

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС ДОСТИЖЕНИЙ ТАЛАНТЛИВОЙ
МОЛОДЁЖИ
«НАЦИОНАЛЬНОЕ ДОСТОЯНИЕ РОССИИ»**

Направление: Робототехника

Тема: Возможности применения ракетных двигателей при эксплуатации БПЛА

Соискатель: студент 1 курса Мусатов Марк Романович
студент 3 курса Михайлевский Кирилл Дмитриевич

Научный руководитель: преподаватель, к.т.н, Лукина Анаит Арутюновна

Место выполнения работы: Московская область, г. Люберцы, ГБПОУ МО
«Люберецкий техникум имени Героя Советского Союза, летчика-космонавта Ю.А.
Гагарина»

Оглавление

Введение	3
1. Краткая характеристика ракетных двигателей	4
1.1. Принцип работы, достоинства и недостатки.....	4
1.2. Сферы применения РД	8
2. Современные конструкции двигателей БПЛА	9
2.1. Оснащение модели квадрокоптера ракетным двигателем.....	12
3. Разработка модели бесколлекторного квадрокоптера с карамельным ракетным двигателем ..	14
Заключение	17
Список используемых источников и литературы.....	18

Введение

В настоящей работе представлены результаты поставленного эксперимента, в ходе которого была доказана возможность применения ракетного двигателя (далее РД) при эксплуатации квадрокоптера с электрическим двигателем. Сегодня являются весьма актуальными вопросы источников энергии для полетов беспилотных летательных аппаратах (далее БПЛА), в том числе их эффективность, факторы, влияющие на длительность полета и маневренность.

Цель работы – доказать возможность использования РД при осуществлении полета квадрокоптера с бесколлекторными двигателями.

Задачами, поставленными для реализации цели, стали:

1. Собрать и ввести в эксплуатацию квадрокоптер.
2. Разработать модель и изготовить держатель для ракетного заряда.
3. Установить держатель на нижнюю платформу дрона.
4. Припаять электрический воспламенитель на подходящие контакты полетного контроллера.
5. В цепь воспламенителя включить управляющее током электромеханическое реле и запрограммировать его на управление с кнопки пульта.
6. Испытать в полете работу ракетного карамельного двигателя.

В первых главах, посвященных теоретическим данным и практическим наработкам в этой сфере, мы описали существующие на сегодняшний день РД, а так же рассмотрели основные виды двигателей, применяемые для полетов БПЛА.

Третья глава посвящено детальному описанию проведенного эксперимента и выводам, которые мы смогли сделать благодаря успешному испытанию РД в конструкции БПЛА.

1. Краткая характеристика ракетных двигателей

РД – установка, имеющая источник энергий и запас рабочего тела и предназначенная для получения тяги путем преобразования любого вида энергий в кинетическую энергию рабочего тела.

Сила тяги в ракетном двигателе возникает в результате преобразования исходной энергии в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела. В зависимости от вида энергии, преобразующейся в кинетическую энергию реактивной струи, различают химические ракетные двигатели, ядерные ракетные двигатели и электрические ракетные двигатели.

Характеристикой эффективности ракетного двигателя является удельный импульс (в двигателестроении применяют несколько другую характеристику – удельная тяга) – отношение количества движения, получаемого ракетным двигателем, к массе израсходованного рабочего тела.

1.1. Принцип работы, достоинства и недостатки

Ракетные двигатели (далее РД) применяются в различных сферах в зависимости от типа двигателя. Рассмотрим кратко некоторые виды ракетных двигателей.

Жидкостный ракетный двигатель (далее ЖРД), реактивный двигатель, не использующий для работы окружающую среду и работающий на жидком ракетном топливе. Может функционировать в атмосфере и в космическом пространстве.

ЖРД – основной тип двигателей на космических кораблях, широко применяется также в высотных исследованиях и боевых баллистических ракетах дальнего действия, зенитных управляемых ракетах; ограниченно – в боевых ракетах др. классов, на экспериментальных самолётах и др.

Топливо ЖРД может быть однокомпонентным и двухкомпонентным (горючее и окислитель); большинство современных ЖРД работают на двухкомпонентном топливе. ЖРД состоит из камеры сгорания (КС), сопла, турбонасосного агрегата подачи топлива, газогенератора, системы автоматики, органов регулирования, системы зажигания, телеметрических датчиков, вспомогательных агрегатов (теплообменников, рулевых приводов и др.), рамы и др.

Горючее и окислитель впрыскиваются под давлением в КС через форсунки, перемешиваются, испаряются и воспламеняются. Воспламенение (зажигание) топлива может осуществляться химическими, пиротехническими и электрическими средствами.

Достоинства ЖРД:

- высокий удельный импульс
- дают большую тягу при меньшем расходе топлива, чем твердотопливные
- регулируемая тяга
- возможно отключить и запустить двигатель в полете
- высокая точность управления режимом.

Недостатки ЖРД:

- сложная конструкция
- высокая стоимость
- разработка, производство и обслуживание дороже, чем у ТТРД.

- сложность эксплуатации (криогенные топлива требуют охлаждения, за счет чего увеличение габаритов и массы)

- токсичные компоненты опасны для персонала.

- меньшая надёжность по сравнению с ТТРД.

Схема строения ЖРД представлена на рисунке 1.1.

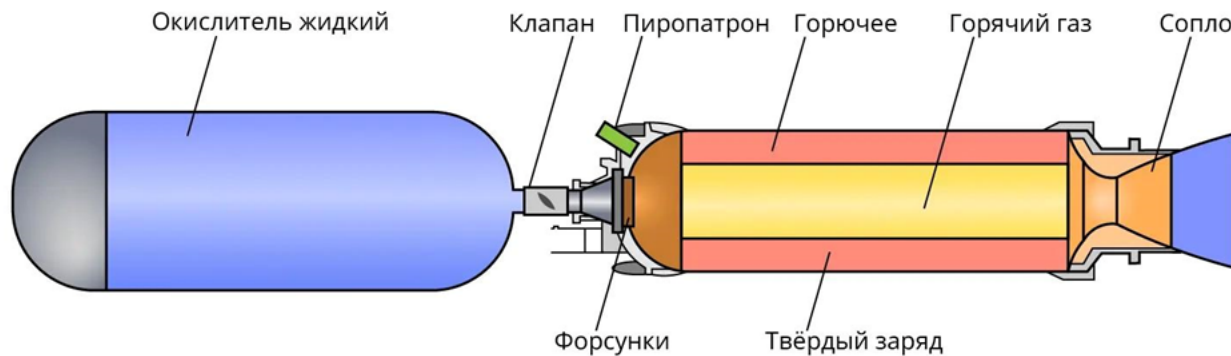
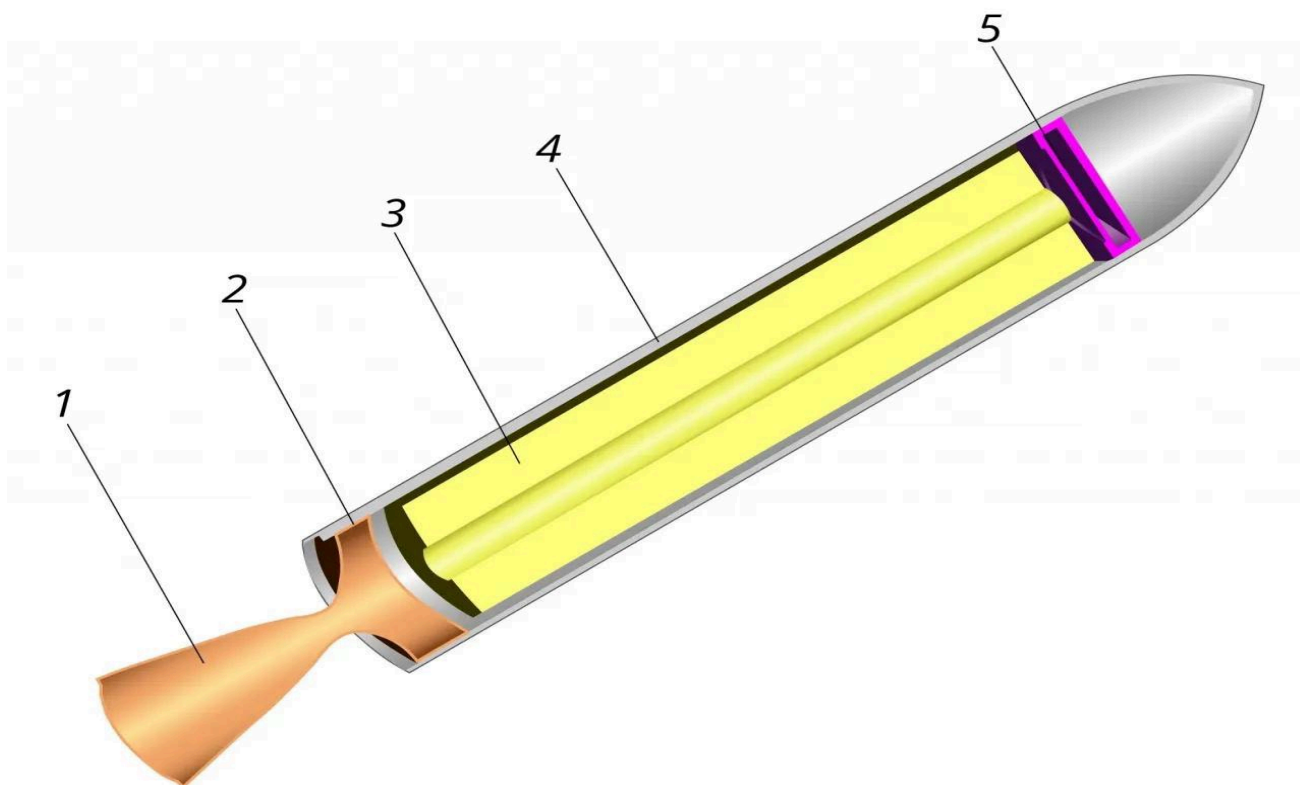


Рис. 1.1. Структурная схема жидкостного ракетного двигателя

Твердотопливный ракетный двигатель (РДТТ) работает на твердых ракетных топливах. Применяют во всех классах ракет военного назначения, в космической (например, в качестве стартовых и маршевых двигателей) и авиационной технике (ускорители взлёта самолётов, в системах катапультирования) и др.

Основные элементы РДТТ: корпус (камера сгорания), заряд твердого ракетного топлива, сопловый блок, исполнительные органы системы управления вектором тяги, система запуска, тепловая защита и узлы аварийного выключения.

Принцип работы. В твердотопливном ракетном двигателе топливо и окислитель смешиваются в твердое топливо, которое помещается в твердый цилиндр. Отверстие в цилиндре служит камерой сгорания. При воспламенении смеси происходит горение на поверхности топлива. Генерируется фронт пламени, который прожигает смесь. В результате сгорания образуется большое количество отработавших газов при высокой температуре и давлении. Горячие отработавшие газы проходят через сопло, которое ускоряет поток. Затем тяга создается в соответствии с третьим законом Ньютона. Структурная схема ТТРД представлена на рис.1.1.



1 – сопло; 2 – герметизация; 3 – зерно; 4 – кожух; 5 – воспламенитель заряда.

Рис. 1.2. Схема компонентов твердотопливного ракетного двигателя

Достоинства РДТТ:

- простая конструкция
- отсутствие насосов, сложных клапанов и трубопроводов — топливо и окислитель уже смешаны в твёрдом заряде
- высокая надёжность
- минимум движущихся частей - меньше отказов
- готовность к немедленному запуску
- не требуется заправка перед стартом – двигатель можно долго хранить в готовом состоянии
- большая тяга на старте
- компактность и высокая плотность энергии
- твёрдое топливо занимает меньше объёма по сравнению с жидкими компонентами.

Недостатки:

- невозможность регулировать тягу
- после воспламенения двигатель работает по заданному профилю – нельзя «прибавить», «убавить» или выключить
- низкий удельный импульс
- опасность при изготовлении
- трудность диагностики дефектов
- одноразовость

- управление в основном аэродинамическими рулями или поворотом сопла, без тонкой регулировки тяги.

Электрический ракетный двигатель (ЭРД) – ракетный двигатель, принцип работы которого основан на преобразовании электрической энергии в направленную кинетическую энергию частиц (рис.1.3).

Принцип действия двигателя заключается в ионизации газа и его разгоне электростатическим полем. При этом благодаря высокому отношению заряда к массе, становится возможным разогнать ионы до очень высоких скоростей. Таким образом, в ионном двигателе можно достичь очень большого удельного импульса.

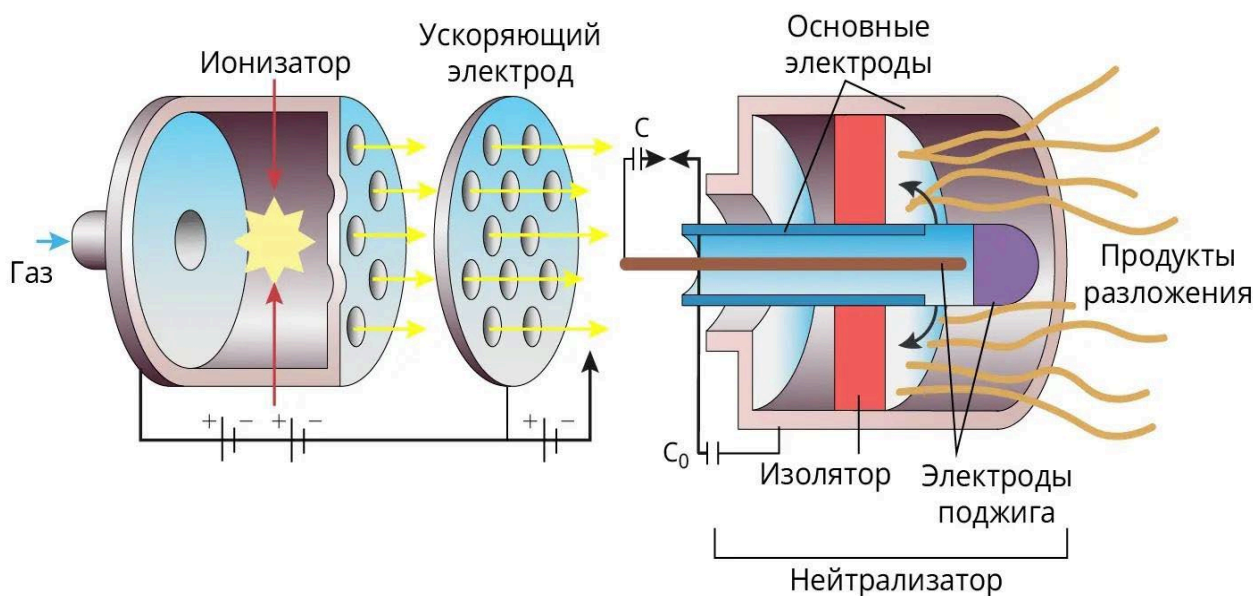


Рис.1.3. Структурная схема электрического ракетного двигателя

Достоинства:

- очень высокий удельный импульс
- длительная работа
- высокая точность управления тягой
- малый расход рабочего тела
- идеальны для космических миссий (особенно для спутников, межпланетных аппаратов, орбитальных коррекций)
- низкая тяга (меньше вибраций и перегрузок).

Недостатки:

- малая тяга
- непригодны для старта с Земли (работают только в космосе)
- зависимость от источника энергии (солнечные панели или ядерные источники)
- сложность конструкции
- высокая стоимость (дорогой аргон)
- износ элементов (электроды и стенки каналов постепенно разрушаются плазмой).

Также на сегодняшний день существуют и апробируются для полетов ядерные ракетные двигатели, в которых используется газ (водород), нагреваемый в зоне ядерного реактора и при выходе наружу создающий реактивную тягу.

Из достоинств можно отметить высокую тягу, длительность работы, энергетическая автономность. Из недостатков – радиационная опасность, высокая стоимость и большая масса за счет защитных систем.

1.2. Сферы применения РД

Области применения весьма разнообразны, наиболее значимые из них:

1. Запуск ракет-носителей для доставки спутников, космических станций, грузовых и пилотируемых кораблей на околоземную орбиту
2. Маршевые двигатели ракет-носителей (преимущественно жидкостные ракетные двигатели, ЖРД) обеспечивают преодоление земного притяжения и вывод полезной нагрузки в космос
3. Управление и коррекция орбиты космических аппаратов
4. Малые двигатели (в т. ч. электрические ракетные двигатели, ЭРД) поддерживают заданную орбиту, проводят ориентацию и стабилизацию космических аппаратов
5. Межпланетные и дальние космические миссии (перелёты к Луне, Марсу, Венере и другим планетам Солнечной системы)
6. Военное применение (баллистические ракеты межконтинентальные, средней и малой дальности)
7. Вывод коммерческих спутников (связь, навигация)
8. Космические туризм и частные миссии.

Преимущественно используются твердотопливные ракетные двигатели (РДТТ) из-за простоты, надёжности и быстрого старта.

2. Современные конструкции двигателей БПЛА

Беспилотный летательный аппарат (далее БПЛА) — это летательный аппарат, способный выполнять полёт без пилота, управление которым осуществляется дистанционно оператором или автономно с использованием бортовых систем управления, специального программного обеспечения и навигации.

В течение XX века инженеры из России, СССР и других стран трудились над созданием БПЛА с высокой дальностью полета и точностью приземления. Они испытали различные типы летательных аппаратов: с крыльями, винтами и машины, дальность и направление полета которых задавались до взлета, а также те, которыми можно управлять с земли. Важными изобретениями для развития сферы БПЛА стали гироскоп, автопилот, современные электронные микрочипы, благодаря которым аппараты смогли стать более легкими, компактными и менее дорогими, и система GPS.

БПЛА входят в состав беспилотных авиационных систем (БАС), которые включают сам летательный аппарат, средства управления, связи, навигации, необходимую полезную нагрузку и наземную инфраструктуру контроля.

БПЛА могут работать как в ручном режиме, так и по заранее заданной программе полёта, с элементами искусственного интеллекта и машинного зрения.

Классификация БПЛА.

По способу управления. Дистанционно управляемые – управление осуществляется оператором с земли по радиоканалу. Автономные – полёт выполняется по заданному алгоритму без постоянного вмешательства оператора. Комбинированные – сочетают автономный режим и возможность ручного управления.

По типу летательного аппарата. Самолётного типа – обладают крылом и используют аэродинамическую подъёмную силу. Вертолётного типа – используют несущий винт. Мультикоптеры – несколько винтов, вертикальный взлёт и посадка. Гибридные – совмещают признаки самолёта и вертолёта.

По назначению: разведывательные, ударные, транспортные, научно-исследовательские, гражданские и коммерческие.

Конструкция БПЛА. Типовой дрон состоит из следующих основных элементов:

- планер (корпус, крыло, несущая конструкция);
- силовая установка (электрическая, поршневая, реактивная или гибридная);
- бортовая система управления (автопилот);
- навигационные системы (GPS/ГЛОНАСС, инерциальные датчики);
- система связи с наземным пунктом управления (радиоприемник и радиопередатчик);
- полезная нагрузка (камеры, датчики скорости, угла наклона и др.);
- источник питания (аккумуляторы, топливные баки).

Принцип работы БПЛА основан на взаимодействии бортовых систем управления и силовой установки. После запуска аппарат:

1. Получает команды от оператора или следует заданному маршруту;
2. Стабилизирует полёт с помощью датчиков ориентации;
3. Корректирует траекторию на основе навигационных данных;
4. Выполняет поставленную задачу и возвращается либо завершает миссию.

Сферы применения БПЛА. Беспилотные летательные аппараты широко применяются в различных областях:

- мониторинг территорий и объектов с целью обеспечения безопасности;
- аэрофотосъёмка и картография;
- сельское хозяйство;
- доставка грузов в труднодоступные места;
- научные исследования;
- спасательные операции и поиск людей;
- контроль важнейших инфраструктур (ЛЭП, трубопроводы, мосты).

К сожалению, дроны используются не только в мирных целях. Военные департаменты разных стран применяют беспилотные летательные аппараты для разведки, стратегических операций, а также для ударов по целям. Беспилотники могут выполнять миссии в зоне боевых действий, а также могут использоваться для мониторинга территорий и обнаружения источников опасности.

К преимуществам беспилотной авиации относят отсутствие риска для жизни пилота, меньшую стоимость по сравнению с пилотируемой авиацией, высокая манёвренность и точность выполнения задач, возможность работы в опасных или труднодоступных зонах.

Но имеется и ряд ограничений, а именно: зависимость от каналов связи и навигации, ограниченная грузоподъёмность, непродолжительное время полёта (особенно у электрических моделей), уязвимость к помехам и погодным условиям.

Двигатели, используемые в настоящее время для передвижения БПЛА, могут быть разных конструкций и источников энергии. В основном применяются поршневые, газотурбинные и электрические двигатели.

Газотурбинный двигатель представляет собой реактивный двигатель, в котором тяга создаётся за счёт реактивной струи горячих газов. В мультикоптерах газотурбинные двигатели применяются в виде авиационных микротурбин и используются исключительно в экспериментальных, военных и специализированных БПЛА, а также в демонстрационных проектах. В таких системах возможны две основные архитектуры: реактивная схема, при которой на каждом луче мультикоптера устанавливается микрореактивная турбина и подъёмная сила создаётся непосредственно реактивной тягой, и турбовальная схема, при которой одна или несколько турбин через редуктор передают механическую энергию на винты. Реактивная схема концептуально ближе к «реактивному квадрокоптеру», а турбовальная отличается большей эффективностью, но значительно большей конструктивной сложностью.

Сгорание топлива в поршневом двигателе осуществляется в цилиндрах, где поджигается смесь топлива и воздуха. Под действием давления получившихся газов происходит поступательное движение поршня. Образовавшаяся при этом тепловая энергия превращается в механическую. Это движение поршня, в свою очередь, преобразуется во вращательное движение коленчатого вала двигателя через шатун передается на винт, который и создаёт тягу.

Поршневые двигатели в мультикоптерах применяются крайне редко и практически никогда не используются для прямого привода винтов. В отличие от самолётных БПЛА, такая схема для мультикоптеров конструктивно и динамически неэффективна. На практике поршневые двигатели используются в составе гибридных силовых установок, где ДВС приводит генератор, а винты по-прежнему вращаются электрическими двигателями. Это обусловлено невозможностью мгновенного и независимого регулирования оборотов каждого винта, высокой инерционностью поршневого двигателя, сложностью трансмиссии, вибрациями и ростом массы.

Основным и наиболее распространённым типом двигателя в мультикоптерах является электрический двигатель. Он преобразует электрическую энергию аккумулятора во вращение пропеллера и обеспечивает взлёт, висение и маневрирование аппарата. В современных мультикоптерах практически исключительно применяются бесколлекторные электродвигатели постоянного тока, которые отличаются высоким КПД, точным управлением тягой и конструктивной простотой. Такой двигатель состоит из статора с многофазными медными обмотками, ротора с постоянными магнитами, подшипников, корпуса и системы определения положения ротора. Управление двигателем осуществляется электронным регулятором скорости, который преобразует постоянное напряжение аккумулятора в управляемый трёхфазный ток. Полётный контроллер рассчитывает требуемую тягу каждого винта, передаёт команды на регуляторы, которые изменяют обороты двигателей, а винты создают соответствующую подъёмную силу. Управление полётом осуществляется исключительно за счёт разности оборотов двигателей без использования рулевых поверхностей. Наиболее распространённым типом является двигатель с внешним ротором, обладающий высоким крутящим моментом и эффективный при прямом приводе винта.

Электрические двигатели доминируют в мультикоптерах благодаря высокому КПД в режиме висения, мгновенному отклику по тяге, низким вибрациям, компактности, малой массе, высокой надёжности и простоте масштабирования.

Бесколлекторные двигатели – наиболее распространённый тип двигателей для дронов, особенно профессиональных и гоночных моделей. Они отличаются высокой эффективностью, надёжностью и долговечностью благодаря отсутствию щёток и подвижного коллектора. Конструкция бесколлекторного двигателя представлена на рис. 2.1.

Вращение ротора мотора происходит, когда постоянный ток подаётся на три фазы обмотки, между магнитами и катушкой образуется электрическое поле. Оно заставляет вращаться верхнюю часть мотора. Крутящий момент передаётся винтам, образуется подъёмная движущая сила, и дрон держится в воздухе. Процессом управляет электронный регулятор оборотов. Он задействует попеременно все три фазы, то подавая, то прекращая подачу тока. Частота переключений составляет тысячные доли секунды.

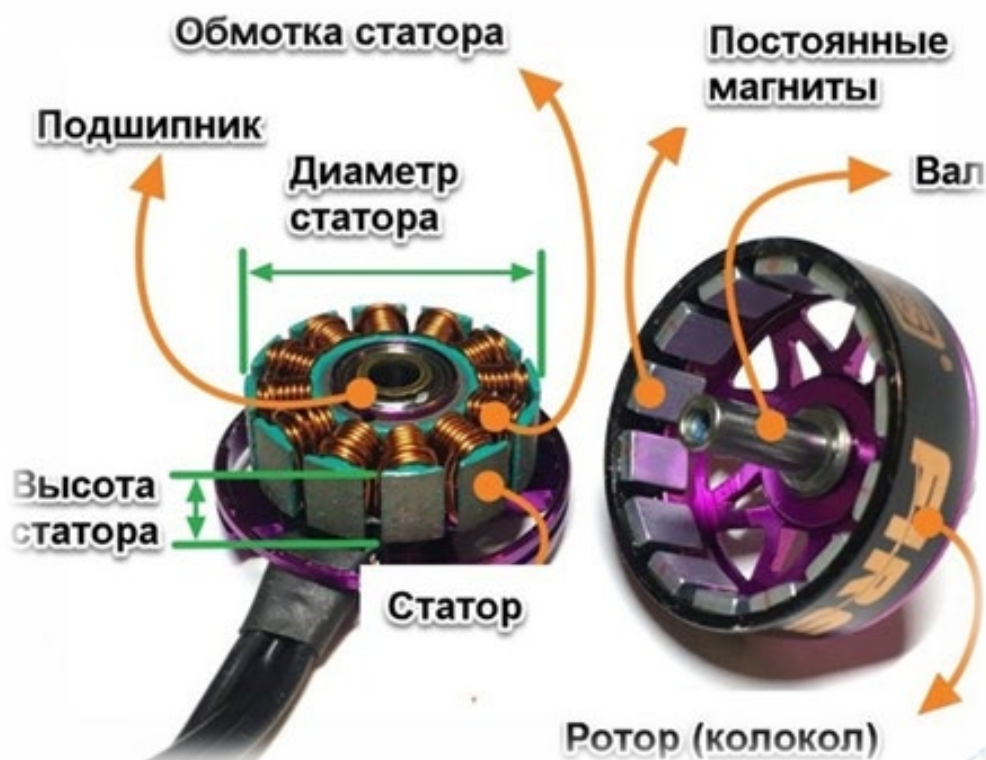


Рис. 2.1. Основные части конструкции электрического бесколлекторного двигателя

Преимущества бесколлекторных двигателей: высокая мощность и значительные обороты, сильная подъёмная тяга, компактные размеры и небольшой вес, а также долговечность – кроме двух подшипников, в конструкции нет подвижных, трущихся частей, что минимизирует трение и увеличивает срок службы, – высокая эффективность (КПД 90% и выше).

К недостаткам можно отнести высокую стоимость из-за использования дорогостоящих материалов в конструкции и высокотехнологичного производственного оборудования.

2.1. Оснащение модели квадрокоптера ракетным двигателем

Карамельный ракетный двигатель представляет собой разновидность твёрдотопливного ракетного двигателя (РДТТ), в котором в качестве топлива используется сахаросодержащее горючее, чаще всего сорбит, сахароза или декстроза, в сочетании с окислителем, обычно нитратом калия KNO_3 . Применительно к квадрокоптерам важно подчеркнуть, что карамельный двигатель не является основным двигателем квадрокоптера и не может использоваться для устойчивого полёта или висения. Конструктивно карамельный ракетный двигатель включает корпус двигателя, выполняющий роль камеры сгорания, твёрдое топливо в виде карамельного заряда, сопло и воспламенитель. Принцип его работы заключается в воспламенении топлива, после чего происходит быстрое горение твёрдого заряда, образуются газы с высокой температурой и давлением, которые истекают через сопло, вследствие чего возникает реактивная тяга согласно третьему закону Ньютона.

Несмотря на недостатки данного вида твёрдотопливного ракетного двигателя, такие как невозможность регулирования тяги, одноразовость, высокую температуру, опасность возгорания, мы выбрали для нашей экспериментальной модели именно такой.

Топливо карамельного ракетного двигателя относится к классу твёрдых ракетных топлив и представляет собой гомогенную смесь горючего и окислителя, находящуюся в твёрдом агрегатном состоянии. Название «карамельное» не связано с официальной классификацией и обусловлено визуальным сходством расплавленного топлива с карамелью, а также использованием сахаросодержащих компонентов. Концептуально топливо состоит из двух функциональных частей: горючего и окислителя. Горючее является источником химической энергии и представляет собой углеводные соединения, содержащие углерод, водород и кислород, участвующие в экзотермической реакции, образующие горячие газы, такие как CO_2 , H_2O и CO . Окислитель обеспечивает подачу кислорода для реакции независимо от окружающего воздуха, позволяет двигателю работать в замкнутом объёме и вакууме, а также определяет скорость реакции и давление в камере сгорания, при этом РДТТ окислитель всегда находится внутри топлива, в отличие от двигателей внутреннего сгорания.

Физически топливо находится в твёрдом состоянии и имеет форму монолитного заряда, горение происходит по поверхности, а скорость горения зависит от давления и температуры. Форма топливного заряда напрямую влияет на величину тяги, длительность работы и стабильность горения. Горение карамельного топлива характеризуется отсутствием детонации, равномерным горением, невозможностью регулирования после воспламенения и зависимостью тяги от геометрии заряда. Процесс включает воспламенение поверхности топлива, образование горячего газа, рост давления в камере, истечение газа через сопло и возникновение реактивной тяги.

С энергетической точки зрения карамельные топлива обладают средней удельной энергией, сравнительно низкой температурой горения по сравнению с промышленными и умеренной скоростью истечения газов, что делает их пригодными для учебных и исследовательских задач. Теоретическими преимуществами такого топлива являются простота химической системы, стабильность при хранении, однородность структуры, низкая чувствительность к ударам.

В следующей главе мы опишем, как создавалась модель квадрокоптера с карамельным ракетным двигателем, и представим результаты проведенных испытаний.

3. Разработка модели бесколлекторного квадрокоптера с карамельным ракетным двигателем

Для проведения эксперимента по испытанию ракетного двигателя в полете дрона мы собрали из необходимых комплектующих мультикоптер на четырех электрических бесщеточных двигателях.

Далее нам необходимо было по размеру нижней центральной части рамы смоделировать и изготовить держатель для ракетного запала.

Для опыта мы приобрели ракетные двигатели РД1-30-5, этот двигатель является твердотопливным карамельным реактивным с максимальной тягой 37 Н. Необходимо было по его размерам сделать держатель так, чтобы корпус двигателя плотно в него входил и после срабатывания не повредил электронные компоненты дрона (передатчик, полетный контроллер, регулятор оборотов). Для этого по необходимым размерам была нарисована модель держателя в программе Компас 3Д и распечатана из прочного пластика на принтере.

На рисунке 3.1 показаны РД и электрические воспламенители, которые необходимы для дистанционного запуска двигателя. Мы выбрали опциональный воспламенитель с длиной проводника 30 см и напряжением срабатывания от 5 до 12 Вольт. Стояла задача подключить воспламенитель к источнику питания, то есть к аккумулятору квадрокоптера, но так чтобы он не сработал при запуске дрона. Для этого нужно было установить электротехническое устройство для управления током.

Мы выбрали в соответствии с управляющим током, который возможно было получить с полетного контроллера необходимое электромеханическое реле, а именно: модуль реле 1-канальный с уровнем сигнала переключения 3.3 В и переключателем срабатывания по низкому или высокому сигналу, используется с микроконтроллерами (рис. 3.2).

После того как все элементы для установки на дрон РД и его дистанционного запуска были установлены, то есть по электрической схеме припаяны все токоведущие и управляющие провода, нам необходимо было запрограммировать полетный контроллер на управление реле и выход на тумблер пульта управления для срабатывания реле, а значит воспламенения электрофитиля в полете.



Рис. 3.1. Смонтированный держатель РД, модельные реактивные двигатели и электрические воспламенители

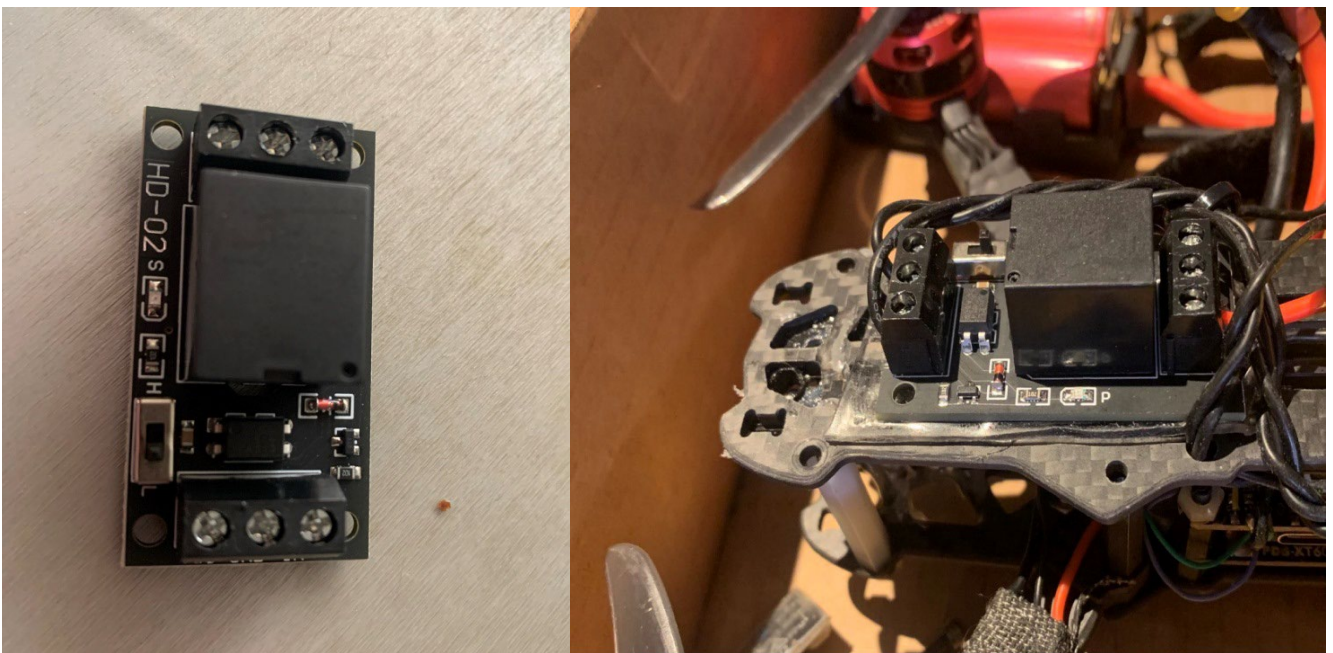


Рис. 3.2. Реле электромеханическое одноканальное (срабатывание от напряжения 3-3.3 Вольта)

Программирование всех управляющих выводов на полетном контроллере осуществляется в программном продукте Betaflight, в котором мы нашли свободный канал, предназначенный для управления мотором, переназначили на управление сервоприводом. Далее мы логически связали свободный переключатель на пульте управления и подачу управляющего тока на электромеханическое реле, которое замыкая цепь, подает напряжение от аккумулятора на электрический воспламенитель.

Прежде чем начать испытание ракетного двигателя в полете мы проверили срабатывание реле без воспламенителя, далее включили его как потребителя в схему, поместили во внутрь ракетного двигателя и подготовили все необходимое к запуску.

В ходе запуска и активации ракетного двигателя с земли мы убедились, что импульс, ускоривший дрон, был достаточно сильным, управление пилотом не было потеряно, и наш беспилотный образец был приземлен без повреждений.

На рисунке 3.3 показан квадрокоптер, готовый к запуску, но еще не подключено питание, а также в полете после запуска установленного на него реактивного двигателя.



Рис. 3.3. Модель квадрокоптера в сборе с ракетным двигателем

Таким образом, нам удалось провести успешные испытания РД, установленного на квадрокоптер. И, несмотря на возможность одноразового применения в полете, мы реализовали возможность повторной установки таких твердотопливных запалов на дрон вместе с электровоспламенителем после приземления и его повторное воспламенение в полете при необходимости.

Также в рамках дальнейших испытаний, в том числе для активации РД в процессе полета не только по вертикали, но и под определенным углом, мы планируем установить на управление током срабатывания воспламенителя вместо электромеханического реле транзисторный ключ, который имеет ряд преимуществ, как меньшие размеры, так и большую надежность в эксплуатации.

Заключение

Итак, основная цель – реализовать применение реактивной тяги в процессе эксплуатации мультироторных БПЛА – была достигнута. Все задачи, поставленные для ее достижения, были выполнены.

После решения всех поставленных задач и успешно проведенных испытаний, мы получили следующие результаты:

1. Нам удалось разработать и применить конструкционные, технические и программные средства для реализации экспериментальной модели.

2. Испытания показали безопасность сработавшего заряда как для схмотехники квадрокоптера, так и для его конструкции.

3. Использовать ракетный двигатель возможно многократно, вставив в конструкционное сопло новый заряд после посадки и подсоединив контакты воспламенителя к аккумулятору через рыле, управляемое пилотом.

Что касается практической значимости работы, считаем весьма перспективным развитие этой темы, в частности для дальнейшего применения в системах БАС с целью увеличения длительности и дальности полета, а так же возможности поднять аппарат на высоту с минимальным расходом электроэнергии аккумулятора.

Целесообразность применения реактивной тяги в процессе полета:

- значительное увеличение скорости и маневренности при необходимости, например, при уходе от атаки;

- возможность направить БПЛА небольших размеров на атаку других БПЛА больших размеров как для изменения курса, так и для крушения.

Список используемых источников и литературы

1. Бейктал Дж. Конструируем роботов. Дроны. Руководство для начинающих / Дж. Бейктал; пер. с англ. Ф. Г. Хохлова. – 2-е изд., электрон. – М.: Лаборатория знаний, 2022. – 226 с.
2. Безруков С.И. Классификация беспилотных летательных аппаратов / С.И. Безруков, В.Ю. Гумилев, А.В. Пархоменко, Д.А. Филиппов // Оригинальные исследования. – 2020. – № 4. – С. 67-81.
3. Гололобов В. Н., Ульянов В. И. Беспилотники для любознательных. – СПб.: Наука и Техника, 2018. – 256 с.
4. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
5. Как спроектировать собственный квадрокоптер [Электронный ресурс]. URL: <https://haker.ru/2013/11/11/own-quadrokopter/> (дата обращения 15.12.2025).
6. Гоночный FPV-дрон своими руками (часть 1) – сборка [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/395455/> (дата обращения 15.12.2025).
7. Разработка системы дистанционного пуска твердотопливного двигателя модели ракеты / Д.И. Быстров, С.В. Марченко, А.А. Пучков // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2018. – Том 1. – С. 82-84.
8. Касперович А.Ю. Строим летающие модели ракет. Кладовая опыта. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 224 с.
9. Букш Е.Л. Основы ракетного моделизма. – Москва: Издательство Досааф, 1972. – 73 с.
10. Современное состояние и перспективы развития силовых установок беспилотных летательных аппаратов / Д.С. Легконогих, А.А. Крылов, М.С. Иванов // Военная мысль. – 2019. – № 4. – С. 57-72.