаратов и особенности их сетевого взаимодействия // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 1-й Международной

- конференции (8-9 февраля 2018 г., Москва). — М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018. —С. 113- 121. — URL: <http://keldysh.ru/future/2018/17.pdf> doi:10.20948/future-2018-17
38. *Лебецки К.А., Романченко С.Б.* Пылевая взрывоопасность горного производства / К.А. Лебецки, С.Б. Романченко. — М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. — 464 с., табл., ил. — (Библиотека горного инженера. Т.6 «Промышленная безопасность». Кн.10).
  39. *Лещинская Д.Ю.* Разработка транспортного робототехнического комплекса с адаптивными двигателями // Научно-образовательное соревнование молодых исследователей «Шаг в будущее, Москва»: сборник лучших работ. — 2017, С 429-541.
  40. *Лилов Л.К., Чириков В.А.* Об уравнениях динамики систем взаимосвязанных тел//ПММ, 1981, Т.45, №3, С. 525-534.
  41. *Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Гарцев И.Б., Евстигнеев Д.В., Колядин К.С.* Интеллектуальная система управления автономным беспилотным летательным аппаратом//Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006, С. 141-143.
  42. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В.* и др. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти // Авиакосмическое приборостроение. 2002. №2. С. 29-42.
  43. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Евстигнеев Д.В.* Интеллектуальная система управления автоматической посадкой беспилотного летательного аппарата на основе комплексного применения технологии нечеткой логики // Новые методы управления сложными системами. Москва, Наука, 2004.
  44. *Малкин А.С.* Разработка методов поэтапного проектирования оптимизации параметров и интегральной оценки проектов угольных шахт. - Дисс. докт. техн. наук. —М.: МГИ, 1972.
  45. *Малкин А.С., Пучков Л.А., Саламантин А.Г., Еремеев В.М.* Проектирование шахт. — М.: Издательство Академии горных наук, 2000. — 375 с.

46. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения [Электронный ресурс]. URL: [rtc.ru/media/images/docs/book/morskie.pdf](http://rtc.ru/media/images/docs/book/morskie.pdf)
47. Морская робототехника [Состояние, проблемы, пути развития] [Электронный ресурс]. URL: [https://portnews.ru/upload/basefiles/1813\\_pkpachtrapl-popgpo.pdf](https://portnews.ru/upload/basefiles/1813_pkpachtrapl-popgpo.pdf)
48. *Мощевикин А.П.* Исследование скорости передачи данных в беспроводных сетях *Nanonet*. /А.П. Мощевикин//Беспроводные технологии. - 2006. - №3. - С.38.
49. МЧС России | Пожарная техника [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mchs.gov.ru/document/219077>
50. МЧС России |Военизированные горноспасательные части [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/uchrezhdeniya-mchs-rossii/spasatelnye-podrazdeleniya/voenizirovannye-gornospasatelnye-chasti>
51. *Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В.* Многофункциональная система безопасности угольных шахт –практика применения систем определения местоположения и оповещения персонала // Горная промышленность. – 2018. – № 2. – С. 93-98.
52. *Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В.* МФСБ связь, оповещение и определение местоположения персонала в угольных шахтах // Горная промышленность. – 2019. – № 1. – С. 37-40
53. НПЦ АТБ | Датчик горючих газов интеллектуальный стационарный ИТС 1 Режим доступа: <http://www.npcatb.ru/ru/statsionarnye-pribory/datchik-statsionarnyj-its-1>
54. Опыт предотвращения взрывов и тушение пожаров на шахтах Кузбасса / А.И. Петров, А.С. Голик, Д.Ю. Палеев и др. М.: ЦНИЭИуголь, 1984. С. 52.
55. *Павловский В.Е., Савицкий А.В.* Исследование обратной задачи для вычисления управляющих воздействий для квадрокоптера// Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 17. 20 с. doi:10.20948/prepr-2017-17 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-17>

56. *Палеев Д.Ю.* Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко, И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов.-М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 160с. : ил., табл. – (Библиотека горного инженера. Т.6 «Промышленная безопасность». Кн.2).
57. *Певзнер Л.Д.* Теория автоматического управления. Задачи и решения: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 604 с.
58. *Певзнер Л.Д.* Теория систем управления Учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 424 с.
59. *Певзнер Л.Д., Ким М.Л.* Робототехника в горном деле//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. - №1 – С. 240-251.
60. *Певзнер Л.Д., Ким М.Л.* Робототехнические средства и системы для решения задач ликвидации аварий в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. - №S1 – С. 215-223.
61. *Певзнер Л.Д., Ким М.Л., Полуэктов Д.С.* Моделирование движения беспилотного летательного аппарата в условиях подземных шахтных выработок//Труды Международной конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации-2018», Алушта. – С. 255-257.
62. ПЕРГАМ | Квадрокоптер *Flyability Elios* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pergam.ru/catalog/bpla/indoordrones/flyabilityelios.htm#specification>
63. *Петрухин П.М., Качай В.Н.* Теоретические основы пылевзрывозащиты способами, основанными на применении воды // Труды МакНИИ «Безопасность труда в угольных шахтах». Т. XXII. М.: Недра, 1972., С. 89-104.
64. *Погорелов Д.Ю., Дмитроченко ОН.* Модификации метода отдельных тел для синтеза и решения уравнений движения систем тел // Тез. докл. междунар. конф. стран СНГ «Молодые учёные – науке, технологиям и профессиональному образованию». – М.: 2000, ч.3, - С. 87-90.

65. Подготовка инфраструктуры шахты для внедрения системы локального позиционирования и голосовой связи *RealTrac*. Блог фирмы «RTL-сервис». - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/rtl-service/blog/301224/>.
66. *Попов В., Федутинов Д.* Тенденции развития систем передачи данных при использовании БЛА // ЗВО № 4, 2006. С. 47-51.
67. *Потемкин В.Г.* Введение в *Matlab* [Электронный ресурс]. — М. : *Soft-line Co*, 2001. — Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php>, свободный. – Загл. с экрана.
68. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах / П. М. Петрухин, М. И. Нецепляев, В. Н. Качан и др. М.:Недра, 1974.304 с.
69. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А. Е. Умнов, А.С. Голик, Д.Ю. Палеев и др. М.: Недра, 1990., 286 с.
70. *Пыркин А.А.* Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели / А.А. Пыркин [и др.] // СПб.: Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 47-51.
71. *Рэндал У.Биард, Тимоти У.МакЛэйн.* Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
72. Система *SBGPS*. Руководство по эксплуатации / Новосибирск: НПФ «ГРАНЧ». - 2013.
73. Система многофункциональной связи «ИСЕТЬ» (СМС «ИСЕТЬ»). Руководство по эксплуатации. ИМ.091000.001.00 РЭ ООО «ИНТЕЛМАЙН». / Екатеринбург. - 2014.
74. Специализированный портал о робототехнике, роботах и дронах | Спасая наши жизни. Роботы спасатели в помощь людям. [Электронный ресурс]. URL: [https://robotics.ua/shows/modernity/1013-saved\\_our\\_lives\\_rescue\\_robots\\_to\\_help\\_people](https://robotics.ua/shows/modernity/1013-saved_our_lives_rescue_robots_to_help_people).
75. ТР ТС 012/2011 О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах, 2011. – 33с

76. *Ушаков К.З.* Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело / Н.О Каледина, Б.Ф. Кирин, и др. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2008. – 247 с.
77. ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ «ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ», Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 ноября 2013 г. N 550, Зарегистрировано в Минюсте России 31 декабря 2013 г. N 30961
78. *Foerste Томас.* Беспроводная платформа локализации мобильных объектов компании Nanotron для горнодобывающей промышленности / *Thomas Foerste, Т. Кривченко* // Беспроводные технологии –2014 – № 3 – С. 66.
79. ЦНИИ РТК | Макет многофункционального мобильного робота «ЗМЕ-ЕЛОК-2» [Электронный ресурс].  
URL: <http://www.rtc.ru/ru/nazemnaya-robototekhnika/zmeelok-2>
80. ЦНИИ РТК | Малогабаритный разведывательный робот «Кадет» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rtc.ru/ru/nazemnaya-robototekhnika/kadet>
81. ЦНИИ РТК | Мобильный малогабаритный робот «ЮЛА-Н» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rtc.ru/ru/nazemnaya-robototekhnika/yula-n>
82. Шахтэксперт-Системы | Программный продукт «Вентиляция 2» [Электронный ресурс]. URL: <https://minesoft.ru/cooling/>
83. Эталон | Многозонный цифровой датчик температуры МЦДТ 1201 [Электронный ресурс] Режим доступа:  
[http://www.omsketalon.ru/?action=mcdt\\_1201](http://www.omsketalon.ru/?action=mcdt_1201)
84. Ясюченя С.В. Обоснование рациональных параметров технологических систем высокопроизводительных угольных шахт. – Автореф. дисс. канд. техн.наук. – Кемерово: Институт угля и углехимии РАН, 2007. – 19 с.
85. *Becker Mining Systems.* — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ru.becker-mining.com/>.
86. *Buchholz T. T., Gretarsson D.* Construction of a Four Rotor Helicopter Control System: S.M. Thesis. Technical University of Denmark. 2009.158 p.

87. *Cutler M.* Design and control of an autonomous variable-pitch quadrotor helicopter: master of science thesis. MIT. 2012. 106 p.
88. *Cutler M., How J. P.* Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC), Minneapolis, Minnesota. 2012. 13 p.
89. *Daewon Lee, H. Jin Kim, Shankar Sastry.* Feedback Linearization vs. Adaptive Sliding Mode Control for a Quadrotor Helicopter. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2009/
90. *Dijkstra's algorithm* [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. — Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm) (дата обращения 20.05.2019).
91. *Dikmen I.C., Arisoy A., Temeltas H.* Attitude control of a quadrotor. 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009. Pp. 722-727.
92. DL | Квадрокоптер *Mavic Air* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dji.com/ru/mavic-air>
93. *Dormand, J. R. and P. J. Prince.* A family of embedded Runge-Kutta formulae. J. Comp. Appl. Math., Vol. 6, 1980, pp. 19–26.
94. *ELEKTRONIK TIDNINGEN | Den vill flyga ensam i gruvan* [Электронный ресурс]. URL: <http://etn.se/index.php/63981>
95. IZ.ru | Российский робот научился «видеть» радиацию [Электронный ресурс]. URL: <https://iz.ru/news/654274>
96. *Jack Connor, Mehdi Seyedmahmoudian, Ben Horan.* "Using particle swarm optimization for PID optimization for altitude control on a quadrotor", Universities Power Engineering Conference (AUPEC) 2017 Australasian, pp. 1-6, 2017.
97. *Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V. Towards.* A Swarm of Agile Micro Quadrotors // GRASP Lab, University of Pennsylvania, 2013. 8 p.
98. *Lee T., Leok M., McClamroch N., et al.* Control on complex maneuvers for a quadrotor UAV using Geometric Methods on SE(3) // Optimization and Control. 2011. 8 p.

99. *Lee T., Leok M., McClamroch N., et al.* Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3) // 49th IEEE Conference on Decision and Control. 2010. P. 5420–5425.
100. *Luukkonen T.* Modelling and Control of Quadcopter. School of Science, Espoo, August 22, 2011. P. 26. Режим доступа: [http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11\\_public.pdf](http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf) (дата обращения 16.05.2019).
101. Materials and Mining. Электронный ресурс компании CISCO. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/materials-mining.html>.
102. *Mellinger D., Kumar V.* Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors // GRASP Lab, University of Pennsylvania. 2011. 6 p.
103. Мipex | МIPEX-02 Режим доступа: <https://mipex-tech.com/catalog/mipex-02/>
104. Мipex | МIPEX-03 Режим доступа: <https://mipex-tech.com/catalog/mipex-03/>
105. Мipex | МIPEX-04 Режим доступа: <https://mipex-tech.com/catalog/mipex-04/>
106. *Muhamed Kuric, Bakir Lacevic, Nedim Osmic, Adnan Tahirovic.* "RLS-based fault-tolerant tracking control of Multirotor Aerial Vehicles", Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 2017 IEEE International Conference on, pp. 1148-1153, 2017.
107. *Prahlad Vadakkepat, Tze Chiang Chong, Willson Amalraj Arokiasami, Xu Weinan.* «Fuzzy Logic Controllers for navigation and control of AR. Drone using Microsoft Kinect», Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) 2016 IEEE International Conference on, pp. 856-863, 2016.
108. ROBOTICS TOMORROW | [Электронный ресурс].  
URL:<https://www.roboticstomorrow.com/article/2015/08/gemini-scout-mine-rescue-robot/6675>
109. Simultaneous localization and mapping [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. — Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous\\_localization\\_and\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping) (дата обращения 28.09.2019).

110. SINTEF | [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sintef.no/en/digital/departments/applied-cybernetics/projects/our-snake-robots/anna-konda-the-fire-fighting-snake-robot/>
111. Wang J., Nian X., Wang H. Consensus and formation control of discrete-time multi-agent systems // Journal of Central South University of Technology. 2011. Vol. 18, № 4. P. 1161–1168
112. WiPAN краткое описание системы. Davis Derby. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.davisderby.com/>.
113. 3DNEW | Российский робот «ДУС» может летать, передвигаться по снегу и водной глади [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/941971>

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П. 1. Назначение, особенности и технические характеристики колесных, гусеничных, подводных и летательных робототехнических средств

#### РТК на колесном шасси

Особенности:

- Применение в составе шасси колесно-шагающей ходовой системы;
- Применение индивидуальных приводов колес;
- Применение телеманипуляторов;
- Использование манипулятора с шестью степенями подвижности;
- Наличие универсального интерфейсного модуля для подключения разнотипного навесного электромеханического навесного оборудования;
- Возможность установки кабельного барабана, осуществляющего следящую размотку оптоволоконного кабеля для организации связи и передачи сенсорной информации;
- Возможность модульной замены элементов конструкции в полевых условиях.

Таблица П1.1.

Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная гарантируемая грузоподъемность манипулятора, кг	15
Количество степеней подвижности манипулятора	6
Максимальная глубина преодолеваемой водной преграды, мм	400
Максимальная высота преодолеваемого порогового препятствия, мм	400
Максимальная скорость передвижения, км/ч	5
Дальность управления по радио (кабелю), м	1500 (1800)
Максимальное время непрерывной работы, ч	4

#### Шахтный РТК

Особенности:

- Применение шасси уникальной «ломающейся-сочлененной» схемы;

- Применение индивидуальных приводов колес;
- Взрывобезопасное исполнение;
- Наличие универсального интерфейсного модуля для подключения различного навесного электромеханического навесного оборудования;
- Возможность установки кабельного барабана, осуществляющего следящую размотку оптоволоконного кабеля для организации связи и передачи сенсорной информации;
- Возможность модульной замены элементов конструкции в полевых условиях.

Таблица П1.2.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная грузоподъемность шасси, кг	50
Максимальная глубина преодолеваемой водной преграды, мм	400
Высота преодолеваемого порогового препятствия, мм	500
Максимальная скорость передвижения, км/ч	5
Исполнение	взрывобезопасное
Максимальная дальность управления, м	1500
Максимальное время непрерывной работы, ч	4

**РТК на гусеничном шасси**

Особенности:

- Применение в составе шасси 4-х гусеничной системы, способной осуществлять независимое ротационное движение;
- Применение телеманипуляторов;
- Использование манипулятора с 6 степенями подвижности;
- Наличие универсального интерфейсного модуля для подключения различного навесного электромеханического навесного оборудования;
- Возможность установки кабельного барабана, осуществляющего следящую размотку оптоволоконного кабеля для организации связи и передачи сенсорной информации;

- Возможность модульной замены элементов конструкции в полевых условиях.

Таблица П1.3.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная гарантируемая грузоподъемность манипулятора, кг	25
Количество степеней подвижности манипулятора	6
Максимальная глубина преодолеваемой водной преграды, мм	500
Максимальная высота преодолеваемого порогового препятствия, мм	450
Максимальная скорость передвижения, км/ч	5
Дальность управления по радио (кабелю), м	1500 (1800)
Максимальное время непрерывной работы, ч	4

**Робототехнический комплекс мини класса (шестигусеничная схема)**

Особенности:

- Использование современных композитных материалов;
- Обеспечение плавучести;
- Низкий силуэт и малый вес конструкции;
- Возможность независимого ротационного движения гусеницами;
- Возможность преодоления лестничных маршей.

Таблица П1.4.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная глубина преодолеваемой водной преграды, мм	400
Высота преодолеваемого порогового препятствия, мм	350
Максимальная скорость передвижения, км/ч	4
Исполнение	не взрывобезопасное
Максимальная дальность управления, м	1500
Максимальное время непрерывной работы, ч	4

## Дистанционно управляемая система РТК

Особенности:

- высокая скорость перемещения;
- ведение маркшейдерской съемки,
- ведение инженерной и химической разведки;
- обнаружение пострадавших;
- возможность установки дополнительного оборудования;
- преодоление лестничных маршей шириной более 1,1 м.

Таблица П1.5.

Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная грузоподъемность, кг	10
Масса без дополнительно оборудования, кг	5
Ширина преодолеваемой водной преграды, м	50
Максимальная высота преодолеваемого препятствия, м	50
Габариты Д×Ш×В, мм	1000×900×900
Максимальная скорость передвижения, км/ч	до 60
Исполнение	не взрывобезопасное
Максимальная дальность управления, м	50
Максимальное время непрерывной работы, ч	4

**Малогабаритный робот «Кадет»** предназначен для проведения дистанционного аудио-видео наблюдения в условиях городской и промышленной инфраструктуры, доставки полезной нагрузки

Таблица П1.6.

Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Габаритные размеры, мм	250x215x90
Масса, кг	3
Максимальная скорость перемещения, м/с	1
Дальность управления, м	200
Преодоление препятствий: уклоны, град/ пороги, мм	40/150
Время автономной работы, ч	2

**Мобильный малогабаритный робот «ЮЛА-Н»** предназначен для проведения дистанционного аудио-видео наблюдения в условиях городской и промышленной инфраструктуры

Таблица П1.7.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения	
	MP	MP 4x4
Габаритные размеры, мм	245x110x190	240x110x190
Масса, кг	0,58	1,1
Максимальная скорость движения, м/с	0,4	0,35
Дальность управления: на открытой местности, м	100	100
в условиях городской инфраструктуры, м	50	50
Преодоление препятствий высотой, мм	50	60
Время автономной работы, ч	2	2

**«ЗМЕЕЛОК-2»** предназначен для перемещения по сложным поверхностям и выполнение манипуляций с целью мониторинга в труднодоступных местах.

Таблица П1.8.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Количество модулей	15
Количество степеней свободы	30
Общая масса, кг	3,6
Длина/ Диаметр мм	1050/80
Максимальный момент, кг/см: по оси курса/ по оси тангажа	55/16,5
Напряжение автономного питания, В	6
Управляющий интерфейс	<i>Bluetooth</i>
Время автономной работы, мин.	60
Режим управления	супервизорный

## Подводные РТК

**Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) «Марлин-350»** предназначен для проведения допоиска подводных объектов и выполнения подводно-технических, поисковых, осмотровых и аварийно-спасательных работ в прибрежных или внутренних водах на глубинах до 350 метров.

Таблица П1.9.

### Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная глубина использования, м	350
Дальность обнаружения объектов с радиусом эквивалентным до 0,5 м, м.	75
Скорость хода, м/с: в горизонтальном направлении в лаговом и вертикальном направлениях	1 0,5
Точность автоматической стабилизации: по курсу, град по глубине, м	±5 ±0,5
Масса, кг: надводный блок управления пульт ручного управления ручная кабельная лебедка подводный аппарат ТНПА	85 0,5 100 60
Габаритные размеры, мм: надводный блок управления ручная кабельная лебедка подводный аппарат ТНПА	540x620x880 690x800x730 980x590x400
Длина оптоэлектрического кабеля, м	450
Длина кабеля палубного, м	10

#### Особенности:

- обнаружение подводных объектов с помощью гидролокатора кругового обзора;
- обеспечение видеосъемки морского дна и подводных объектов, а также передачу видеосигнала с подводного аппарата ТНПА в надводный блок управления;
- подводно-технические работы с помощью манипулятора;

**Малый автономный необитаемый подводный аппарат амфибия (АНПА-амфибия)** с возможностью перемещения под водой, по водной поверхности и по суше

Таблица П1.10.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Длина, см.	100-120
Диаметр, см	12
Вес в воздухе, кг	15
Двигатели	Шнековые
Автономность	Не менее 1 часа
Возможность перемещения	под водой, по водной поверхности, по суше

**Летательные РТК**

**БПЛА *Elios*** предназначен для обследования ограниченных пространств и инспекция опасных зон.

Особенности:

- Видео: *HD* 1080, 30 кадров в секунду;
- ИК-камера: *FLIR* 160x120;
- Данные, сохраняются на *SD*-карте, расположенной в дроне;
- При необходимости включаются освещение «вперед» или «вверх».
- Интенсивность освещения может изменяться;
- Вес: 400 г. без батареи; 700 г с батареей;
- Защитная решетка изготовлена из 10-и пятиугольников, которые при необходимости можно заменить, ударопрочность - 4 м/с.

Таблица П1.11.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная скорость передвижения, км/ч	3,6
Дальность передачи сигнала оператору, м	150
Дальность полёта по прямой на одном аккумуляторе, м	600
Вес, кг	0,7
Диаметр защитной решетки, мм	400
Рабочая температура, °С	-10 до +60
Корпус	Пыле- и влагостойкий

**БПЛА *Mavic Air*** предназначен для обследования ограниченных пространств и инспекция опасных зон.

Таблица П1.12.

## Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная скорость передвижения, км/ч	29-68
Максимальная допустимая скорость ветра, км/ч	29-38
Дальность передачи сигнала оператору, м	2 000 / 4 000
Дальность полёта по прямой на одном аккумуляторе, м	10 000 (в штиль)
Вес, кг	0,43
Геометрические размеры, мм	168×184×64
Рабочая температура, °С	0 до +45
Система позиционирования	GPS/ГЛОНАСС

## Особенности:

- дрон с 3-осевым стабилизатором камеры;
- амортизаторы подвеса нейтрализуют вибрации, помогая получать четкие снимки;
- наличие сенсоров обнаружения препятствий в фронтальной плоскости, внизу и сзади, скорость обнаружения препятствий  $\leq 8$  м/с, дальность обнаружения препятствий 0,5 – 12 м;
- поле обзора (*FOV*): 50° (в горизонтальной плоскости),  $\pm 19^\circ$  (в вертикальной плоскости)

- режим записи видео 4K со скоростью 30 кадров/с при 100 Мбит/с;
- возможность слежения и движения за объектом;
- Дальность передачи сигнала (на открытом пространстве)
  - *FCC*: 4000 м
  - *CE*: 2000 м
  - *SRRC*: 2000 м
  - *MIC*: 2000 м.

**БПЛА *TILL Ranger*** предназначен для 3D сканирования ограниченного пространства

Особенности:

- способен ориентироваться в пространстве;
- летать и передвигаться под землей с помощью системы лазерных сканеров; используя *SLAM* – метод;
- способен вычислять расстояние между собой и окружающими предметами;
- оперативно создает цифровую карту ближней местности.

Таблица П1.13.

Технические характеристики

Наименование параметра	Значения
Максимальная грузоподъемность, кг	1,5
Максимальная высота преодолеваемого препятствия, м	50
Габариты Д×Ш×В, мм	600×600×100-300
Исполнение	не взрывобезопасное
Максимальное время непрерывной работы, мин	20

## II. 2. Список программных модулей, используемых при моделировании

Список состоит из двух частей, в первой приводится описание модулей схемы управления, во второй – описание модулей моделирования полета по шахтным выработкам в различных условиях.

Описание модулей «*control*»:

1. *Runsim.m* – основной модуль, который содержит скрипт моделирования и визуализации.
2. *quadEOM.m* – модуль, в котором производится инициализация состояний БПЛА и моделирование уравнений его движения.
3. *quadEOM\_readonly.m* – подмодуль *quadEOM.m*, в котором прописаны уравнения движения.
4. *quadEOM\_readonly.m* – модуль, в котором прописаны внешние силы, такие как сила воздушного потока, сила вязкого трения и т.д.
5. *Crazyflie.m* – файл с динамическими параметрами БПЛА.
6. *Controller.m* – файл, в котором прописана управляющая функция БПЛА.
7. *Utils* – директория, в которой находятся различные подмодули, осуществляющие математические преобразования и функции, такие как: преобразование из углов эйлера в кватернионы и обратно, проверка на столкновение с препятствием, построение массива точек следования по кривой, прорисовка БПЛА и проверка на завершение маршрута.
8. *Trajectories* – директория с различными траекториями движения: по прямой, по кругу, по спирали, по ромбу.

Модули, которые используются при моделировании по обходу тестового полигона «*traj\_planning*»:

1. *Runsim.m* – основной модуль, в котором содержится скрипт моделирования и визуализации.

2. *quadEOM.m* – модуль, в котором производится инициализация состояний БПЛА и моделирование уравнений движений.
3. *quadEOM\_readonly.m* – подмодуль *quadEOM.m*, в котором прописаны уравнения движения БПЛА.
4. *quadEOM\_readonly.m* – модуль, в котором прописаны внешние силы: сила воздушного потока, сила вязкого трения и т.д.
5. *Crazyflye.m* – файл с динамическими параметрами БПЛА.
6. *Controller.m* – файл, в котором прописана управляющая функция БПЛА.
7. *Utils* – директория, где находятся подмодули, осуществляющие математические преобразования и преобразование из углов Эйлера в кватернионы и обратно, проверка на столкновение с препятствием, построение массива точек следования по кривой, прорисовка БПЛА и проверка на завершение маршрута.
8. *Path\_planning* – директория, где производится построение маршрута.
9. *Maps* – директория, где хранятся массивы с картами, карты в проекте представляются параллелепипедами, а также расширенной областью полета.
10. *Generate\_ts* – файл, в котором из построенного маршрута получается массив точек, каждой из которых соответствует некоторое время, к которому БПЛА должен оказаться в этой точке.
11. *Simplify\_path* – модуль, в котором происходит упрощение траектории, на случай, когда точки повторяются или лежат между двумя других.
12. *traj\_opt\** – модули оптимизации траекторий, где производится сглаживание траекторий, полученных из планировщика маршрута. Алгоритм Дейкстры дает кусочно – линейные кривые, БПЛА для следования по траектории необходимо сгладить кривые. В рамках моделирования для сглаживания использовались многочлены 3 и 7 порядков.

13. *Trajectory\_generator* – модуль, в котором происходит запуск всех подмодулей генерации и оптимизации траектории.

Описание модулей моделирования полета по шахтным выработкам (тестовому полигону).

Схема углами управления представлена в модулях *controler.m*. Модули по генерации траектории находятся в директории *Path\_planning*.

1. Директория *Path\_planning* содержит алгоритм определения параметров каждого контура, в которых записываются уравнения движения, с учетом работы предыдущих контуров, производится линеаризация и выполняется поиск оптимальных параметров для контроллера *LQR*.
2. Для решения нежестких дифференциальных уравнений среднего порядка точности используется пакет *ode45(odefun,tspan,y0)*, где *tspan* =  $[t0 \quad tf]$ , интегрирует систему дифференциальных уравнений  $y'=f(t,y)$  от  $t0$  до  $tf$  с начальными условиями  $y0$ . Модуль *ode45* является универсальным решателем обыкновенных дифференциальных уравнений\*.

### П. 3. Документы актуальности и внедрения



МИНИСТЕРСТВО  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ  
СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
(МЧС РОССИИ)

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА**

Центральный проезд, 3, Москва, 109012  
Тел. 8(499)216-79-01; факс: 8(495)624-19-46  
Телеграм: 114-933 «ФОТОН», 114-934 «ФОТОН»  
E-mail: info@mchs.gov.ru

29 АВГ 2017 № 48-5206-18

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

АО «Сибирская Угольная  
Энергетическая Компания»

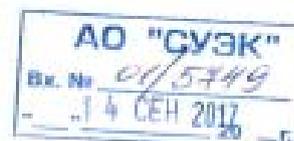
ул. Дубининская, д. 53, стр. 7,  
г. Москва, 115054

МЧС России рассмотрело письмо от 18.08.2017 № 02-2-7/4858 о разработке проекта концепции по созданию робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок и считает, что заявленная проблемно-тематическая направленность научных исследований и экспериментальных разработок с учетом опыта проведения спасательных операций на объектах ведения горных работ крайне актуальна.

Возможность оперативного получения актуальной информации о состоянии горных выработок, в том числе непосредственно на аварийном участке, при помощи робототехнических комплексов позволит не только существенно снизить риск для жизни и здоровья шахтеров и горноспасателей, но и качественно повысить эффективность спасательной операции. При этом в достаточной мере эффективных устройств для решения данной задачи в настоящее время нет.

МЧС России заинтересовано в разработке и создании беспилотного устройства для мониторинга и обследования подземных горных выработок при ликвидации аварии и, при необходимости, готово принять участие в разработке технического задания и последующей практической апробации.

В.В. Аксенов



УТВЕРЖДАЮ:  
 Технический директор АО «СУЭК»  
  
 Копылов К.Н.  
 21» 04 2017г.

ПРОТОКОЛ

«21» апреля 2017 г.

№ 1

г. Москва

**Технического совещания**

**ПРИСУТСТВОВАЛИ:**

**от АО «СУЭК»**

Костеренко В.Н. – начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий;  
 Смирнов О.В. – начальник управления аэрологической безопасности предприятий;  
 Смирнов Р.О. – главный технолог по ГДЯ управления противоаварийной устойчивости предприятий;  
 Кулик А.И. – зам. начальника управления аэрологической безопасности предприятий;  
 Лаптева М.И. – начальник отдела геолого – маркшейдерских работ, недропользования, лицензирования и землепользования;  
 Мутыгуллин А.В. – начальник управления – главный механик;  
 Петухов С.В. – зам. начальника управления – главный энергетик;  
 Концевой С.И. – старший механик по горно-шахтному оборудованию энергомеханического управления;  
 Ким М.Л. – главный технолог отдела технического обеспечения и технологии подземных горных работ;  
 Сергеева Ю.А. – начальник отдела охраны окружающей среды;  
 Головицин А.В. – начальник управления технологической автоматизации и связи;  
**от НП Научно образовательный центр «Инновационные горные технологии» (НП ЦИГТ)**  
 Ананьев П.П. – генеральный директор;  
**от ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский Государственный Университет» (ТГУ)**  
 Беляков К.О. – проректор по инновационной деятельности;  
**от ООО «Финко» (Группа Компаний «Беспилотные Системы», г. Ижевск - ГКБС)**  
 Рыбаков Д.В. – заместитель директора по инновациям;  
**от ЗАО «Элекард-дивайсез» (г. Томск)**  
 Ширшин В.А. – директор;  
**от ФГАОУ ВО «Московский технологический университет» (МИРЭА)**  
 Певзнер Л.Д. – профессор.

**ПОВЕСТКА ДНЯ:**

1. Возможности применения беспилотных авиационных систем (далее - БАС) для решения маркшейдерских задач на открытых горных работах.
2. Мониторинг технического состояния наземных объектов АО «СУЭК» с применением БАС, включая обнаружение возможных скрытых очагов горения угля, контроль мульды, контроль состояния высоковольтных линий электропередачи.
3. Робототехнический мониторинг и обследование шахт АО «СУЭК» в нештатных и аварийных ситуациях в целях снижения рисков для персонала и горноспасательных служб.

4. Взаимодействие субъектов научной инновационной и производственной деятельности для реализации обсуждаемых проектов в рамках Национальной Технологической Инициативы (далее – НТИ), и других Федеральных целевых программ РФ.

#### **СОВЕЩАНИЕ КОНСТАНТИРОВАЛО:**

1. Перспективность и готовность к применению БАС в целях:

- снижения трудоемкости, повышения точности и оперативности маркшейдерских работ при открытой добыче;
- тепловизионного контроля угольных складов, на предмет обнаружения возможных скрытых очагов горения угля, процесса просадки грунта над шахтными выработками, состояния высоковольтных линий электропередачи на добывающих предприятиях АО «СУЭК»;
- тепловизионного контроля процессов самовозгорания угля и выделения метана в выработанном пространстве.

Для принятия решения о практическом использовании БАС для маркшейдерских измерений и мониторинга состояния наземных объектов, совещание считает целесообразным проведение показательных испытаний с последующей адаптацией БАС к особенностям задач АО «СУЭК».

2. Заинтересованность в создании специализированного робототехнического комплекса для мониторинга и обследования шахт АО «СУЭК» в нештатных и аварийных ситуациях в целях снижения рисков для персонала и горноспасательных служб.

Учитывая сложность и новизну возможных технических решений, а также недостаточный объем информации для формирования ТЗ, что повышает риски успешного выполнения НИОКР, участники совещания считают целесообразным осуществить разработку технических предложений по ГОСТ 2.118-2013, обеспечивающих анализ нескольких вариантов возможных технических решений

#### **СОВЕЩАНИЕ РЕШИЛО:**

1. Поручить НП «ЦИГТ» совместно с ООО «Финко» (по согласованию), разработать программу организации проведения опытно-промышленных испытаний (ОПИ) по ежедневному беспилотному авиационному мониторингу наземных объектов шахты «Талдинская-Западная-1» АО «СУЭК-Кузбасс» и условия покрытия расходов ОПИ.

**Срок:** до 12.06.2017. **Ответственные:** Ананьев П.П., Рыбаков Д.В., Лаптева М.И., Сергеева Ю.А.

2. Поручить НП «ЦИГТ» совместно с ТГУ и МИРЭА (по согласованию), представить в АО «СУЭК» проект концепции по созданию робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок в соответствии с требованиями ГОСТ 2.118-2013.

**Срок:** до 12.06.2017. **Ответственные:** Ананьев П.П., Беляков К.О., Певзнер Л.Д., Костеренко В.Н., Смирнов О.В., Ким М.Л.

3. Предложить ООО «Финко» представить в АО «СУЭК» (как организации – эксплуатанта) на согласование проект ТЗ по созданию прототипа робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок в рамках НТИ.

**Срок:** до 12.06.2017. **Ответственный:** Рыбаков Д.В.

4. Предложить ТГУ совместно с ЗАО «Элекард-дивайсез» представить в АО «СУЭК» на рассмотрение проект конкурсной документации по возможному участию СУЭК в качестве индустриального Партнера при создании модернизированного робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок в рамках ФЦП МИНОБРНАУКИ.

**Срок:** до 12.06.2017 **Ответственные:** Беляков К.О. Ширшин В.А.

5. Провести повторное техническое совещание по результатам проведенных мероприятий для принятия дальнейших решений.

**Срок:** до 19.06.2017 **Ответственные:** Концевой С.И., Ким М.Л., Ананьев П.П.

Секретарь технического совещания



Ким М.Л.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «СУЭК-Хакасия»

А.Б. Килин

2019г.



Акт

использования результатов диссертационной работы М.Л. Кима: «Автоматизированная система информационной поддержки аварийно-спасательных работ в шахтах с использованием беспилотных летательных аппаратов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)».

На предприятиях Разрез «Черногорский», Разрез «Восточно-Бейский», входящих в зону ответственности ООО «СУЭК-Хакасия» эксплуатируются беспилотные летательные аппараты «Геоскан-101», «Геоскан-401», которые регулярно решают следующие задачи: съемка горных выработок, угольных складов и линий ЛЭП, состояния дорог, и других сооружений разрезов.

Настоящим актом подтверждается, что ООО «СУЭК-Хакасия» при формировании технического задания на приобретение беспилотных летательных аппаратов «Геоскан-101», «Геоскан-401» были использованы технические предложения на оснащение и компоновку средств измерения и передачи данных беспилотных летательных аппаратов, предложенных в диссертационной работе М.Л.Кима: «Автоматизированная система информационной поддержки аварийно-спасательных работ в шахтах с использованием беспилотных летательных аппаратов »

Главный маркшейдер

Д.С.Шадрин

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Технопарка

«Державинский»

Д.В. Рыбаков

« 12 » Ноября 2020 г.

## Акт

внедрения результатов интеллектуальной деятельности (РИД),  
полученных в рамках диссертационной работы Кима М.Л. по теме:  
«Автоматизированная система информационной поддержки аварийно-спасательных  
работ в шахтах с использованием беспилотных летательных аппаратов»

Технопарк «Державинский» и «Центр компетенций в сфере применения беспилотных авиационных систем» (далее – ЦКП БАС) ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» в настоящее время осуществляют ряд проектов в рамках Национальной Технической Инициативы по решению научно-технических проблем и преодолению технологических барьеров, существующих в области разработки, производства, эксплуатации и технологий применения беспилотных авиационных систем, в том числе – по созданию методов и технологий построения и применения автономных сетей регулярного автоматического мониторинга объектов различного рода, в том числе – сложных инженерных сооружений.

Рассмотрев представленные материалы диссертационного исследования Кима Максима Ленсовича, ЦКП БАС ТГУ имени Г.Р. Державина подтверждает, что полученные Кимом М.Л. в рамках диссертационного исследования результаты по оценке возможностей создания и применения беспилотных авиационных систем для мониторинга внутренних пространств промышленных объектов, в особенности - в условиях угольных шахт, актуальны и представляют значительную ценность для дальнейшего развития направления создания беспилотных систем для промышленного мониторинга. Особого внимания заслуживают предложенные решения по использованию МБЛА во взрывоопасных средах, а также предложенные алгоритмы картирования поставарийных пространств.

Полученные Кимом М.Л. результаты исследования применены сотрудниками ЦКП БАС при осуществлении дальнейшей разработки программно-аппаратных комплексов и систем, предназначенных для получения, хранения, обработки и использования данных беспилотного дистанционного зондирования промышленных объектов. Кроме того, на основании полученных научных результатов диссертационного исследования разрабатывается система беспилотного зондирования замкнутых пространств для специализированного мобильного робототехнического комплекса двойного назначения.

Руководитель ЦКП БАС



А.А. Киреев



РОССИЯ, 115054 МОСКВА  
УЛ. ДВУМЫСЛЕННАЯ, Д.ОМ 53, СТР. 7  
ТЕЛ: (495) 795 2538, ФАКС (495) 795 2542  
E-MAIL: OPGT@SUЭК.RU

WWW.SUEK.RU

Утверждаю:  
Заместитель генерального директора –  
Директор по производственным операциям

В. В. Артемьев

2019 г.

**ПРОТОКОЛ**  
**проведения испытаний**  
**технологии подземной навигации**

г. Ленинск-Кузнецкий, г. Москва

29.04.2019

**Объект испытаний**

Подземная навигационная система «Навигация». Система представляет собой программно-аппаратный комплекс на базе системы подземного позиционирования «SBGPS» производства ООО НПФ «Гранч» (г. Новосибирск) и программного комплекса «Вентиляция 2», разработанного ООО «Шахтэксперт-Системы» (г. Кемерово).

**Место и дата проведения испытаний**

ПЕ «Шахта им. С. М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, 29.04.2019.

**Участники испытаний**

Испытание проводилось комиссией в составе:

**от АО «СУЭК» (в режиме ВКС):**

Заместитель генерального директора –	Артемьев В. Б.
Директор по производственным операциям	
Начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий	Костеренко В. Н.
Заместитель начальника управления противоаварийной устойчивости предприятий.	Тимченко А. Н.
Заместитель начальника управления аэрологической безопасности предприятий	Кулик А. И.
Главный технолог отдела технического обеспечения и технологии подземных горных работ.	Ким М. Л.

**от АО «СУЭК-Кузбасс»:**

Заместитель главного механика по АСУТП и связи – на поверхности	Бабак С. В.
Заместитель директора по производству (по АСУТП) ПЕ «Технологическая связь» – в шахте	Иванов А. Ю.
Ведущий специалист участка мониторинга и внедрения АСУТП ПЕ «Технологическая связь» - на поверхности	Заборский Е. Н.
Инженер – системный программист участка по обслуживанию SBGPS ПЕ «Технологическая связь» – на поверхности	Сурнин К. А.
Механик участка по обслуживанию SBGPS – в шахте	Салтымаков А. Н.

**от ООО НПФ «Гранч»:**

Начальник отдела № 7 – в шахте	Гаврюшенко К.Н.
Ведущий инженер-электроник – в шахте	Иванов М. Л.
Инженер по АСУП – на поверхности	Побединский К. В.

**от ООО «Шахтэксперт-Системы»:**

Директор – в шахте	Лукашов О. Ю.
Программист – на поверхности	Ващилов В. В.
Программист – в шахте	Кусаинов П. И.

### Краткое описание испытываемой системы

Подземная навигационная система «Навигация» представляет собой программно-аппаратный комплекс, работающий за счет интеграции системы подземного позиционирования «SBGPS» и программного комплекса «Вентиляция 2».

Система «SBGPS» осуществляет непрерывно в режиме реального времени определение местоположения человека в шахте с точностью позиционирования  $\pm 4$  м, с возможностью передачи данных на сервер системы по каналам связи, организованными с использованием технологий Ethernet (ВОЛС и/или SBNI) и Wi-Fi (протокол IEEE 802.11 b/g/n/i).

Оператор ПК «Вентиляция 2» загружает с сервера «SBPGS» модель шахты, с актуальным расположением базовых станций (БС), подключается к системе позиционирования и инициирует работу системы навигации. При этом рассчитывается воздухораспределение в шахте, указывается место обнаружения дыма или очага пожара, определяются маршруты выхода горнорабочих, после чего запускается навигация людей по шахте до выходов из шахты. Маршрут движения и пункт назначения могут определяться для каждого человека как в автоматическом режиме, так и в ручном.

В процессе навигации ПК «Вентиляция 2» выполняет мониторинг положений людей и для каждого человека, в зависимости от совокупности факторов, передаёт на его устройство оповещения (УО) очередные навигационные команды, меняя, при необходимости, частоту их выдачи.

#### Этапы навигации:

- начало навигации обозначается голосовой командой УО: «Авария! Выйти из шахты!»;
- далее выдаётся голосовая команда ориентации в горной выработке: «Идите по воздуху» или «Идите против воздуха»;
- основная часть навигации сопровождается указаниями о движении человека и данными о расстоянии (при необходимости). Примеры команд: «110 м, идите прямо», «через 45 м поворот налево» и др.;
- корректировка маршрута проводится при получении голосового сообщения УО: «Вы отклонились от маршрута». Далее получают голосовое сообщение УО: «Маршрут перестроен» и начинают поступать голосовые команды ориентации или основная часть навигации;
- навигация завершается по инициативе оператора или достижении человеком точки назначения. Завершение навигации обозначается двойной выдачей голосовой команды УО: «Дальше двигайтесь самостоятельно».

### Программа испытаний

Испытание системы проводилось по замкнутому маршруту общей протяжённостью 958 м и включало два этапа (рис. 1).

#### Первый этап проходил по маршруту:

- Западная пассажирская станция (ЗПС) – 102 м;
- Заезд на ЗПС – 27 м;
- Поленовский западный полевой штрек – 112 м;
- Заезд 2 – 28 м;
- Двухпутевой обгонный квершлаг – 326 м (70 м до умформерной 1);
- Умформерная 1 – 34 м;
- Болдыревское электровозное депо – 138 м;

#### Второй этап проходил по маршруту:

- Болдыревское электровозное депо;

- Заезд в электровозное депо – 25 м;
- Болдыревский западный коренной штрек – 39 м;
- Заезд на главный квершлаг – 15 м;
- Главный квершлаг – 29 м;
- Заезд на ЮПС – 34 м;
- Южная пассажирская станция (ЮПС) – 206 м.

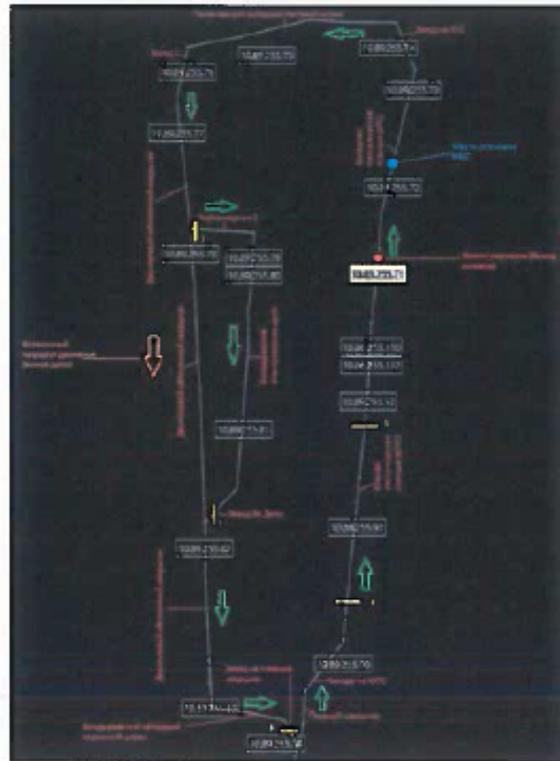
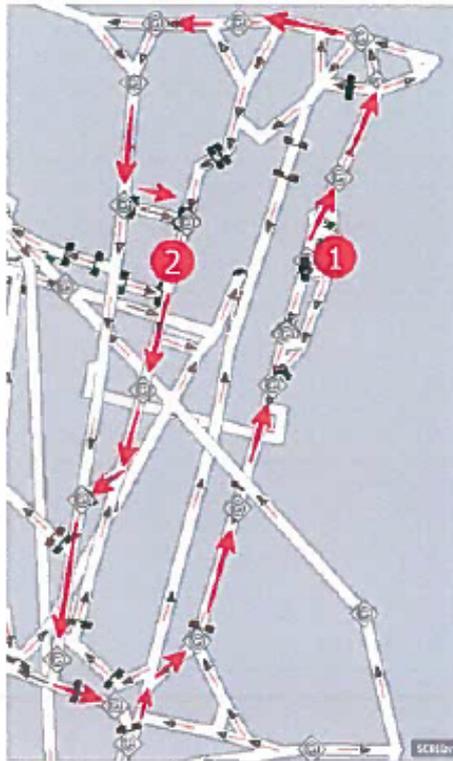


Рисунок 1 – схема маршрута испытаний. Слева – вид в ПО «Вентиляция 2» (1, 2 – точки начала движения по первому и второму маршрутам). Справа – клиентское ПО системы SBGPS.

#### Используемое оборудование

Устройства оповещения (УО - головной светильник) модель SBGPS Light-4:

- 014917 – Гаврюшенко К. Н.;
- 014925 – Иванов А. Ю.;
- 015420 – Иванов М. Л.;
- 014897 – Кусаннов П. И.;
- 014910 – Лукашов О. Ю.

Базовые станции:

№ п/п	IP – адрес БС	Серийный номер БС	Место установки
1	10.89.255.71	6908 0418 0200	Западная пассажирская станция
2	10.89.255.72	6910 0518 0012 <sup>1</sup>	Западная пассажирская станция
3	10.89.255.73	6908 0518 0315	Заезд на ЗПС
4	10.89.255.74	6908 0318 0172	Поленовский западный полевой штрек (ЗПШ)
5	10.89.255.75	6908 0418 0197	Поленовский западный полевой штрек
6	10.89.255.76	6908 0518 0348	Сопряжение Поленовского ЗПШ и заезда 2
7	10.89.255.77	6908 0318 0148	Двухпутевой обгонный квершлаг
8	10.89.255.78	6908 0318 0177	Двухпутевой обгонный квершлаг

<sup>1</sup> МБС – мобильная базовая станция

№ п/п	IP – адрес БС	Серийный номер БС	Место установки
9	10.89.255.77	6908 0318 0148	Двухпутевой обгоночный квершлаг
10	10.89.255.79	6908 0318 0189	Болдыревское электровозное депо
11	10.89.255.81	6908 0318 0184	Болдыревское электровозное депо
12	10.89.255.82	6908 0318 0174	Двухпутевой обгоночный квершлаг
13	10.89.255.83	6908 0318 0143	Двухпутевой обгоночный квершлаг
14	10.89.255.84	6908 0318 0173	Болдыревский западный коренной штрек
15	10.89.255.85	6908 0318 0161	Главный квершлаг
16	10.89.255.90	6908 0318 0183	Южная пассажирская станция
17	10.89.255.91	6908 0318 0195	Южная пассажирская станция
18	10.89.255.92	6908 0418 0205	Южная пассажирская станция

#### Действия, выполняемые в ходе испытаний:

##### Проведение испытаний

##### 1 Вводные данные:

- отключить стационарную БС WR89.72, дождаться сигнала о потере связи с БС;
- разместить МБС на месте установки БС WR89.72 для восстановления линии связи, непосредственно во время движения по маршруту;
- перемещаться двумя группами 3 и 2 человека, соответственно, держаться на расстоянии от 10 до 50 метров;
- выполнить отклонение от маршрута для проверки выполнения функции автоматического перестроения маршрута.

##### 2 Проведение испытаний:

- движение участников испытаний по первому маршруту началось с голосовой команды УО «Авария! Выйти из шахты!»;
- испытатели начали движение по первому маршруту, двумя группами;
- дойдя до места установки БС WR89.72, выполнено включение и размещение МБС;
- после загрузки МБС испытатели продолжили движение по маршруту, Иванов М. Л. и Гаврюшенко К. Н. двигались позади основной группы на расстоянии 10÷30 метров;
- обе группы успешно дошли до контрольной точки окончания первого маршрута под БС WR89.79. Затем получена голосовая команда УО: «Дальше двигайтесь самостоятельно», свидетельствующая о завершении движения по первому маршруту;
- получена голосовая команда УО: «Авария! Выйти из шахты!»;
- испытатели начали движение по второму маршруту, двигаясь двумя группами;
- дойдя до БС WR89.85, Иванов А. Ю., Лукашов О. Ю., Кусаинов П. И. повернули налево и продолжили движение к БС WR89.90. Гаврюшенко К. Н. и Иванов М. Л. отклонились от маршрута, пройдя далее по главному квершлагу в сторону БС WR89.86.
- пройдя около 50 метров, Иванов М. Л., Гаврюшенко К. Н. дважды получали голосовую команду УО: «Вы отклонились от маршрута». Далее получили команду: «Маршрут перестроен» и продолжили движение в правильном направлении - к БС WR89.90.
- обе группы успешно дошли до контрольной точки окончания второго маршрута под БС WR89.71.
- получили команду с поверхности от Костеренко В. Н. о завершении испытаний;
- все участники испытаний вышли из шахты на поверхность.

### Результаты испытаний и решение комиссии

1. Признать положительными результаты испытаний технологии подземной навигации, созданной на основании интеграции программного комплекса «Вентиляция 2» и системы позиционирования «SBGPS».

2. Максимальная скорость передачи данных по сети составила порядка 10 Мбит/сек, что достаточно для передачи голоса, фото и другой информации.

3. В целях развития системы «Навигация» рекомендуется:

3.1. Провести проверку технологии подземной навигации для организации в автоматическом режиме управления движением человека при выходе из шахты во время аварии по маршрутам согласно ПЛА с целью оценки адекватности восприятия работниками шахты голосовых указаний системы подземной навигации и точности математического моделирования вентиляционных сетей, с использованием ПК «Вентиляция 2».

3.2. Убрать голосовые команды ориентации в горной выработке «Идите по воздуху» и «Идите против воздуха» или проработать для этих команд алгоритм, позволяющий исключить риск формирования не корректных маршрутов движения людей в результате аварийного изменения режима проветривания горных выработок.

3.3. Организовать разработку автоматизированной системы прогнозирования развития аварии, работающей по принципу:

- подземная навигация по маршрутам ПЛА запускается одновременно с оповещением людей в шахте об аварии;
- наличие дыма горнорабочий в шахте подтверждает нажатием кнопки на УО SBGPS;
- сервер системы «Навигация» получает от системы позиционирования сигнал о задымлении в точке местонахождения горнорабочего, нажавшего кнопку, и автоматически запускает процесс прогнозирования развития аварии;
- система запускает модуль (процедуру) мониторинга показаний датчиков АГК и УО, с целью определения местоположения источника задымления (очага пожара) и/или газовыделения исходя из информации о сети ленточных конвейеров, выемочных и проходческих участков, а также наличия кабельной продукции;
- процесс прогнозирования включает: а) автоматический расчёт вентиляции; б) определение потенциальной зоны задымления; в) запуск динамического расчёта распространения дыма от указанной точки; г) расчёт маршрутов эвакуации людей, находящихся в зоне потенциального задымления, в том числе с динамическим отображением движения людей.

3.4. Предусмотреть использование технологии подземной навигации для организации получения достоверной информации об аварийной обстановке в горных выработках с помощью технологий роботизированных автономных беспилотных авиационных систем (БАС) для управления траекторией движения БАС по заданному маршруту в шахтных условиях, оснащённых соответствующим приборным обеспечением для проведения контроля состава рудничной атмосферы и передачи данных на поверхность.

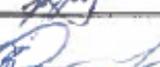
3.5. Проработать вопрос выдачи навигационных команд «Держитесь правее» и «Держитесь левее» для однозначности выбора маршрута эвакуации человека в сложной сети горных выработок, особенно в условиях плохой видимости.

3.6. Подготовить предложения по модернизации действующих систем «SBGPS» на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» путём оснащения (замены) узлов подземной инфраструктуры связи (базовые станции) модулями повышенной точности позиционирования с соответствующим энергообеспечением (укомплектование контроллерами питания базовых станций).

3.7. Предусмотреть выдачу навигационных команд с частотой, позволяющей формировать «эффект присутствия», особенно в условиях плохой видимости.

4. Организовать работу по оформлению совместных прав АО «СУЭК», ООО НПФ «Гранч» и ООО «Шахтэксперт-Системы» на результаты интеллектуальной деятельности при создании программно-аппаратного комплекса подземной навигации.

Подписи:

	В. Н. Костеренко
	С. В. Бабак
	О. Ю. Лукашов
	А. Ю. Иванов
	К. Н. Гаврюшенко
	Е. Н. Заборский
	К. А. Сурнин
	А. Н. Салтымаков
	М. Л. Ким
	М. Л. Иванов
	К. В. Побединский
	В. В. Ващилов
	П. И. Кусаев

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор АО «СУЭК»


 Копылов К.Н.  
 10 2019г.

## ПРОТОКОЛ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕЩАНИЯ № 1/2019

г. Москва

07.10.2019

**В совещании приняли участие****от АО «СУЭК»:**

Костеренко В.Н. – начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий;  
 Концевой С.И. – старший механик по горно-шахтному оборудованию энергомеханического управления;

**от МИСиС:**

Ким М.Л. – соискатель;

**от НП Научно образовательный центр «Инновационные горные технологии» (НП «ЦИГТ»):**

Ананьев П.П. – генеральный директор;

**от ИПУ РАН:**

Мещеряков Р.В. – д.т.н. профессор директор центра интеллектуальных робототехнических систем;

**от ТГУ им. Г.Р.Державина**

Рыбаков Д.В. – директор Технопарка

**от ООО «Птеро»:**

Сычев И.А. – генеральный директор;

**ЗАО «Элекард-ЦТП» (г. Томск):**

Шум А.Л. – директор;

**ПОВЕСТКА СОВЕЩАНИЯ:**

Определение реализуемости технических решений для выполнения задач по проектированию и созданию БПЛА для угольных шахт на основании исследований и демонстрации возможностей:

1. НИТУ «МИСиС» Проведение испытаний разработанной в рамках диссертационной работы Кима М.Л. системы автоматического управления маршрутным движением БПЛА, прописанной совместно с ООО «Птеро» в блоки управления БПЛА.

**СЛУШАЛИ:****1. Директора ЗАО «Элекард-ЦТП» Шум А.Л.:**

О возможностях представленного макета технического зрения обеспечивающего видеосъемку в условиях нулевой освещенности.

**2. Генерального директора НП «ЦИГТ» Ананьева П.П.:**

Специалистами НП ЦИГТ определены технические возможности создания БПЛА отвечающие потребностям горнодобывающих предприятий на основании технических возможностей, совместно с АО «СУЭК» подготовлен и согласован проект ТЗ по созданию прототипа робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок в рамках НТИ.

**ОТМЕТИЛИ:**

1. Удовлетворительные результаты демонстрации отдельных макетов робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных выработок (далее- «Комплекс») и возможные пути улучшения ТГХ с учетом особенностей и будущей эксплуатации.
2. Возможность представленного макета технического зрения с ИК подсветкой обеспечивать видеосъемку в условиях нулевой освещенности с разрешением 1920×1080 пикселей, частотой съемки 25 кадров в секунду и позволяет различать предметы на расстоянии до 4 метров от камеры, с функцией передачи видеосигнала (онлайн) на ПК и записью информации на карту памяти видеокамеры.
3. Успешное проведение эксперимента, в рамках которого БПЛА произвел полет в условиях нулевой освещенности по сложной траектории; при этом было проимитировано горизонтальное препятствие с возможностью обеспечения удержания на одной высоте в зависимости от уровня пола. Дополнительно к этому для проверки маневренности системы управления движением БПЛА на маршруте, в шахматном порядке устанавливались препятствия на дистанции от 1 до 5 м.
4. Работоспособность системы автоматического управления БПЛА, которая позволяет выполнять в ограниченном пространстве с учетом препятствий автономное движение по целевому маршруту.
5. Возможность использования 3D сканера в условиях нулевой освещенности для построения и транслирования 3D модели помещения в режиме онлайн

**ОБСУДИЛИ:**

В обсуждении вопросов повестки дня приняли участие все присутствующие.

**РЕШИЛИ:**

1. После осуществления необходимых доработок отдельных элементов робототехнического комплекса для мониторинга и обследования подземных горных выработок, предоставить возможность заинтересованным сторонам провести полупромышленные испытания на согласованном подземном объекте АО «СУЭК».

Срок: до 15.03.2020. Ответственный: Костеренко В.Н.

**ПОДПИСИ:**

от АО «СУЭК»  
начальник управления противоаварийной  
устойчивости предприятий

Костеренко В.Н.

от (НП «ЦИГТ»):  
генеральный директор

Ананьев П.П.

от ИПУ РАН:  
директор центра интеллектуальных робототехнических систем

Мещеряков Р.В.

ЗАО «Элкард-ЦТП» (г. Томск):  
директор

Шум А.Л.

от ТГУ им. Г.Р.Державина  
директор Технопарка

Рыбаков Д.В.