

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

**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)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Темкин Игорь Олегович

Москва – 2021

## Общая характеристика диссертационной работы

**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 аварий 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. 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, при этом 95 человек из погибших – работники военизированных 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, исключающей присутствие человека. Проблема получения достоверной информации об обстановке в горной выработке после возникновения в ней различных видов аварий с целью принятия рациональных и целесообразных 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, Инсти-

тут 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. Тян, 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 лета-

тельного 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 обеспечиваются корректным использованием применяемого математического аппарата, теории автоматического управления 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 Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» 2011-2014гг. Московского государственного горного университета, Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» 2015-2018гг. Национального исследовательского технологического университета (МИСиС), совместном семинаре кафедр Автоматические системы и Проблемы управления Института кибернетики Российского технологического университета – МИРЭА, 2017 г., 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, Международной научно-практической конференции «Современные методы решения задач управления, автоматизации и переработки информации, 2018», Алушта, Республика Крым, Международной конференции «Развитие транспортных средств и систем 2018», Волгоград, Россия, 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.

## **Содержание работы**

**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.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы проблемы поставарийного мониторинга состава рудничной атмосферы и состояния шахтных выработок, представлена концепция автоматизированного информационного обеспечения горноспасательной службы с использованием робототехнических летательных средств, определены шахтные условия эксплуатации БПЛА. В главе представлена разработанная структура автоматизированной системы поддержки военизированных горноспасательных частей с использованием робототехнического комплекса (РТК), представленная на рисунке 1. Иерархическая структура системы содержит три уровня: на нижнем уровне происходит измерение параметров и характеристик состава рудничной атмосферы с помощью расположенных на борту РТК датчиков и чувствительных элементов, видеосъемка обстановки разрушений в горной выработке 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. Проведенный анализ существующих робототехнических средств позволил сделать вывод о том, что характерная для БПЛА скорость и маневренность перемещения в пространстве делают его перспективным при ведении горноспасательных работ и обследовании

горных выработок шахт и является оптимальным для использования в разработанной структуре автоматизированной системы информационной поддержки.

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, обеспечивающих выполнение заданных ограничений по весу, габаритам и потреблению электроэнергии.

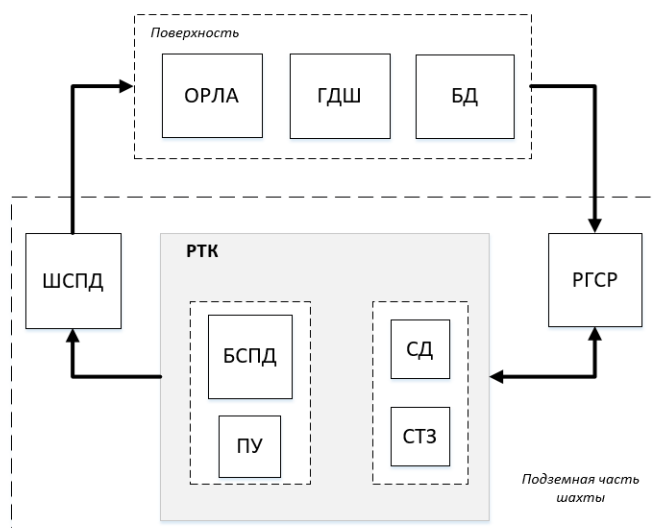


Рисунок 1. Структура автоматизированной системы информационной поддержки военизированных горноспасательных частей с использованием РТК

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.

Созданная структура автоматизированной системы информационного обеспечения горноспасательных частей на основе беспилотных летательных аппаратов, ориентированная на получение достоверной информации об аварийной обстановке в горной выработке после возникновения в ней различных видов аварий, составляет первое научное положение.

**Третья глава** посвящена разработке автоматической системы управления автономным маршрутным движением БПЛА по сформированному маршруту в выработках угольной шахты. Формирование математической модели движения БПЛА в шахтных условиях как объекта управления в автоматической системе, выполнялось в условиях: БПЛА рассматривается как твердое тело в аффинной системе координат, представляемая вектором смещения и ортогональной матрицей поворота. Пространственное позиционирование БПЛА осуществляется в неподвижной – инерциальной системе координат, связанной с Землей. Подвижная система координат с центром в центре масс БПЛА и с осями, направленными вдоль

главных осей БПЛА как твердого тела привязана к некоторой фиксированной точке шахтных выработок. Выбранная 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. БПЛА имеет 6 степеней свободы: три угла Эйлера и три координаты центра масс, движение БПЛА определяют 12 координат состояния

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

Для составления математической модели движения БПЛА принят кватернионный метод, преимуществом которого является компактность, 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, определяется соотношениями  $\omega = q^T \tilde{\omega} q$ ,  $\tilde{\omega} = q \omega q^T$ , 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. Кинематика угловых параметров БПЛА в терминах кватернионов описывается следующим уравнением:

$$\dot{q} = 0,5 \tilde{\omega} q = 0,5 q \omega = 0,5 \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 \\ \omega_1 & 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_3 & \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Поступательная динамика движения БПЛА описывалась в глобальной системе координат, в которой поступательное ускорение определяется 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:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = q \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} q^T + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{fr}x \\ k_{fr}y \\ k_{fr}z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \beta_y \\ \gamma_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

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,  $\alpha_x = \frac{N_x}{m}$ ,

$$\beta_y = \frac{N_y}{m}, \quad \gamma_z = \frac{N_z}{m}.$$

Четыре двигателя БПЛА создают аэродинамическую силу, которая согласно Н. Е. Жуковскому определяется для каждого  $i$ -го пропеллера в виде

$$F_i = c_F \rho r^2 S \omega_i^2, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3)$$

в котором  $\omega_i$  – частота вращения  $i$ -го пропеллера,  $c_F$  – коэффициент тяги;  $\rho$  – плотность воздуха;  $r, S$  – радиус ротора и площадь диска пропеллер.

Главный вектор подъемной силы равен

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

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

$$M_x = (F_2 - F_4)L, \quad M_y = (F_3 - F_1)L, \quad M_z = M_1 + M_3 - M_2 - M_4, \quad (5)$$

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

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

$$u_1 = F, u_2 = M_x, u_3 = M_y, u_4 = M_z. \quad (6)$$

Управляющие воздействия пропорциональны квадрату частоты вращения пропеллеров, которые формируются электроприводами. В приводах пропеллеров БПЛА используются бесщеточные электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения, математическая модель которых принята линейной с передаточной функцией второго порядка.

Математическая модель автоматического движения БПЛА включает модель внешней среды, основными факторами которой является возмущения от шахтных воздушных потоков и ограниченность в пространственном перемещении. Для реализации пространственных ограничений использовался метод штрафных функций в виде экспоненциального «барьера», который задает потенциал, действующий

щий на объект, значение которого в области, где перемещения разрешены равен нулю, а в запретной зоне экспоненциально возрастает в зависимости от  $d$  – дистанции до границы запрещенной области

$$F_c(d) = F_0(e^{ad^2} - 1), \quad (7)$$

Структура системы автоматического управления автономным движением по маршруту беспилотного летательного аппарата, показанная на рисунке 2, определена как следящая многоконтурная система, в которой блок 1 – планировщик маршрута, где формируется и корректируется траектория задания маршрута с учетом появления препятствий; блок 2 – управление положением БПЛА вдоль спланированной траектории движения; блок 3 – управление угловым положением БПЛА для обеспечения требуемых значений кватернионов; блок 4 – управление моторами для формирования требуемой силы тяги.

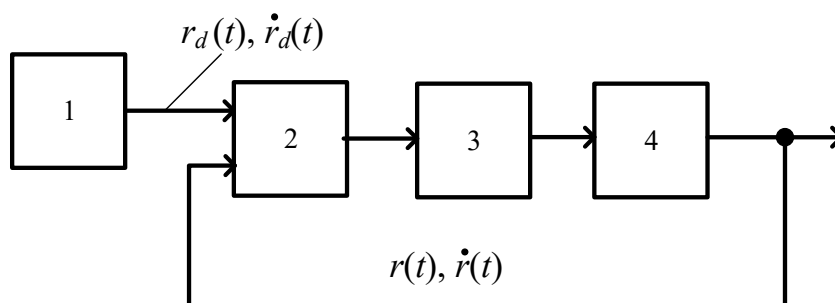


Рисунок 2. Структура системы автоматического управления траекторным движением БПЛА

Планирование траектории маршрута в блоке 1 осуществляется на основе алгоритма Дейкстры определения на графе кратчайшего маршрута. Алгоритм планирования маршрута, реализованный в блоке 1 представлен на рисунке 3.

Для планирования траектории маршрута выполнялась дискретизация пространства будущего движения, строился помеченный связный граф, с весами дуг – расстояния между точками. 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. Найденный маршрут – кусочно-линейная совокупность, не обладает гладкостью в местах стыковки звеньев траектории, что требуется для качественной отработки движения. Для преодоления этого недостатка выполнена полиномиальная аппроксимация. В структуре планировщика имеется блок «Нахождение 3D траектории», который предусматривает эпизодическую работу видеокамеры и корректировки траектории в случае невозможности формирования и прокладывания траектории путем удаленного подключения сотрудника ВГСЧ (оператора) к БПЛА.

Синтезируемая система управления движением БПЛА предназначена для отслеживания сформированной планировщиком маршрута траектории 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. Отклонение вектора тяги происходит за счет изменения углов тангажа и крена при неизменном значении угла рыскания. Задача управления угловым положением БПЛА состоит в том, чтобы выдерживать требуемое угловое положение летательного аппарата. Структура блока 3 системы, где решается задача управления угловым положением БПЛА, изображена на рисунке 4, в котором представлены: 3.1 – блок гироскопа, 3.2 – блок акселерометра, 3.3 – блок гиростабилизатора *IMU*, 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, 3.7 – преобразователь угловых ускорений в частоту вращения моторов, 4 – блок управления моторами.

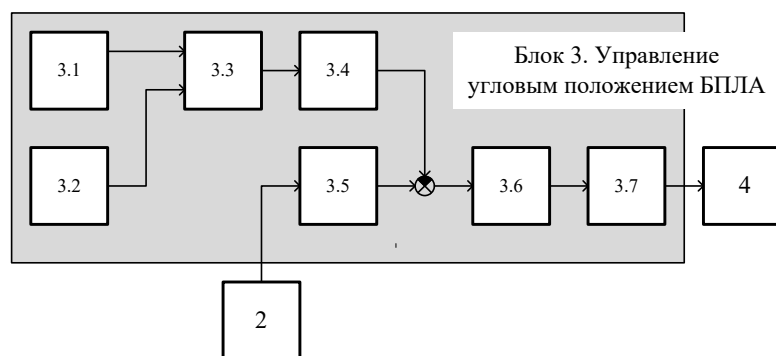


Рисунок 4. Структура блока управления угловым положением БПЛА

ние кватернионов в углы Эйлера. Полученный трехмерный вектор, характеризующий текущее угловое положение БПЛА, позволяет определить угловую ошибку положения путем сравнения с требуемым угловым положением БПЛА, которое

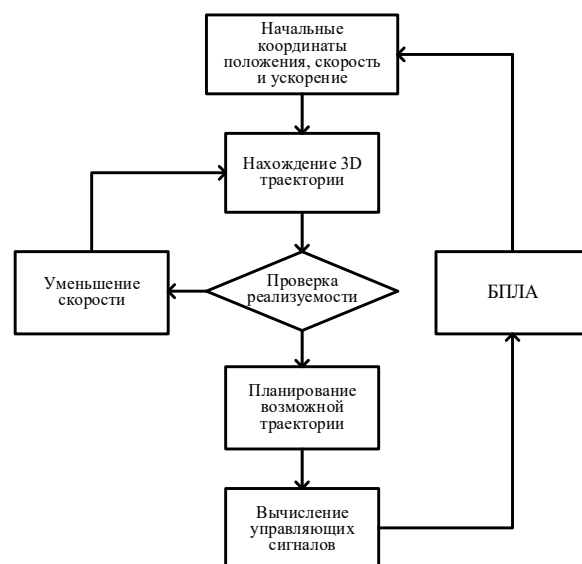


Рисунок 3. Алгоритм планирования маршрута движения БПЛА

Для определения углового положения используется программный модуль *IMU*, в котором описание работы гироскопа и акселерометра выполнено в кватернионном представлении. Модуль *IMU* позволяет БПЛА относительно позиционировать себя в пространстве без использования внешних датчиков. Выходным сигналом из этого модуля является трехмерный вектор углового положения БПЛА в кватернионном представлении. В блоке 3.4 осуществляется преобразова-

продиктовано планировщиком траектории. Сигнал ошибки поступает в *PD*-регулятор, где формируется управляющий сигнал в блок 3.7, в котором формируются сигналы задания частоты вращения роторов моторов.

В блоке управления угловым положением БПЛА использовалась линеаризованная модель уравнений (1) и (5), которая представляется тремя уравнениями относительно четырех неизвестных подъемных сил  $F_i, i = \overline{1,4}$ , поэтому, для однозначного определения всех компонент вектора тяги моторов дополнительно использовалось уравнение динамики вдоль вертикальной оси. Задача управления положением БПЛА в пространстве решается посредством определения требуемого угла наклона БПЛА. Требуемый угол определяется путем двойного интегрирования требуемого углового ускорения  $\ddot{\gamma}_{i,d}(t), i = \overline{1,4}$ . Для перемещения в горизонтальной плоскости необходимо выставить углы тангажа и крена так, чтобы проекция на горизонтальную плоскость вектора тяги  $F$  была направлена в целевую точку. Таким образом, зная требуемое угловое ускорение  $\ddot{\gamma}_{i,d}(t)$ , находятся требуемые значения углов тангажа и крена  $\varphi_d(t), \theta_d(t)$ .

$$\begin{aligned}\varphi_d &= 1/g \left( \ddot{\gamma}_{1,d} \sin \psi_T - \ddot{\gamma}_{2,d} \cos \psi_T \right), \\ \theta_d &= 1/g \left( \ddot{\gamma}_{1,d} \cos \psi_T + \ddot{\gamma}_{2,d} \sin \psi_T \right), \\ \psi_d &= \psi_T.\end{aligned}\tag{8}$$

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

$$U = J \begin{pmatrix} k_{P,\varphi} \varepsilon_\varphi + k_{D,\varphi} \dot{\varepsilon}_\varphi \\ k_{P,\theta} \varepsilon_\theta + k_{D,\theta} \dot{\varepsilon}_\theta \\ k_{P,\psi} \varepsilon_\psi + k_{D,\psi} \dot{\varepsilon}_\psi \end{pmatrix},\tag{9}$$

где  $J$  – матрица моментов инерции БПЛА в подвижной системе отсчета;  $\varepsilon_\varphi = \varphi_d - \varphi$ ,  $\varepsilon_\theta = \theta_d - \theta$ ,  $\varepsilon_\psi = \psi_d - \psi$  – текущие угловые ошибки положения БПЛА.

Параметры *PD*-регулятора системы управления определялись решением задачи минимизации квадратичного функционала от угловых ошибок и их первых производных, которая сводится к решению уравнений Риккати программными средствами с помощью модуля *lqr*, отмеченного в Приложении П.2 диссертации.

Составленная математическая модель движения БПЛА в шахтных условиях виде соотношений (1) – (9), учитывающая шахтные возмущения и пространственные ограничения, использованная как объект управления при формировании структуры и синтезе законов управления системы автоматического управления движением, а также разработанный алгоритм формирования рациональной гладкой траектории с использованием алгоритма Дейкстры для маршрутного безопас-

ного движения беспилотного летательного аппарата, определяют основные научные положения.

**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. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата, как объект управления, представленная системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений с ограничениями на допустимую область движения и внешними возмущениями в виде алгебраических соотношений, численно моделируется в программной среде с использованием алгоритма *ode45 Matlab*, гарантирующий порядок сходимости четвертой или пятой степени.

На первом этапе моделирования был осуществлен подбор оптимальных коэффициентов *PD*-регулятора блока управления пространственным положением и блока управления угловым положением БПЛА путем численного решения уравнения Риккати, к которому сводилась задача минимизации квадратичного функционала от ошибки слежения и ее производной по времени.

На втором этапе исследовательского эксперимента осуществлялось моделирование управляемого движения летательного аппарата 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 являлась проверка маневренных характеристик беспилотного летательного аппарата при автоматически управляемом полете в условиях шахтных выработок. Для чего проводилась серия численных экспериментов с вариацией нагрузки, возмущений и наличии препятствий. В основу реализации модельных экспериментов движения для формирования гипотетического маршрута был положен фрагмент горных выработок шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс», изображенный на рисунке 5. а, по которому создан тестовый полигон, представленный на рисунке 5. б. 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 шахтных воздушных потоков варьировалась.

Скорость полета БПЛА при отсутствии возмущающего воздушного потока принималась постоянной в двух вариантах 6 м/с и 10 м/с.

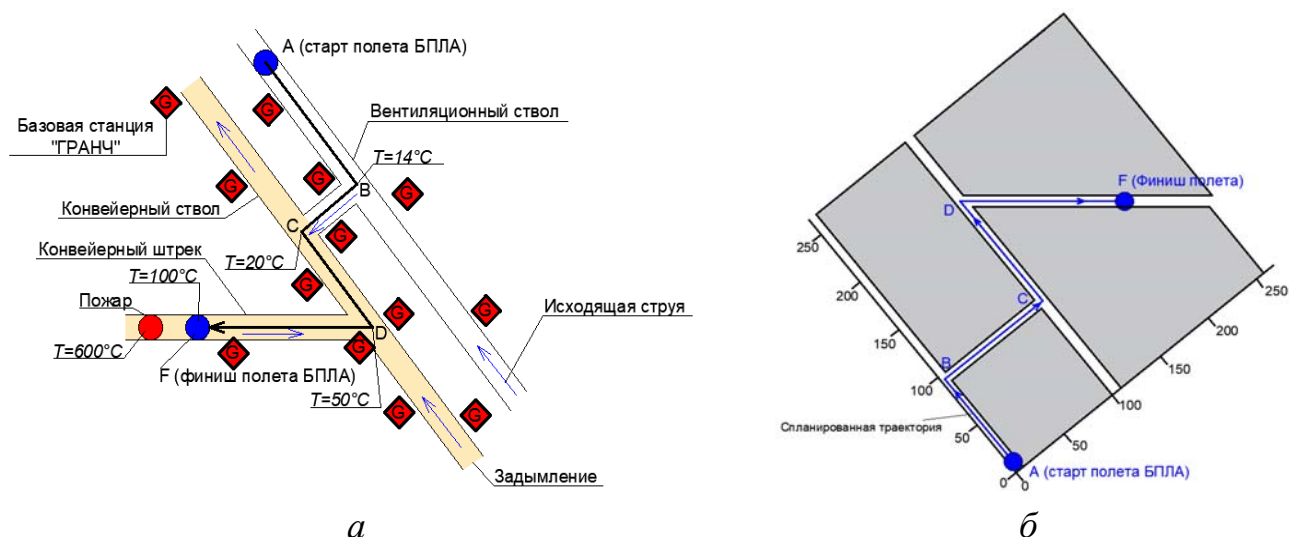


Рисунок 5. *а* – фрагмент горных выработок шахты им. «В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс», *б* – тестовый полигон

В этих условиях были проведены следующие модельные эксперименты: *а* – пролет по тестовому полигону без возмущений и препятствий и пролет по тестовому полигону без возмущений, но с препятствиями; *б* – пролет по тестовому полигону со встречным и боковым постоянными потоками воздуха; *в* – пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой без возмущений и препятствий и пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой без возмущений, но с препятствиями; *г* – пролет по тестовому полигону с полезной нагрузкой с постоянным встречным и боковым потоками воздуха; *д* – экстренное торможение полета с различными массами БПЛА.

В каждом из экспериментов исследовались количественные характеристики качества управляемого движения:

- отклонение траектории движения от спланированной по трем осям,
- среднее отклонение реальной траектории движения от спланированной,
- максимальное отклонение траектории от спланированной за время полета.

В экспериментальном моделировании движения по спланированному маршруту исследовалось движение БПЛА на скоростях 6 м/с и 10 м/с при различных значениях массы БПЛА: 0,6 кг; 1,2 кг. 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 рисунке 6. *а*, *б*. приведены экспериментальные кривые, отражающие качество управления при прохождении маршрута, когда БПЛА нагружен или не нагружен, когда летит с максимальной скоростью или 60% от нее. Моделирование движения обнаружило максимальную величину отклонения не более метра по координате *x*, до 1,5 метров по координате *y*, до 1,3 метра по координате *z* (рисунок

6. а) на скорости 6 м/с с полезной нагрузкой. Максимальное отклонение чуть больше полуметра по координате x, до метра по координате y, до 1,2 метра по координате z на скорости 10 м/с без полезной нагрузки (рисунок 6. б).

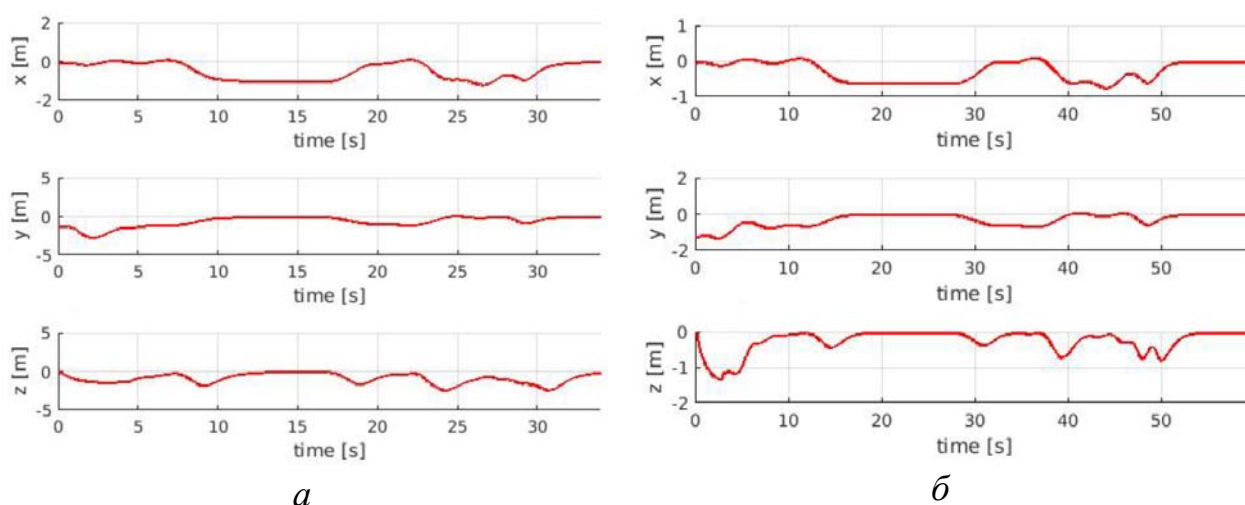


Рисунок 6. Координатные отклонения от траектории при движении со скоростью а – 6 м/с с полезной нагрузкой, б – 10 м/с без полезной нагрузки.

В рамках исследования рассмотрена величина модуля текущего вектора отклонения  $s(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$  реальной траектории от задания. На рисунке 7 приведена экспериментальная кривая на скорости 6 м/с с полезной нагрузкой, показывающая, что максимальная величина отклонения чуть больше одного метра имела место на первых пяти секундах полета, в дальнейшем отклонение не превышало 30 см.



Рисунок 7. Величина модуля текущего вектора отклонения реальной траектории от задания со скоростью 6м/с с полезной нагрузкой.

На основании модельных экспериментов получены числовые данные средних и максимальных отклонений от запланированной траектории при полете на скоростях 6 м/с и 10 м/с от массы полезной нагрузки БПЛА. Результаты экспериментов представлены на рисунке 8.

Для проверки отработки маневренности системой управления движением БПЛА проведен эксперимент, в котором на маршруте устанавливались гипотетические препятствия, которые располагались в вертикальной плоскости XZ и обходить которые возможно сверху и снизу (рисунок 9).

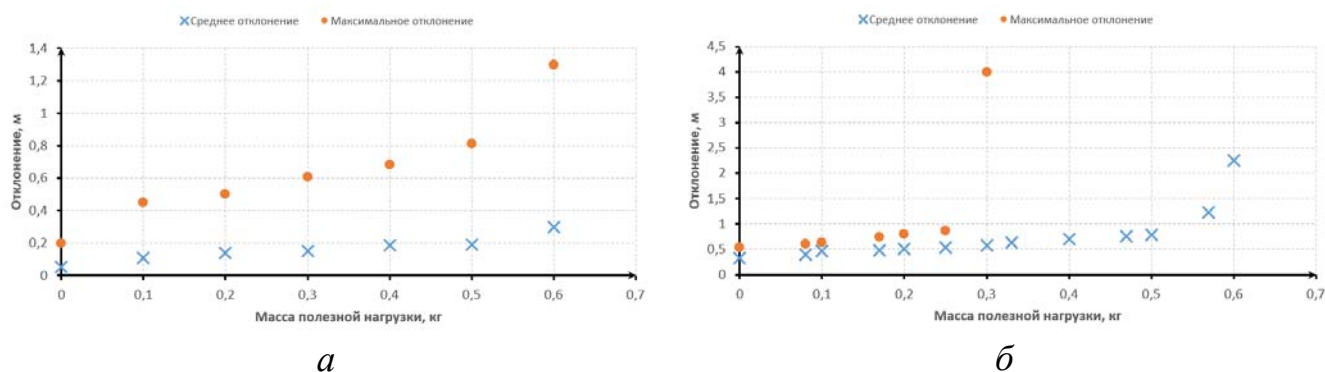


Рисунок 8. Отклонения от запланированной траектории *а* - при полете на скорости 6 м/с, *б* - при полете на скорости 10 м/с от массы полезной нагрузки.

Наличие препятствий приводило к замедлению скорости прохождения трассы в области препятствия, так как указанные маневры невозможно пройти с максимально допустимым ускорением.

Прохождение модельного участка БПЛА массой 0,6 кг без нагрузки заняло 15,35 с, БПЛА с нагрузкой прошел этот участок за 20,1 с. Результатом эксперимента стало доказательство того, что синтезированная система автоматического управления позволяет решать задачи маневрирования в случае появления завалов.

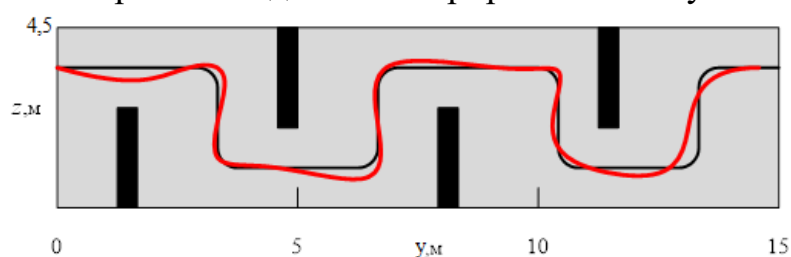


Рисунок 9. Схема расположения гипотетических препятствий. Спланированная траектория (черный цвет) и реальная траектория (красный цвет) прохождения.

Чувствительность системы к возмущению в виде реакции на боковой или встречный шахтный воздушный поток определялась в виде оценки максимального отклонения 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.

Модельный эксперимент показал, что система управления позволяет БПЛА без полезной нагрузки выдерживать траекторию с допустимыми отклонениями при скорости потока до 6 м/с, а с полезной нагрузкой 0,6 кг скорость бокового воздушного потока в 4 м/с оказывается критической. (рисунок 10). Результаты моделирования движения по маршруту навстречу возмущающего шахтного воздушного потока показали, что система управления позволяет БПЛА с полезной нагрузкой 0,6 кг выдержать с допустимыми отклонениями от траектории встречный воздушный поток до 8 м/с.



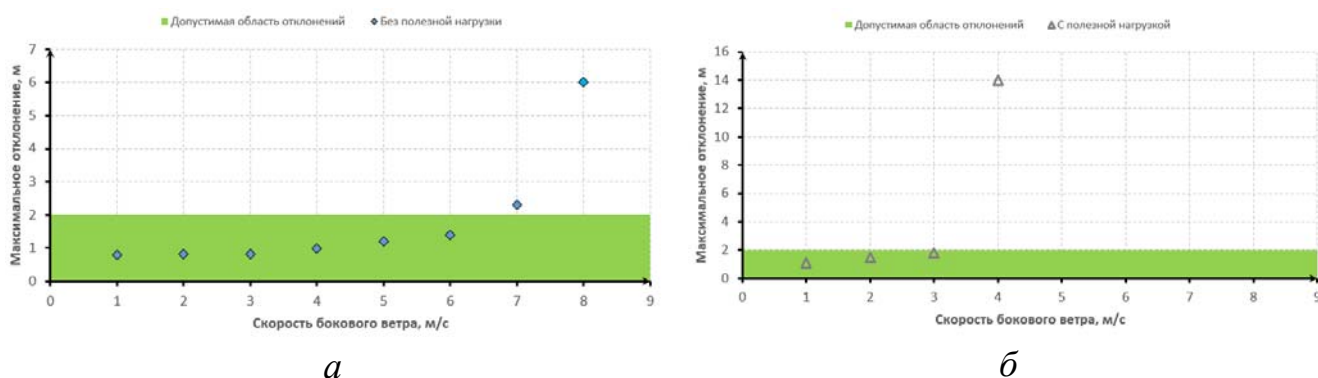


Рисунок 10. Максимальные отклонения от спланированной траектории при возмущении боковым потоком - БПЛА без нагрузки (а), БПЛА с нагрузкой (б).

Исследования движения беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях поставочного 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 нагрузках до 0,6 кг (рисунок 11). Из-за наличия силы вязкого трения о воздух длина тормозного пути изменяется нелинейно в относительно небольшом диапазоне. Показано, что при максимальной полезной нагрузке 0,6 кг предельный тормозной путь при начальной скорости торможения 6 м/с составил 6,25 м, а при начальной скорости торможения 10 м/с составил 14,5 м.

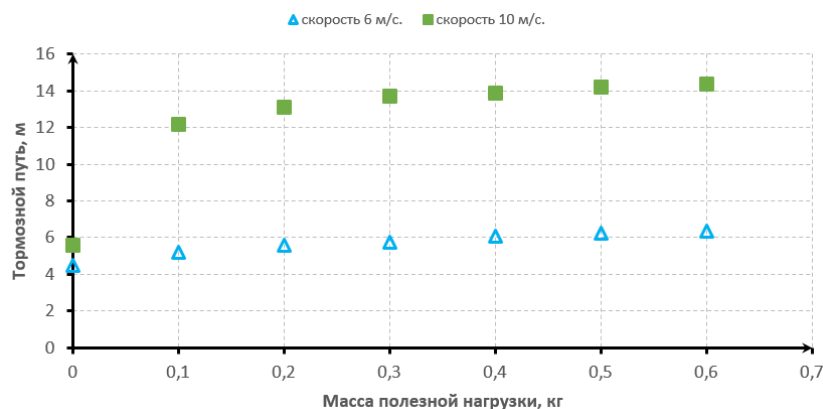


Рисунок 11. Длина тормозного пути от массы полезной нагрузки при скорости 6 м/с и 10 м/с.

Полные результаты исследований экстренного торможения, а также результаты исследований взаимосвязи максимального времени полета и длина полетного пути беспилотного летательного аппарата в шахтных условиях от его нагруженности приведены в диссертации.

Результаты исследовательского моделирования системы автономного управления траекторным полетом по маршруту показывают удовлетворительное

качество отслеживания заданных траекторий, что подтверждает правильность и обоснованность алгоритма управления и дает основание для утверждения четвертого научного положения.

**В пятой главе** описаны результаты анализа, и обоснование выбора робототехнических средств доставки приборов мониторинга, средств технического зрения для визуализации состояния горных выработок, средств измерения и характеристик рудничной атмосферы. Проанализированы основные характеристики летающих беспилотных платформ с аппаратами на борту по классам: легкие, средние, тяжелые. Принималось во внимание их массы, габариты, тип привода, системы управления, дальность автономного перемещения, предельная и средняя скорость движения.

Оценка состояния подземной горной выработки осуществляется средствами технического зрения. Выполнен анализ и обоснование выбора средств технического зрения для беспилотных аппаратов. При выборе системы технического зрения для оценки состояния горных выработок учитывались две характеристики этой системы: ее компактность для размещения на летательном аппарате и ее производительность, достаточная для распознавания элементов пространства при принятии целевого решения. Одна из задач системы технического зрения при оценке состояния горных выработок – это построение 3D-карты окружающего пространства, предназначенной для ориентации беспилотного аппарата. Выполнен анализ характеристик основного элемента системы технического зрения – цифровой камеры. Камеры технического зрения отличаются чувствительными элементами изображения – оптическими датчиками, поэтому при анализе были рассмотрены камеры с инфракрасными датчиками, тепловизоры, радары, радиозрение, лазерный дальномер, лидар, проведена оценка основных характеристик оптических датчиков – разрешение, динамический диапазон и чувствительность к свету и шумам.

Выполнен анализ средств измерения параметров и характеристик рудничной атмосферы, предназначенных для установки на борт БПЛА. В аварийной выработке необходимо измерять температуру рудничного воздуха и концентрацию газов: метана  $CH_4$ , углекислого газа  $CO_2$ , оксида углерода  $CO$ , оксида и двуокиси азота  $NO + NO_2$ , кислорода и водорода. Исследовались газовые сенсоры, работающие по термокаталитическому, термокондуктометрическому, электрохимическому, ультразвуковому, оптическому, гальваническому принципам. Предпочтение отдано оптическим отказоустойчивым газовым датчикам со сверхнизким энергопотреблением, быстрым временем отклика, с искробезопасной цепью класса  $ia$ , с линеаризованным цифровым выходом, с температурной компенсацией  $-40...+60^\circ C$  и миниатюрных размеров. Обосновано техническое решение по фор-

мирование сети передачи данных в автоматизированной системе шахтного робототехнического мониторинга. Принята сеть передачи данных, построенная по технологии *Wi-Fi*, в классе *WLAN*-сетей, которая позволяет выполнять высокоскоростную передачу данных по беспроводному каналу связи с производительностью передачи до 10 Мбит/сек. Сети *WLAN* на основе единой инфраструктуры связи позволяют увеличивать свои функциональные возможности, так, система *SBGPS* производства компании «ГРАНЧ», используя эту технологию, обеспечивает кроме функций позиционирования и аварийного оповещения доступ в Интернет непосредственно из шахты любых серийных мобильных устройств. Кроме того, она позволяет обеспечить связь поверхности с любым оборудованием, работающим в шахте.

Приведены результаты экспериментальных исследований в условиях шахт «Комсомолец» и «им. С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс» сети передачи данных и изображений, а также технологии подземной навигации, созданной на основании интеграции программного комплекса «Вентиляция 2» и системы позиционирования «*SBGPS*», осуществляющей непрерывно, в реальном времени, определение местоположения человека в шахте с точностью позиционирования  $\pm 4$  м и имеющей дублирующие каналы связи, реализуемые технологиями *Ethernet* (ВОЛС и/или *Granch SBNI - Siberian Board Network Interface*) и *Wi-Fi* (протокол *IEEE 802.11 b/g/n/i*). Исследованы энергетические характеристики навесного оборудования БПЛА. На основе анализа существующих технических средств доставки, технического зрения и сенсоров газового состава, разработаны различные ограничения на создание шахтного БПЛА, представлены расчеты требуемых скоростей БПЛА в зависимости от массы технического зрения и массы самого БПЛА. Описаны перспективы развития системы шахтного поставарийного мониторинга горных выработок с использованием БПЛА.

### **Заключение по диссертационной работе.**

В диссертации представлена разработанная концепция использования БПЛА для информационного обеспечения горноспасательных служб о 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 качественно повысить эффективность 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 используется 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 поддержки горноспасательных служб с использованием в качестве инструментального средства БПЛА 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 решением создания автоматизированной системы информационного обеспечения горноспасательных служб признаны перспективными в структуре многофункциональной системы безопасности угольных шахт.

Дальнейшим возможным направлением развития 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.

## Публикации по теме диссертации

### Статьи в научных журналах, включенных в базу Scopus

1. *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.
2. *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.

### В научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

3. *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.
4. *Певзнер Л.Д., Ким М.Л.* Робототехника в горном деле // Горный информационно – аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — №S1 — С. 240 – 251.
5. *Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д., Мещеряков Р.В., Концевой А.С.* Система автоматического управления траекторным движением шахтного беспилотного летательного аппарата // Горная промышленность. — 2019. — №3 (145). — С. 60 – 65.
6. *Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д.* Особенности применения БАС в угольных шахтах // Горная промышленность. — 2019. — №3 (145). — С. 88 – 90.
7. *Ким М.Л., Темкин И.О.* О некоторых аспектах организации автоматизированной системы анализа состояния аварийного участка шахты с использованием БПЛА // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10 (специальный выпуск 32). — С. 3–10.

### В других изданиях

8. *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» (14 – 20 сентября 2018 г., г. Алушта). — Алушта, 2018. — С. 255 – 256.
9. *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 систем: Материалы международной научно – практической конференции (08 – 12 октября 2018 г., г. Волгоград). — Волгоград, 2018. — С. 164 – 165.
10. *Ким М.Л.* Автоматизированная информационная система горноспасательных частей на основе беспилотных летательных аппаратов // Экстремальная робототехника: Сборник тезисов 30-й Международной научно-технической конференции (13 — 15 июня 2019 г., г. Санкт-Петербург). — Санкт-Петербург, 2019. — С. 287 – 288.